



## BIOANÁLISE DE SOLO: A MAIS NOVA ALIADA PARA A SUSTENTABILIDADE AGRÍCOLA

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

*Ozanival Dario Dantas<sup>3</sup>*  
*Maria Inês Lopes de Oliveira<sup>4</sup>*  
*André Alves de Castro Lopes<sup>5</sup>*  
*Leandro Moraes de Souza<sup>6</sup>*

### 1. INTRODUÇÃO

Os processos biológicos são a base da saúde do solo e, se bem manejados, podem reverter os processos de degradação do solo que atualmente ocorrem em escala mundial (LEHMAN et al., 2015). De fato, a importância do componente biológico do solo para a manutenção de lavouras saudáveis, resilientes e sustentáveis, que possam fornecer alimentos, em quantidade e qualidade, para uma população mundial crescente, tem sido cada vez mais percebida pelos produtores.

Um solo saudável é um solo biologicamente ativo, produtivo, capaz de armazenar água, sequestrar carbono e promover a degradação de pesticidas, entre outros importantes serviços ambientais. No caso específico do Brasil, a expansão e uso continuado de sistemas de manejo conservacionistas, como o sistema de plantio direto (SPD) e a integração lavoura pecuária (ILP), com destaque para a inserção das braquiárias e outras gramíneas forrageiras nos sistemas agrícolas tropicais, foi um marco fundamental para a construção de um ambiente edáfico biologicamente mais ativo e saudável. A integração de pastagens e florestas às áreas sob cultivos de grãos em

**Abreviações:** BioAS = Tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo; CBM = carbono da biomassa microbiana; IAA = indicadores agroambientais; ILP = integração lavoura-pecuária; ILPF = integração lavoura-pecuária-floresta; IQS = índice de qualidade de solo; IQS<sub>biológico</sub> = índice de qualidade biológica do solo; IQS<sub>químico</sub> = índice de qualidade química do solo; MO = matéria orgânica; MIQS = Módulo interpretação da qualidade do solo; OCDE = Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico; RCS = rotação de culturas na soja; RRA = rendimento relativo acumulado; SPC = Sistema de preparo convencional; SPD = sistema de plantio direto.

<sup>1</sup> Engenheiro Agrônomo, Embrapa Cerrados, Planaltina, DF; emails: [ieda.mendes@embrapa.br](mailto:ieda.mendes@embrapa.br), [djalma.sousa@embrapa.br](mailto:djalma.sousa@embrapa.br), [fabio.reis@embrapa.br](mailto:fabio.reis@embrapa.br)

<sup>2</sup> Engenheiro Agrônomo, Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ; e-mail: [guilherme.chaer@embrapa.br](mailto:guilherme.chaer@embrapa.br)

<sup>3</sup> Analista, Embrapa Cerrados.

<sup>4</sup> Bolsista Pós-Doc, Embrapa Cerrados.

<sup>5</sup> Engenheiro Agrônomo, Secretaria do Meio Ambiente de Formosa, GO; email: [andrealvesagronomo@yahoo.com.br](mailto:andrealvesagronomo@yahoo.com.br)

<sup>6</sup> Engenheiro Agrônomo, EMATER, DF; email: [leandro.souza@emater.df.gov.br](mailto:leandro.souza@emater.df.gov.br)

### NUTRIÇÃO DE PLANTAS CIÊNCIA E TECNOLOGIA (NPCT)

Avenida Independência, nº 350, Edifício Primus Center, sala 141-A - Fone/Fax: (19) 3433-3254 - CEP 13419-160 - Piracicaba-SP, Brasil  
Website: [www.npct.com.br](http://www.npct.com.br) E-mail: [Etoledo@npct.com.br](mailto:Etoledo@npct.com.br) Twitter: [@NPCTBrasil](https://twitter.com/NPCTBrasil) Facebook: NPCTBrasil Instagram: NPCTBrasil

## INFORMAÇÕES AGRONÔMICAS

ISSN 2311-5904

Publicação trimestral da  
NPCT – Nutrição de Plantas Ciência e Tecnologia

O jornal publica artigos técnico-científicos elaborados pela comunidade científica nacional e internacional visando o manejo responsável dos nutrientes das plantas.

