

## BIOINDICADORES DE QUALIDADE DE SOLO: DOS LABORATÓRIOS DE PESQUISA PARA O CAMPO

*Iêda de Carvalho Mendes<sup>1</sup>  
Djalma Martinhão Gomes de Sousa<sup>2</sup>  
Fábio Bueno dos Reis Junior<sup>3</sup>*

Com o início da agricultura, há cerca de 8.000 a 10.000 anos, criou-se uma forte dependência entre as sociedades humanas, o solo e as plantas cultivadas. Hoje essa dependência tornou-se mais crítica, devido ao aumento da população mundial e da necessidade de cultivar cada vez mais de forma sustentável, fazendo uso eficiente dos recursos naturais, e promovendo a conservação da biodiversidade e a proteção do meio ambiente.

O maior desafio para a agricultura do século 21 consiste em aumentar a produção de alimentos baratos e saudáveis, com lucratividade e a um baixo custo ambiental e social. Em 2015, ano internacional do solo, verifica-se que a superação desse desafio passa obrigatoriamente pelo componente biológico do solo, pois ele apresenta uma estreita inter-relação com os componentes físicos e químicos, os quais influenciam em conjunto não só a produtividade das culturas, mas também a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Embora a afirmação de que os micro-organismos controlam o mundo pareça um pouco exagerada, não é. Processos essenciais para a vida no planeta Terra dependem da atividade microbiana. Trata-se de um verdadeiro universo paralelo e pouco conhecido, uma vez que a maior parte das espécies microbianas não crescem em meios de cultura nos laboratórios. Por exemplo,

---

<sup>1</sup> Engenheira-agrônoma, Ph.D. em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF. [ieda.mendes@embrapa.br](mailto:ieda.mendes@embrapa.br)

<sup>2</sup> Químico, mestre em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF. [djalma.sousa@embrapa.br](mailto:djalma.sousa@embrapa.br)

<sup>3</sup> Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF. [fabio.reis@embrapa.br](mailto:fabio.reis@embrapa.br)

um único grama de solo possui cerca de 1 bilhão de bactérias, 1 milhão de actinomicetos e 100 mil fungos. Em termos de número de espécies por grama de solo, as estimativas variam de 2.000 a 8,3 milhões (GANS et al., 2005; SCHLOSS; HANDELSMAN, 2006). Independentemente do grau de conservadorismo da estimativa utilizada, esses valores dão uma ideia da imensa diversidade metabólica das comunidades microbianas do solo e, conseqüentemente, da diversidade de processos em que elas atuam.

O fato que os microrganismos são os responsáveis diretos pelo funcionamento do solo, atuando nos processos de gênese, decomposição de resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes, formação da matéria orgânica e biorremediação de áreas contaminadas por poluentes e agrotóxicos, justifica não só a importância, mas também a necessidade da inclusão dos indicadores microbiológicos (aqui denominados bioindicadores) nas avaliações de qualidade do solo.

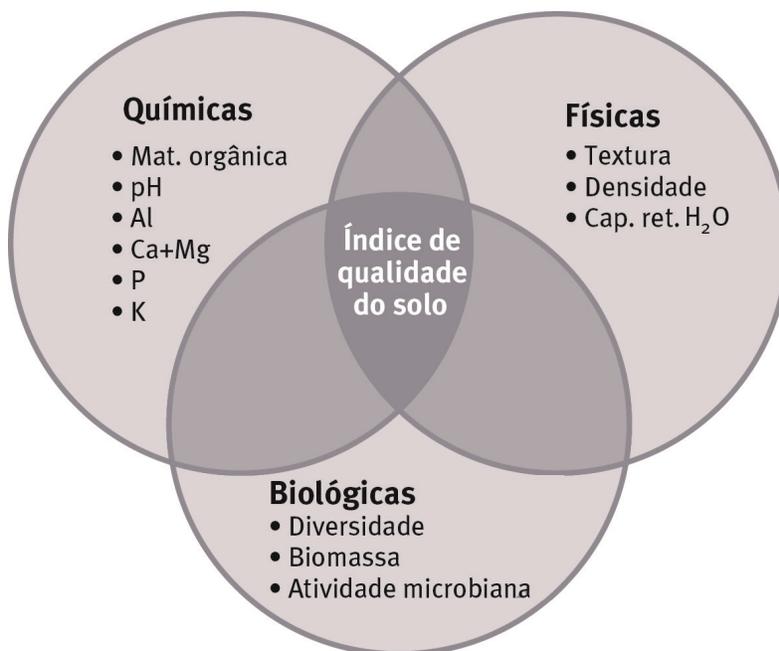
No Brasil, a maioria dos trabalhos com bioindicadores de qualidade de solo foi desenvolvida em cultivos anuais sob sistemas plantio direto (SPD) e convencional (SPC). O trabalho de Silva Filho e Vidor (1984) foi o primeiro a comparar a microbiologia de solos sob SPD e SPC. Desde então, existe um interesse crescente nesse tema de pesquisa. Em contraposição a 4 trabalhos publicados entre 1990 e 1999, no período 2000–2014, foram contabilizados no Brasil 59 manuscritos que abordam aspectos relacionados ao uso de bioindicadores em solos sob SPD (MENDES, 2014). Esses trabalhos permitiram um avanço significativo no conhecimento do funcionamento biológico dos solos sob SPD em condições tropicais e subtropicais, constituindo um valioso conjunto de informações, que engloba as regiões agrícolas mais representativas do País.

Neste artigo serão abordados aspectos relacionados ao uso de bioindicadores nas avaliações de qualidade do solo, o estado da arte dessa pesquisa e suas perspectivas de uso pelos agricultores.

## BIOINDICADORES DE QUALIDADE DE SOLO: UTOPIA OU REALIDADE?

Considerando que, no século 21, além de produção de alimentos, fibras e energia, a agricultura também terá importante papel na prestação de serviços

ambientais, observa-se cada vez mais que o interesse pelo funcionamento biológico dos solos agrícolas ultrapassa os limites dos ambientes acadêmicos e dos laboratórios de pesquisa. A possibilidade de pagamentos por serviços ambientais e de certificação de fazendas/produtores que investem em práticas que garantem a conservação/restauração dos recursos naturais permite vislumbrar que num futuro próximo, além das propriedades químicas e físicas, determinações das propriedades biológicas poderão também fazer parte das rotinas de análises de solo e de índices de qualidade de solo (Figura 1). O conhecimento e uso dos atributos microbiológicos pelos agricultores será importante tanto para incentivar aqueles que já estão adotando sistemas de manejo conservacionistas, como para alertar agricultores que utilizam sistemas de manejo que possam levar à degradação do solo.



**Figura 1.** Em um futuro próximo, além da matéria orgânica do solo e das propriedades químicas e físicas, determinações das propriedades biológicas também poderão fazer parte das rotinas de análises de solo e de índices de qualidade de solo (IQS).

Vários estudos mostram que os bioindicadores são mais sensíveis que indicadores químicos e físicos para detectar, com mais antecedência, alterações que ocorrem no solo em virtude do seu uso e manejo (BALOTA et al., 2003; BALOTA et al., 2004; CARNEIRO et al., 2004; DICK, 1994; DORAN, 1980; HUNGRIA et al., 2009; LISBOA et al., 2012; MATSUOKA et al., 2003; MENDES et al., 2003; PEIXOTO et al., 2010; POWLSON et al., 1987). Entretanto, um dos grandes desafios a serem transpostos no uso de indicadores microbiológicos para avaliações de qualidade de solo é a dificuldade para interpretação dos valores individuais desses parâmetros, uma vez que a inclusão dos bioindicadores nessas avaliações pressupõe o estabelecimento de valores que possam separar solos com diferentes condições de sustentabilidade (ARSHAD; MARTIN, 2002; GIL-SOTRES et al., 2005; TÓTOLA; CHAER, 2002; TRASAR-CEPEDA et al., 1997).

Diferentemente do que ocorre com os indicadores químicos de fertilidade, cujos níveis (baixo, médio, adequado e alto) já estão relativamente bem definidos para cada elemento e tipo de solo (sempre levando em consideração características como: textura, teor de matéria orgânica, etc.), até recentemente era difícil simplesmente medir e interpretar indicadores microbiológicos, independentemente de um controle ou referencial de comparação.

Nos estudos de microbiologia existem dois enfoques para o estabelecimento de áreas de referência: 1) condição de solo nativo; e 2) condições que maximizam a produção e conservam o meio ambiente (DORAN; PARKIN, 1994; GIL-SOTRES et al., 2005). Pode-se ainda adotar como referência critérios de variação temporal quando ocorre o acompanhamento de uma mesma área ao longo do tempo (KANDELER et al., 1999). Nesse caso, os valores determinados para os bioindicadores podem ser monitorados para avaliar tendências ao longo do tempo. Na realidade, as avaliações comparativas em que se usam as áreas de referências (“comparative assessment”) e as avaliações temporais (“dynamic assessment”) são complementares, pois englobam diferentes escalas de avaliação (GIL-SOTRES et al., 2005; TÓTOLA; CHAER, 2002). Entre esses critérios de referência, no Brasil, o uso de áreas nativas, com mínimos impactos antropogênicos, tem prevalecido principalmente nos trabalhos conduzidos no bioma Cerrado.

Visando auxiliar na interpretação individual dos bioindicadores, os autores deste artigo elaboraram, recentemente, uma proposta baseada na utilização dos princípios dos ensaios de calibração de nutrientes (LOPES et al., 2013a, 2013b). Nos estudos de fertilidade química do solo, os níveis de suficiência dos nutrientes são determinados utilizando-se métodos de calibração, em que os teores dos nutrientes fornecidos pelo solo ou pelos fertilizantes são relacionados com algum indicador da planta, como a produção de grãos. Com base nessas relações, determina-se o nível crítico (NC) para cada nutriente, que é definido como a concentração do nutriente no tecido vegetal ou no solo acima da qual pouco ou nenhum aumento na produção é esperado (ESCANO et al., 1981). Nos ensaios de calibração que visam ao estabelecimento dos NCs, são conduzidos experimentos do tipo curva de resposta, em que os diferentes teores de nutrientes no solo são ajustados em função das produtividades das culturas, por meio de modelos matemáticos como Mitscherlich, quadrático, exponencial, etc. Em muitos casos, o NC corresponde à concentração do nutriente, referente a 80% ou 90% da produtividade de máxima eficiência econômica (CANTARUTTI et al., 2007; MAIA et al., 2001).