### COMISSÃO EDITORIAL

#### Editor

Luís Ignácio Prochnow

#### Editora Assistente

Silvia Regina Stipp

#### Gerente de Distribuição

Evandro Luis Lavorenti

### ASSINATURAS

As assinaturas podem ser realizadas no site da NPCT: <http://www.npct.com.br>

### PATROCÍNIO

Os interessados em patrocinar o Jornal Informações Agronômicas podem entrar em contato com: [ELavorenti@npct.com.br](mailto:ELavorenti@npct.com.br) ou [LProchnow@npct.com.br](mailto:LProchnow@npct.com.br)

Nº 8 DEZEMBRO/2020

## CONTEÚDO

### Bioanálise de solo: a mais nova aliada para a produtividade agrícola

*Iêda Carvalho Mendes, Guilherme Montandon Chaer, Djalma Martinhão Gomes de Sousa, Fábio Bueno dos Reis Junior, Ozanival Dario Dantas, Maria Inês Lopes de Oliveira, André Alves de Castro Lopes, Leandro Moraes de Souza*..... 1

### A queda na produtividade da cana-de-açúcar após a safra de 2010

*José Luiz Ioriatti Demattê* ..... 12

### Aplicação foliar de suspensões concentradas e fontes pouco solúveis microparticuladas

*Rodrigo Marcelli Boaretto, Luiza Oliveira Macedo, José Antonio Quaggio, Dirceu Mattos-Jr.* ..... 23

**Divulgando a Pesquisa** ..... 30

**Painel Agrônomico** ..... 31

**Cursos, Simpósios e outros Eventos** ..... 33

**Publicações Recentes** ..... 34

**Publicação do IPNI/NPCT** ..... 35

**Ponto de Vista** ..... 36

### NOTA DOS EDITORES

As opiniões e as conclusões expressas pelos autores nos artigos não refletem necessariamente as mesmas dos editores deste jornal.