Para o desenvolvimento da proposta de interpretação de atributos microbiológicos (LOPES et al., 2013a, 2013b), foram utilizados três experimentos de longa duração (um experimento com 17 anos e dois experimentos com 12 anos) conduzidos num Latossolo Vermelho de textura argilosa, na Embrapa Cerrados (Figura 2). Foram selecionados 24 tratamentos, em que diferentes doses e formas de aplicação de superfosfato triplo possibilitaram a criação de um gradiente de fósforo extraível, o qual gerou um gradiente de diferentes rendimentos acumulados de grãos de soja e milho e, conseqüentemente, de matéria orgânica do solo (MOS). A proposta foi baseada nas relações dos atributos microbiológicos com o rendimento relativo acumulado (RRA) de grãos de soja e milho e com os teores de MOS. Todos os atributos microbiológicos foram correlacionados positivamente com o RRA e com a MOS, o que possibilitou, por meio de análises de regressão, a delimitação de classes de suficiência para cada um, em função do RRA e da MOS, de acordo com os seguintes critérios:  $\leq 40\%$ : baixo; de 41% a 80%: moderado; e  $> 80\%$ : adequado.

As tabelas de interpretação dos atributos microbiológicos com base no rendimento acumulado de grãos das culturas e na MOS (sumarizadas na

Tabela 1) são únicas na literatura e estabeleceram, pela primeira vez, níveis críticos para carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal, e atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase e celulase (ciclo do C), fosfatase ácida (ciclo do P) e arilsulfatase (ciclo do S). Verifica-se que, embora pequenas diferenças tenham sido observadas entre os limites superiores e inferiores das classes de interpretação, em geral houve uma boa concordância entre os dois critérios de interpretação: RRA e MOS.

Iêda de Carvalho Mendes



**Figura 2.** Experimento de longa duração conduzido na Embrapa Cerrados, em que, por meio da presença/ausência de adubação fosfatada, foi possível induzir a ocorrência de parcelas com alta e baixa qualidade de solo. Nessa condição foram geradas as primeiras tabelas de interpretação dos bioindicadores.

O uso do RRA de grãos de três experimentos de longa duração foi fundamental para a elaboração dessas tabelas. Diferentemente do rendimento anual dos cultivos, o rendimento relativo acumulado diminui a influência de fatores não relacionados à qualidade de solo (adversidades climáticas, genótipos de plantas e ocorrência de pragas e doenças) e reflete com mais

precisão todas as mudanças que ocorreram no solo ao longo do período de condução dos experimentos. Além de evidenciarem os riscos da utilização de dados anuais de produtividade como indicadores de qualidade de solo, esses dados também reforçam a importância estratégica de experimentos de campo de longa duração. Como o solo é a “memória” dos sistemas de manejo, o estudo da sustentabilidade de sistemas agrícolas requer vários anos de experimentação, pois as mudanças no solo não costumam ocorrer rapidamente.

**Tabela 1.** Interpretação de bioindicadores para Latossolos Vermelhos argilosos de Cerrado, na camada de 0–10 cm, com base no rendimento relativo acumulado (RRA) de grãos de soja e milho e no teor de matéria orgânica do solo.

| Atributos<br>microbiológicos <sup>(1)</sup>                          | Classes de interpretação |           |          |
|--|--------------------------|-----------|----------|
|  | Baixo                    | Moderado  | Adequado |
| <b>Com base no rendimento relativo acumulado (RRA)<sup>(2)</sup></b> |                          |           |          |
| C da biomassa  | ≤215                     | 216-375   | >375     |
| Respiração basal   | ≤40                      | 41-90     | >90      |
| β-Glicosidase  | ≤65                      | 66-115    | >115     |
| Celulase   | ≤70                      | 71-105    | >105     |
| Fosfatase ácida  | ≤680                     | 681-1.160 | >1.160   |
| Arilsulfatase  | ≤40                      | 41-90     | >90      |
| <b>Com base no teor de matéria orgânica do solo (MOS)</b>            |                          |           |          |
| C da biomassa  | ≤205                     | 206-405   | >405     |
| Respiração basal   | ≤40                      | 41-100    | >100     |
| β-Glicosidase  | ≤60                      | 61-140    | >140     |
| Celulase   | ≤70                      | 71-115    | >115     |
| Fosfatase ácida  | ≤640                     | 641-1.150 | >1.150   |
| Arilsulfatase  | ≤35                      | 36-90     | >90      |

<sup>(1)</sup> Valores de C da biomassa microbiana e respiração basal expressos em mg de C kg<sup>-1</sup> de solo; valores de atividade de β-glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase expressos em mg de p-nitrofenol kg<sup>-1</sup> de solo h<sup>-1</sup>; celulase em mg de glicose kg<sup>-1</sup> de solo (24 h)<sup>-1</sup>.

<sup>(2)</sup> RRA = rendimento acumulado de grãos de soja e milho relativizado em função da maior produção acumulada obtida em cada experimento.

Fonte: adaptado de Lopes et al. (2013a).

Os experimentos de campo de longa duração tornam possível verificar o efeito do “parâmetro tempo” associado às práticas de manejo do solo (BROWN, 1991; PETERSON, 2012). Assim, nesses experimentos é possível estabelecer os efeitos positivos e negativos de diferentes sistemas de manejo na qualidade do solo.

Nas tabelas de recomendação de nutrientes, pela comparação dos valores obtidos na análise de uma amostra de solo com aqueles das faixas de teores estabelecidos experimentalmente, se atribui o grau de fertilidade. Posteriormente, para cada cultura/tipo de solo, se estabelece a quantidade de nutrientes, ou de corretivos, a serem aplicados. De forma análoga, além de estabelecer os valores de referência para os bioindicadores nos Latossolos Vermelhos do Cerrado (Tabela 1), o objetivo dessa tabela interpretativa é fornecer informações sobre a eficácia dos sistemas de produção e/ou práticas de uso da terra e de seus impactos sobre a qualidade do solo. Por exemplo, um valor de teste “baixo” para os indicadores microbianos pode ser uma indicação de que práticas de manejo inadequadas estejam sendo utilizadas. Para cada bioindicador, esses limites críticos também podem ser entendidos como os valores desejáveis que devem ser mantidos para o funcionamento normal do solo.

Além de ajudarem na interpretação dos bioindicadores independentemente de um controle ou tratamento comparativo, essas tabelas também podem ser úteis em termos de auxiliar no estabelecimento dos limites superiores e inferiores e dos valores de linha base para as funções de pontuação padronizadas, que são utilizadas para calcular os índices de qualidade do solo (HUSSAIN et al., 1999; KARLEN; STOTT, 1994).

O uso das classes de interpretação baseadas no rendimento das culturas e na matéria orgânica, para avaliar a qualidade dos solos agrícolas, parece mais adequado e realista do que o uso dos solos sob vegetação nativa como referência (LOPES et al., 2013a, 2013b). O funcionamento biológico dos solos de Cerrado, por exemplo, possui algumas peculiaridades (MENDES et al., 2012) que, se não forem bem compreendidas, podem levar a interpretações errôneas dos indicadores biológicos. Por exemplo, as áreas nativas do Cerrado com teores de matéria orgânica semelhantes aos das áreas cultivadas apresentam consistentemente menores atividades de  $\beta$ -glicosidase (LOPES et al., 2013a; PEIXOTO et al., 2010). Essa observação, que poderia ser

considerada uma anomalia (STOTT et al., 2010), está na realidade relacionada com a quantidade e qualidade dos resíduos vegetais retornados ao solo, que são mais complexos nas áreas nativas do que nas áreas agrícolas (PEIXOTO et al., 2010), resultando em redução da atividade da  $\beta$ -glicosidase, uma enzima que atua na etapa final de decomposição da celulose (TABATABAI, 1994). A respiração basal do solo nas áreas nativas do Cerrado também segue o mesmo padrão. Em adição ao fato que as taxas de respiração tendem a ser menores em ecossistemas naturais porque as populações microbianas do solo estão em equilíbrio (WARDLE, 1994), devido à maior complexidade de resíduos vegetais encontrados nas áreas nativas de Cerrado, o acúmulo de carbono prontamente mineralizável é menor do que nas áreas cultivadas. Essa situação resulta em níveis mais baixos de respiração basal nos solos nativos, em comparação com os solos cultivados com conteúdos semelhantes de matéria orgânica. O uso das classes de interpretação com base nas relações dos indicadores microbianos com o rendimento de grãos e com os teores de matéria orgânica das áreas cultivadas também reforça a ideia de que os níveis de CBM encontrados em ambientes em equilíbrio, como as áreas nativas de Cerrado, podem não ser alvos realísticos em solos agrícolas, mesmo sob as melhores práticas de manejo. Ou seja, o uso do Cerrado nativo como critério de referência de qualidade do solo para áreas cultivadas pode fazer com que solos agrícolas de alta qualidade sejam prejudicados por terem níveis de CBM inferiores aos encontrados nas áreas nativas.

A estratégia proposta por Lopes et al. (2013a, 2013b) para a interpretação dos valores dos atributos microbiológicos em Latossolos argilosos, baseada nos princípios da calibração de nutrientes, não teve a pretensão de esgotar esse assunto, mas sim de ser um ponto de partida, em que a identificação de uma situação observada em condições de campo possibilitou a construção de todo um procedimento de calibração, relacionando os atributos microbiológicos à produtividade das culturas e aos teores de MOS. Mais trabalhos de pesquisa ainda são necessários para assegurar que os resultados obtidos são consistentes ao longo do tempo, em outros locais e com outros parâmetros microbiológicos. Para se ter uma ideia do que isso representa, no Rio Grande do Sul, as primeiras tabelas de recomendação de nutrientes foram elaboradas em 1967, e até 2004 já haviam sido revisadas e aperfeiçoadas dez vezes (NICOLODI et al., 2004).