## PATROCINADORES

 *Compass Minerals*  
Plant Nutrition

  
**FERTCROSS**  
leverage

  
**Fortgreen**

FERTILIZANTES

  
**HERINGER**

  
**HINOVE**  
AGROCIÊNCIA

  
**jacto**

  
**kimberlit**  
agrociências

  
**KOCH**  
AGRONOMIC SERVICES

  
**Mosaic**  
Fertilizantes

LABORATÓRIO AGROPECUÁRIO  
  
**Plante Certo**  
"A Certeza de Plantio Certo"

  
**Stoller**

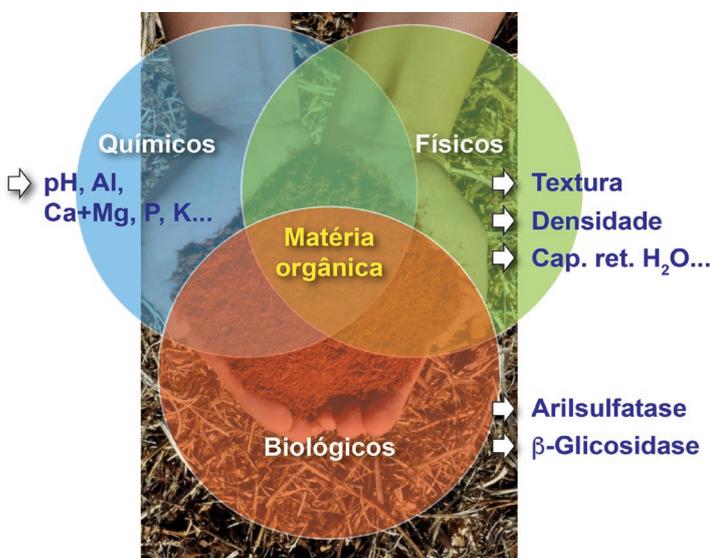
  
**UPL**  
OpenAg™

  
**VITTIA**  
GRUPO

  
**YARA**

Knowledge grows

semeadura direta aumentou a complexidade dos agroecossistemas tropicais e alterou as relações entre os vários componentes do sistema agrícola. A expansão e a adoção por longos períodos de sistemas de manejo conservacionistas, como o SPD e a ILP, também permitiu verificar que os aumentos de produtividade das culturas ou a manutenção da produção frente a situações ambientais adversas muitas vezes não são explicados pelos resultados das análises químicas de solos (DRINKWATER; SNAPP, 2007; NICOLODI et al., 2008; MENDES et al., 2017, 2020). Essa constatação de que solos quimicamente semelhantes podem apresentar desempenhos diferenciados, demonstrou a necessidade da inclusão de parâmetros relacionados ao funcionamento biológico do solo (bioindicadores) nas análises de rotina (Figura 1).

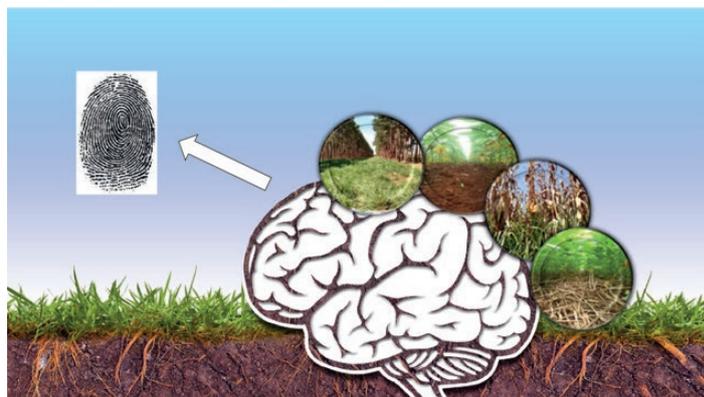


**Figura 1.** A Tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo (BioAS), que consiste na agregação de dois indicadores relacionados ao funcionamento da maquinaria biológica do solo (enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase) às análises de rotina, preencheu a lacuna deixada pela ausência do componente biológico nas análises de solo.

A Tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo (BioAS) consiste na agregação de parâmetros relacionados ao funcionamento da “maquinaria” biológica do solo às análises químicas tradicionais de rotina (pH, H + Al, P, Ca, K, Mg, etc.). Nos últimos 20 anos, o grupo de pesquisa com Bioindicadores de Qualidade de Solo da Embrapa dedicou-se à seleção de bioindicadores robustos, que permitissem que o agricultor brasileiro pudesse monitorar a saúde de seu solo, sabendo exatamente o que avaliar, porque avaliar, como avaliar, quando avaliar e, principalmente, como interpretar o que foi avaliado (MENDES et al., 2019a). Como resultado desses estudos, duas enzimas presentes no solo, a arilsulfatase e a  $\beta$ -glicosidase (associadas aos ciclos do enxofre e do carbono), foram selecionadas e tabelas de interpretação foram desenvolvidas.