Assim, espera-se que novas versões dessa tabela possam ser geradas e aprimoradas e que tabelas semelhantes possam também ser elaboradas para diferentes regiões do País, diferentes tipos de solo (como os solos arenosos e de textura média) e até mesmo diferentes sistemas de manejo (pastagens e cultivos perenes e semiperenes). A validação dessas tabelas, mediante a expansão da base de dados de microbiologia dos solos brasileiros, e principalmente com dados coletados sob condições de fazenda, também é fundamental.

## CAMINHANDO EM DIREÇÃO À AMOSTRA FERTBIO

Para que os agricultores possam ter os bioindicadores nas análises de rotina de solo, seria muito importante que as amostragens para microbiologia e fertilidade química pudessem ser unificadas, gerando as amostras de solo FERTBIO (para fertilidade química e biológica do solo). Para que isso ocorra, aspectos importantes relacionados à época de coleta do solo, profundidade, forma de amostragem e processamento das amostras após a coleta precisam ser estudados para as avaliações microbiológicas – não só para que o agricultor possa unificar as amostragens para microbiologia e fertilidade química, mas também para que os laboratórios comerciais de análises de solo possam unificar os processos de preparação das amostras (secagem à temperatura ambiente e peneiramento).

Em geral, amostragens para análises microbiológicas são realizadas na metade da época chuvosa, preferencialmente na fase de máximo desenvolvimento das culturas (floração) e com as amostras na umidade do campo (“field-moist”). Ocorre que essa época coincide com um período de elevada demanda de trabalho na lavoura (principalmente em termos de controle de pragas e doenças) e com a cultura estabelecida em máximo desenvolvimento, o que na prática dificultaria a coleta e o envio dessas amostras para o laboratório. Por outro lado, a amostragem padrão para fertilidade química de solo é realizada no fim do período chuvoso, após a colheita das culturas (no fim do período chuvoso, o solo ainda apresenta alguma umidade, o que facilita a amostragem). Essa amostragem leva em consideração a necessidade de ter o resultado da análise de solo com antecedência, para facilitar o planejamento da compra de insumos como calcário, gesso ou adubos para a safra subsequente (as amostras devem ser enviadas aos laboratórios com a máxima antecedência

possível em relação à época de plantio). No Brasil, estudos que avaliem o funcionamento biológico do solo com amostras obtidas após a colheita das culturas, visando à unificação das amostragens de fertilidade e microbiologia, precisam ser ampliados.

O pré-tratamento das amostras de solo para as análises de fertilidade inclui o peneiramento (malha de 2 mm) e a secagem do solo ao ar (terra fina seca ao ar, TFSA). Vários trabalhos na literatura têm abordado as implicações do pré-tratamento e do armazenamento de amostras de solo para análises microbiológicas (LORENZ; DICK, 2011; ZORNOZA et al., 2006). No caso específico das enzimas do solo, alguns estudos mencionam reduções na atividade enzimática com a secagem (ABELLAN et al., 2011; BANDICK; DICK, 1999; LEE et al, 2007; PANCHOLY; RICE, 1972; WALLENUS et al., 2010); outros mencionam aumentos (BANDICK; DICK, 1999; EIVAZI; TABATABAI, 1977; EIVAZI; TABATABAI, 1990; GIANFREDA; BOLLAG, 1996; LONGO; MELO, 2005); e outros reportam a ausência de alterações (ZORNOZA et al., 2006) ou que os resultados são imprevisíveis (RAO et al., 2003). Como os resultados variam de acordo com o parâmetro avaliado e o tipo de solo, a realização de pesquisas locais é fundamental para estabelecer as implicações da secagem ao ar, para as determinações microbiológicas.

Recentemente, observou-se, em amostras de Latossolos argilosos de Cerrado, que, apesar de o armazenamento das amostras em condições de solo seco por 2 anos (uma condição extrema) ter reduzido, respectivamente, em 23% e 52% a atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase e sulfatase, esse processo não interferiu significativamente no ranqueamento dos tratamentos (LOPES et al., 2015), o que pode viabilizar a utilização desses parâmetros em análises de rotina. Por outro lado, no caso da enzima fosfatase ácida, o armazenamento das amostras em condições de solo seco por 2 anos promoveu uma expressiva redução de 72% na sua atividade, que influenciou o ranqueamento dos tratamentos.

Com relação à profundidade de amostragem, o uso da camada de 0–10 cm, como camada diagnóstica (ANGHINONI et al., 2002), é uma alternativa que, além de atender tanto as áreas sob sistema de plantio convencional (SPC) como as áreas sob sistema plantio direto (SPD), também atende os objetivos das análises de fertilidade química e de microbiologia do solo. Devido ao intenso revolvimento da camada arável do solo (0–20 cm) no SPC, os valores dos indicadores de fertilidade química na camada de 0–20 cm são mais ou menos

uniformes (LOPES et al., 2004). Nas áreas sob SPD, conforme detalhado por Anghinoni et al. (2002), a amostragem de solo na profundidade de 0–10 cm, para fins de avaliação da fertilidade, leva em consideração a variabilidade horizontal e a vertical, decorrentes da aplicação de calcário na superfície, dos fertilizantes a lanço ou em linha e da manutenção da palha na superfície do solo. Essa amostragem também leva em consideração aspectos relacionados à fase em que o SPD se encontra: em implantação ou já estabelecido.