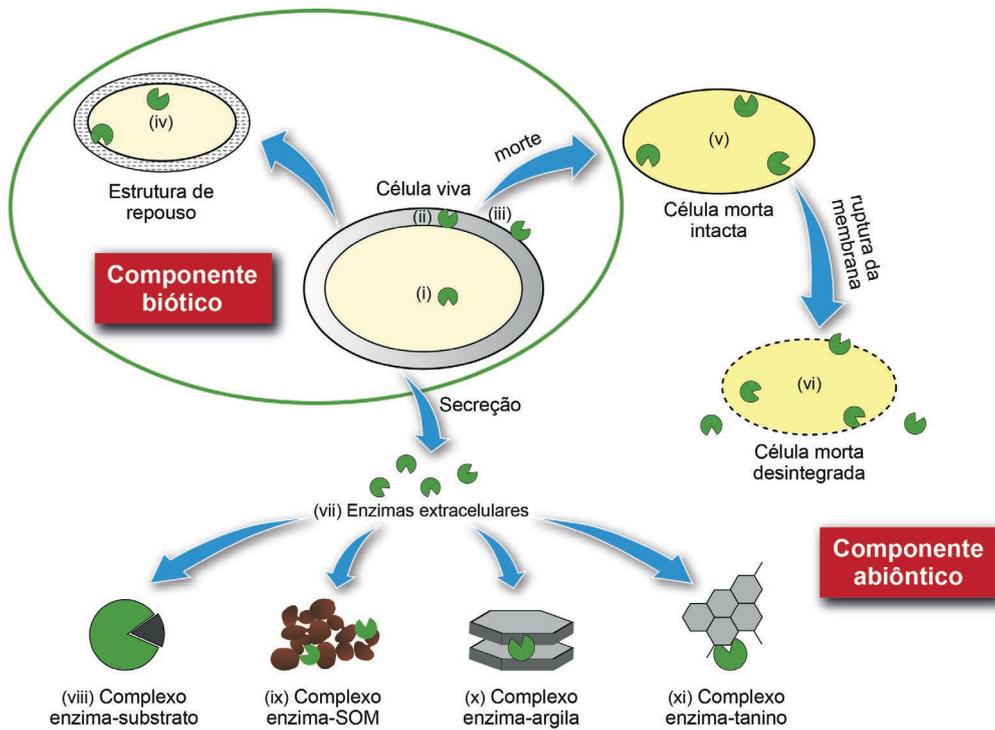
## 2. COMO ACESSAR A MEMÓRIA DO SOLO E AVALIAR SUA SAÚDE

O grau de revolvimento mecânico, juntamente com a qualidade e a quantidade do resíduo vegetal que é aportado ao solo, ao interferirem nas interações dos diversos componentes dos sistemas agrícolas, fazem com que os diferentes sistemas de manejo deixem sua impressão digital, sua assinatura biológica, no solo (Figura 2). A capacidade que o solo tem de guardar em sua “memória” o tipo de manejo ao qual ele é submetido está intimamente relacionada à sua parte viva, ao seu componente biológico. Assim, além dos aspectos relacionados à saúde do solo, as determinações de atividade enzimática são uma das vias de acesso à memória do solo.



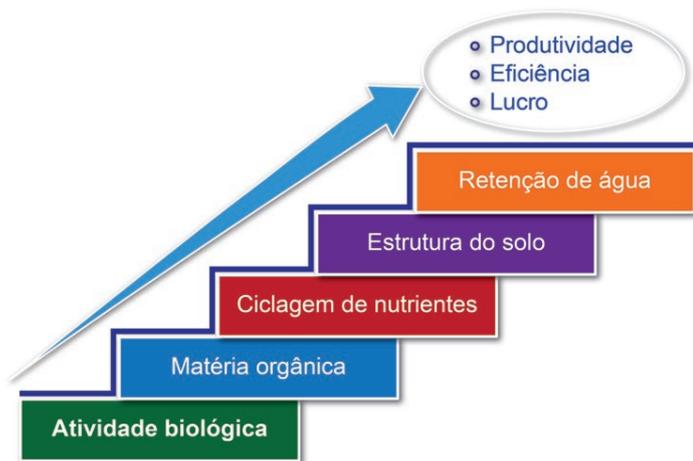
**Figura 2.** Os sistemas de manejo deixam suas marcas na “memória” do solo.