Num cenário em que alguns parâmetros microbiológicos possam vir a fazer parte de um conjunto mínimo de atributos que avaliem a qualidade do solo, a unificação da profundidade e das épocas de amostragem para microbiologia e fertilidade química, e também do pré-tratamento das amostras de solo, facilitaria bastante a adoção/popularização/adesão por parte dos agricultores.

No rol de características desejáveis para a seleção de bioindicadores que possam ser utilizados nas análises de rotina, podem-se listar: precisão, coerência, sensibilidade, simples determinação analítica, estarem ligados à ciclagem da matéria orgânica do solo, não serem influenciados pela aplicação de adubos e envolverem o uso de reagentes baratos e fora da lista de controle do Exército. Além dessas características, a inclusão de aspectos, tais como adequação à amostragem após a colheita das culturas e aos procedimentos adotados no pré-tratamento das amostras de solo para as análises de fertilidade, também deve ser levada em consideração. Conforme observado nos Estados Unidos (BANDICK; DICK, 1999; STOTT et al., 2010), também no bioma Cerrado a atividade da enzima  $\beta$ -glicosidase, associada ao ciclo do C, se encaixa em todas essas características (LOPES et al., 2015). Embora seja um pouco mais sensível aos processos de secagem ao ar, a enzima arilsulfatase, ligada ao ciclo do S, também apresenta excelente potencial para uso em análises de rotina. Juntamente com os parâmetros de química e física de solos, esses bioindicadores estão habilitados para constituírem um conjunto mínimo de parâmetros para descrever a qualidade de solos do Cerrado (Figura 3). Para os laboratórios de pesquisa, o custo estimado das análises de  $\beta$ -glicosidase e sulfatase (uma amostra = controle e duas repetições analíticas) é de US\$ 11,00 (considerando uma taxa de câmbio de US\$ 1,0 = R\$ 3,7) e com grandes possibilidades de redução (PAZUTTI; CHAER, 2012). Para efeito de comparação, o custo de uma análise de rotina de fertilidade de solo (sem enxofre) é de US\$ 12,00 (setembro de 2015).



Djalma Martinhão Gomes de Sousa

**Figura 3.** Precisão, coerência, sensibilidade, adequação à amostragem após a colheita das culturas e aos procedimentos adotados no pré-tratamento das amostras de solo para as análises de fertilidade, além de simplicidade e baixo custo de determinação são características que favorecem a adoção das enzimas  $\beta$ -glicosidase (ciclo do C) e arilsulfatase (ciclo do S) para uso em análises de rotina de solo.

## O FUTURO E SEUS DESAFIOS

Em 2013, o XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo lançou o questionamento: “Ciência do solo, para quê? Para quem?”. Seguindo esse raciocínio, o principal resultado da linha de pesquisa com indicadores microbiológicos é a seleção de bioindicadores, com níveis críticos bem estabelecidos (o nosso *para quê*), que possam ser utilizados no monitoramento da qualidade do solo pelos agricultores nas diferentes regiões do Brasil (o nosso *para quem*). Considerando-se que o crescimento agrícola com sustentabilidade é uma excelente oportunidade para o Brasil, esse resultado consistirá numa grande inovação, pois permitirá que sejam agregados,

às análises de fertilidade química de solos, parâmetros relacionados ao funcionamento da sua maquinaria biológica. Na busca de métricas que possam separar os sistemas com diferentes “condições” de sustentabilidade, verifica-se que o uso dos bioindicadores poderá auxiliar consideravelmente nas avaliações de qualidade de solo.

Para tanto, é fundamental que a comunidade científica esteja atenta para a necessidade de avaliações sistematizadas (com padronização dos protocolos desde a profundidade e forma de amostragem, passando pela estocagem e o pré-tratamento das amostras, até os procedimentos analíticos e a apresentação dos resultados) e com a seleção de parâmetros-chave que serviriam como referencial em todos os estudos. Após 10 anos de trabalho em conjunto, os pesquisadores da Rede de Bioindicadores de Qualidade de Solo – composta por 21 especialistas de 14 instituições brasileiras, sendo 7 unidades da Embrapa, 4 universidades (UnB, FESURV, UFSC, UFPR) e 3 outras instituições: Iapar, Fundação MT e Emater-DF – selecionaram, para a próxima fase de seus estudos, o carbono da biomassa microbiana e a atividade das enzimas  $\beta$ -glucosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida como parte desse conjunto mínimo de atributos. No sul do País também foi incluído o nitrogênio da biomassa microbiana. A elevada correlação entre vários atributos microbiológicos indica a possibilidade de seleção de um conjunto reduzido e simplificado de indicadores capazes de expressar a qualidade biológica dos solos, tornando sua adoção em análises de rotina uma perspectiva atraente (CHAER; TÓTOLA, 2007).

Ao celebrarmos o ano internacional do solo, verifica-se que a equipe de microbiologistas do Brasil está mais do que preparada para aceitar o desafio da amostra FERTBIO, estabelecendo bases robustas (o quê avaliar, como avaliar, quando avaliar e como interpretar o que foi avaliado) para que o agricultor possa monitorar a “saúde” de seu solo de forma segura e criteriosa.