O acesso à memória do solo, por meio de determinações da atividade enzimática, é possível devido ao fato de que a atividade enzimática de um solo é o somatório da atividade de enzimas dos organismos vivos (microrganismos, plantas e animais) e de gerações passadas de organismos que estiveram presentes no solo (componente abiótico). As enzimas abióticas estão associadas à fração não-viva e se acumulam no solo protegidas da ação de proteases por meio de sua adsorção em partículas de argila e na matéria orgânica (Figura 3) (WALLENSTEIN; BURNS, 2011). A capacidade do solo de estabilizar e proteger enzimas está relacionada à sua capacidade de armazenar e estabilizar a matéria orgânica (MO) – afinal a enzima é uma molécula orgânica – e outras propriedades estruturais associadas, como agregação e porosidade. Entretanto, alterações na MO ou nas propriedades estruturais do solo podem levar anos para serem detectadas, diferentemente da atividade enzimática (BANDICK; DICK, 1999; DICK; BURNS, 2011). Por essa razão, o aumento da atividade enzimática, refletindo o aumento na atividade biológica, ao longo do tempo, pode ser um prenúncio de que o sistema está favorecendo o acúmulo de matéria orgânica do solo (MOS), apesar de nem sempre esse aumento de atividade estar vinculado, nos estádios iniciais, a aumentos efetivos nos teores de MOS. A Figura 4 ilustra essa teoria, na qual,



**Figura 3.** Esquema ilustrativo da localização das enzimas nos compartimentos solo (SOM = matéria orgânica do solo).  
**Fonte:** Adaptada de Wallenstein e Burns (2011).

na escalada da melhoria de um solo, o aumento na atividade biológica, evidenciado pela atividade enzimática, constitui o primeiro degrau na escala de melhoria de um solo.



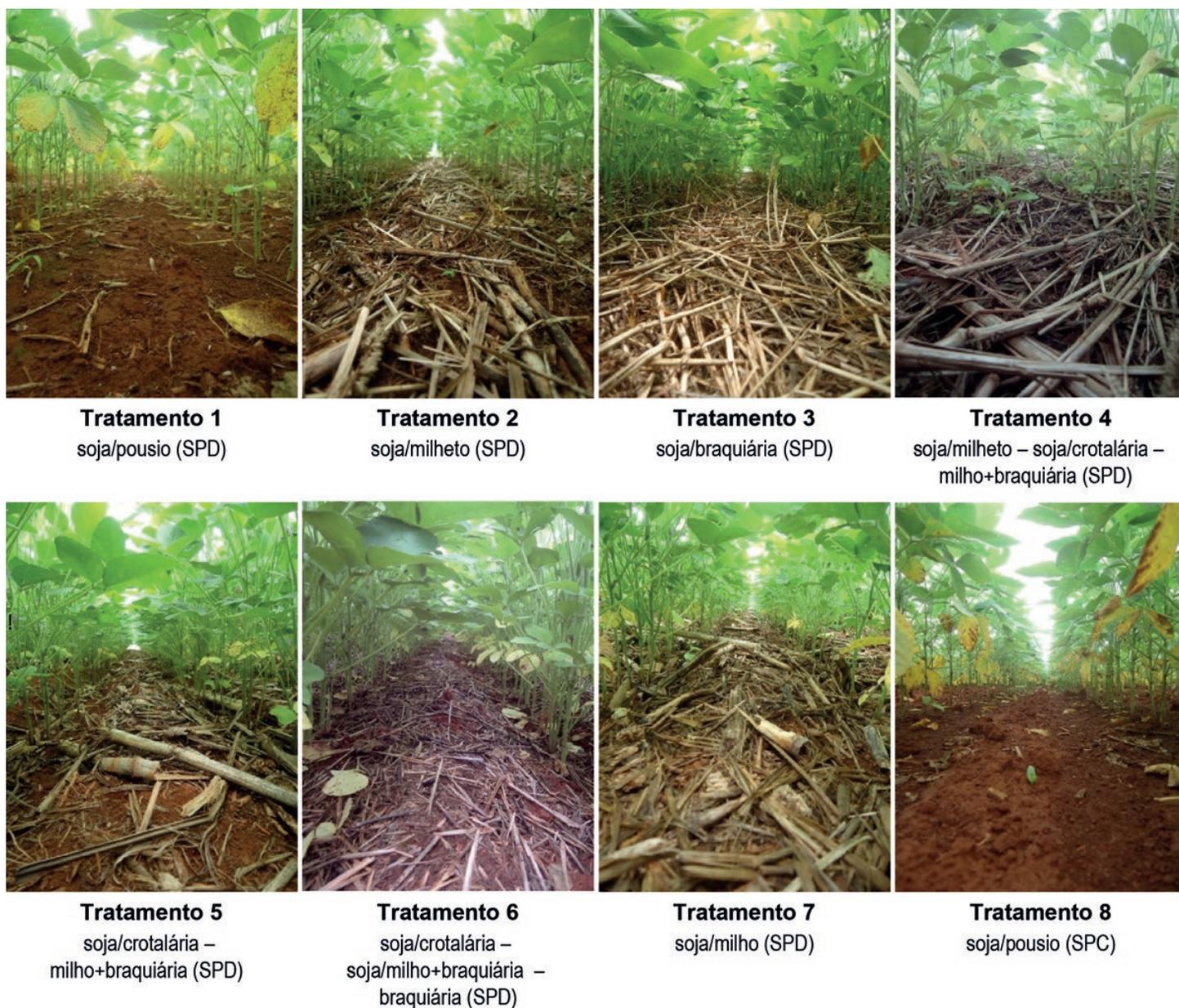
**Figura 4.** Fluxograma demonstrando que, em função do aumento no aporte de resíduos vegetais ao solo, o aumento na atividade biológica é o primeiro degrau na escalada da melhoria de um solo.