## AGRADECIMENTOS

À toda a equipe do Laboratório de Microbiologia do Solo da Embrapa Cerrados. A primeira autora agradece o auxílio de bolsas e financiamento de projetos pela Embrapa, CNPq (Edital de Redes REPENSA; Processo:

562433/2010-4) e FAPDF (Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Distrito Federal).

## REFERÊNCIAS

- ABELLAN, M. A.; BAENA, C. W.; MOROTE, F. A. G.; CORDOBA, M. I. P.; PEREZ, D. C. Influence of the soil storage method on soil enzymatic activities in Mediterranean forest soils. **Forest Systems**, v. 20, n. 3, p. 379-388, 2011.
- ANGHINONI, I.; SCHLINDWEIN, J. A.; NICOLODI, M. Amostragem do solo no sistema plantio direto. In: CURSO DE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 5., 2002, Guarapuava. **Resumos...** Passo Fundo: Aldeia Norte, 2002. p. 97-105.
- ARSHAD, M. A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 88, n. 2, p. 153-160, Feb. 2002.
- BALOTA, E. L.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; DICK, R. P. Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems. **Biology and Fertility of Soils**, v. 38, n. 1, p. 15-20, Jun. 2003.
- 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**, v. 35, n. 4, p. 300-306, out./dez. 2004.
- BANDICK, A. K.; DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, n. 11, p. 1471-1479, Oct. 1999.
- BROWN, J. R. Summary: Long-term field experiments symposium. *Agronomy Journal*, v. 83, n. 1, p. 85-85, Jan. 1991.
- CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F. de; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 769-850.
- CARNEIRO, R. G.; MENDES, I. de C.; LOVATO, P. E.; CARVALHO, A. M. de; VIVALDI, L. J. Indicadores biológicos associados ao ciclo do fósforo em solos de Cerrado sob plantio direto e plantio convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 7, p. 661-669, Jul. 2004.
- 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 de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1381-1396, 2007.

DICK, R. P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 107-124. (SSSA Special Publication, 35).

DORAN, J. W. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 4, p. 765-771, 1980.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 107-124. (SSSA Special Publication, 35).

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Factors affecting glucosidase and galactosidase activities in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 22, n. 7, p. 891-897, 1990.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Phosphatases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 9, p. 167-172, 1977.

ESCANO, C. R.; JONES, C. A.; UEHARA, G. Nutrient diagnosis in corn grown on hydric dystrandepts: II. Comparison of two systems of tissue diagnosis. **Soil Science Society America Journal**, v. 45, n. 6, p. 1140-1144, 1981.

GANS, J.; WOLINSKY, M.; DUNBAR, J. Computational improvements reveal great bacterial diversity and high metal toxicity in soil. **Science**, v. 309, n. 5739, p. 1387-1390, Aug. 2005.

GIANFREDA, L.; BOLLAG, J. M. Influence of natural and anthropogenic factors on enzyme activity in soil. In: STOTZKY, G.; BOLLAG, J. M. (Ed.). **Soil biochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1996. v. 9, p. 123-194.

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, n. 5, p. 877-887, May 2005.

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, n. 3, p. 288-296, Jul. 2009.

HUSSAIN, I.; OLSON, K. R.; WANDER, M. M.; KARLEN, D. L. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. **Soil and Tillage Research**, v. 50, n. 3-4, p. 237-249, May 1999.

KANDELER, E.; TSCHERKO, D.; SPIEGEL, H. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralization and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. **Biology and Fertility of Soils**, v. 28, n. 4, p. 343-351, Feb. 1999.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.;

STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 53-72. (SSSA Special Publication, 35).

LEE, Y. B.; LORENZ, N.; DICK, L. K.; DICK R. P. Cold storage and pretreatment incubation effects on soil microbial properties. **Soil Science Society of America Journal**, v.71, p. 1299-1305. 2007

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; SILVEIRA, A. O. da; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 45-55, jan./fev. 2012.

LONGO, R. M.; MELO, W. J. de. Hidrólise da uréia em latossolos: efeito da concentração de uréia, temperatura, pH, armazenamento e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 651-657, 2005.

LOPES, A. A. de C.; SOUSA, D. M. G. de; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. dos; GOEDERT, W. J.; MENDES, I. de C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 2, p. 461-472, 2013a.

LOPES, A. A. de C.; SOUSA, D. M. G. de; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. dos; GOEDERT, W. J.; MENDES, I. de C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon in Cerrado Soils. **CSA News**, v. 58, n. 4, p. 12, 2013b.

LOPES, A. A. de C.; SOUSA, D. M. G. de; REIS JUNIOR, F. B. dos; MENDES, I. C. Air-drying and long-term storage effects on  $\beta$ -glucosidase, acid phosphatase and arylsulfatase activities in a tropical Savannah Oxisol. **Applied Soil Ecology**, v. 93, p. 68-77, Sept. 2015.

LOPES, A. S.; WIETHOLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. **Sistema plantio direto**: bases para o manejo da fertilidade do solo. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2004. 110 p.

LORENZ, N.; DICK, R. P. Sampling and pretreatment of soil before enzyme analysis. In: DICK, R. P. **Methods of soil enzymology**. Madison: Soil Science Society of America, 2011. p. 85-102. (SSSA Book Series, 9).

MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C. de; OLIVEIRA, M. de. Nível crítico pelo critério da distribuição normal reduzida: uma nova proposta para interpretação de análise foliar. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 235-238, maio/ago. 2001.

MATSUOKA, M.; MENDES, I. C.; LOUREIRO, M. F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 425-433, maio/jun. 2003.

MENDES, I. C. Indicadores biológicos de qualidade de solo em sistemas de plantio direto no Brasil: estado atual e perspectivas futuras. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 31.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 15.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO,

- 13.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 10., 2014, Araxá. **Fertilidade e biologia do solo: integração e tecnologias para todos: anais**. Araxá: Núcleo Regional Leste da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2014. FertBio 2014.
- MENDES, I. C.; FERNANDES, M. F.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. dos. Biological functioning of Brazilian Cerrado soils under different vegetation types. **Plant and Soil**, v. 359, n. 1, p. 183-195, Oct. 2012.
- MENDES, I. C.; SOUZA, L. V.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Propriedades biológicas em agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio convencional e direto no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 435-443, maio/jun. 2003.
- NICOLODI, M.; GIANELLO, C.; ANGHINONI, I. Fertilidade: uma propriedade emergente do sistema solo. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 5., 2004, Florianópolis. **Resumos...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, 2004. CD-ROM.
- PANCHOLY, S. K.; RICE, E. L. Effect of storage conditions on activities of urease, invertase, amylase, and dehydrogenase in soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 36, n. 3, p. 536-537, 1972.
- PAZUTTI, L. V. B.; CHAER, G. M. **Desenvolvimento de metodologia de baixo custo para análise de  $\beta$ -glicosidase em solos**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2012. 23 p. (Embrapa Agrobiologia. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 92).
- PEIXOTO, R. S.; CHAER, G. M.; FRANCO, N.; REIS JUNIOR, F. B. dos; MENDES, I. C.; ROSADO, A. S. A decade of land use contributes to changes in the chemistry, biochemistry and bacterial community structures of soils in the Cerrado. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 98, n. 3, p. 403-413, Oct. 2010.
- PETERSON, G. A.; LYON, D. J.; FENSTER, C. R. Valuing Long-Term Field Experiments: Quantifying the Scientific Contribution of a Long-Term Tillage Experiment. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, p. 757-765, 2012.
- POWLSON, D. S.; PROOKES, 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 and Biochemistry**, v. 19, n. 2, p. 159-164, 1987.
- RAO, M. A.; SANNINO, F.; NOCERINO, G.; PUGLISI, E.; GIANFREDA, L. Effect of air-drying treatment on enzymatic activities of soils affected by anthropogenic activities. **Biology and Fertility of Soils**, v. 38, n. 5, p. 327-332, Sept. 2003.
- SCHLOSS, P. D.; HANDELSMAN, J. Toward a census of bacteria in soil. **PLOS Computational Biology**, v. 2, n. 7, p. 786-793, Jul. 2006
- SILVA FILHO, G. N.; VIDOR, C. As práticas de manejo de solo na população microbiana. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 291-296, 1984.
- STOTT, D. E.; ANDREWS, S. S.; LIEBIG, M. A.; WIENHOLD, B. J.; KARLEN, D. L. Evaluation of  $\beta$ -glucosidase activity as a soil quality indicator for the soil management

assessment framework. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 1, p. 107-119, 2010.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P.; BEZDICEK, D.; SMITH, S.; TABATABAI, A.; WOLLUM, A. R. W. (Ed.). **Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 775-833. (Soil Science Society of America Book Series, 5).

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 2, p. 195-276, 2002.

TRASAR-CEPEDA, C.; LEIRÓS, C.; GIL-SOTRES, F.; SEOANE, S. Towards a biochemical quality index for soils: an expression relating several biological and biochemical properties. **Biology and Fertility of Soils**, v. 26, n. 2, p. 100-106, Dec. 1997.

WALLENIUS, K.; RITA, H.; SIMPANEN, S.; MIKKONEN, A.; NIEMI, R. M. Sample storage for soil enzyme activity and bacterial community profiles. **Journal of Microbiological Methods**, v. 81, n. 1, p. 48-55, Apr. 2010.

WARDLE, D. A. Metodologia para quantificação da biomassa microbiana do solo. In: HUNGRIA, M.; ARAUJO, R. S. (Ed.). **Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola**. Brasília, DF: Embrapa-SPI, 1994. p. 419-436. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 46).

ZORNOZA, R.; GUERRERO, C.; MATAIX-SOLERA, J.; ARCENEGUI, V.; GARCÍA-ORENES, F.; MATAIX-BENEYTO, J. Assessing air-drying and rewetting pre-treatment effect on some enzyme activities under Mediterranean conditions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 8, p. 2125-2134, Aug. 2006.

---

Trabalho recebido em 22 de junho de 2015 e aceito em 21 de setembro de 2015