**Fonte:** Adaptada de Hatfield et al. (2017).

Um exemplo emblemático de como o histórico de uso do solo expressa a sua saúde atual é o do experimento de rotação de culturas na soja (RCS), conduzido desde 2008 pela Fundação MT, na estação experimental Cachoeira, em Itiquira, MT. Nesse experimento são avaliados oito sistemas de cultivos/produção incluindo o monocultivo, a sucessão

e a rotação de culturas (MENDES et al., 2017, 2020). Na Figura 5 é possível visualizar as diferenças entre os tratamentos, com base na cobertura do solo pelos resíduos vegetais, no oitavo cultivo de soja.

Até a safra 2013/2014, as diferenças nas produtividades da soja entre os vários tratamentos não foram muito acentuadas. A produtividade média do monocultivo de soja sob sistema de preparo convencional foi de 61 sc ha<sup>-1</sup> e não diferiu significativamente dos demais tratamentos (MENDES et al., 2017). No entanto, no sétimo ciclo de cultivo (2014/2015), com o uso de uma cultivar superprecoce (TMG 7262 RR), cujo ciclo foi de 98 dias, a ocorrência de um veranico em janeiro de 2015 possibilitou evidenciar, pela primeira vez, o início do declínio dos tratamentos com monocultivo de soja. A Figura 6 ilustra o aspecto geral da soja no tratamento 1 (soja/pousio) e no tratamento 3, no qual a cultura é inserida em um esquema de sucessão com a braquiária (*Urochloa ruziziensis*) durante o veranico de janeiro de 2015. No tratamento com soja/pousio, a produtividade de grãos foi de 29 sc ha<sup>-1</sup>, enquanto no tratamento soja/braquiária, a produtividade de grãos foi de 59 sc ha<sup>-1</sup>, ou seja, uma diferença de 30 sc ha<sup>-1</sup> entre os dois tratamentos. Entretanto, apesar da diferença significativa na produtividade de grãos, as características químicas dos solos na camada de 0-10 cm desses tratamentos foram semelhantes (Tabela 1). A única exceção foi a MOS, cujo teor no tratamento com braquiária foi 50% maior que no tratamento soja/pousio. A semelhança entre as características químicas do solo nos dois tratamentos mostra a insuficiência do conceito mineralista, baseado apenas nos teores absolutos



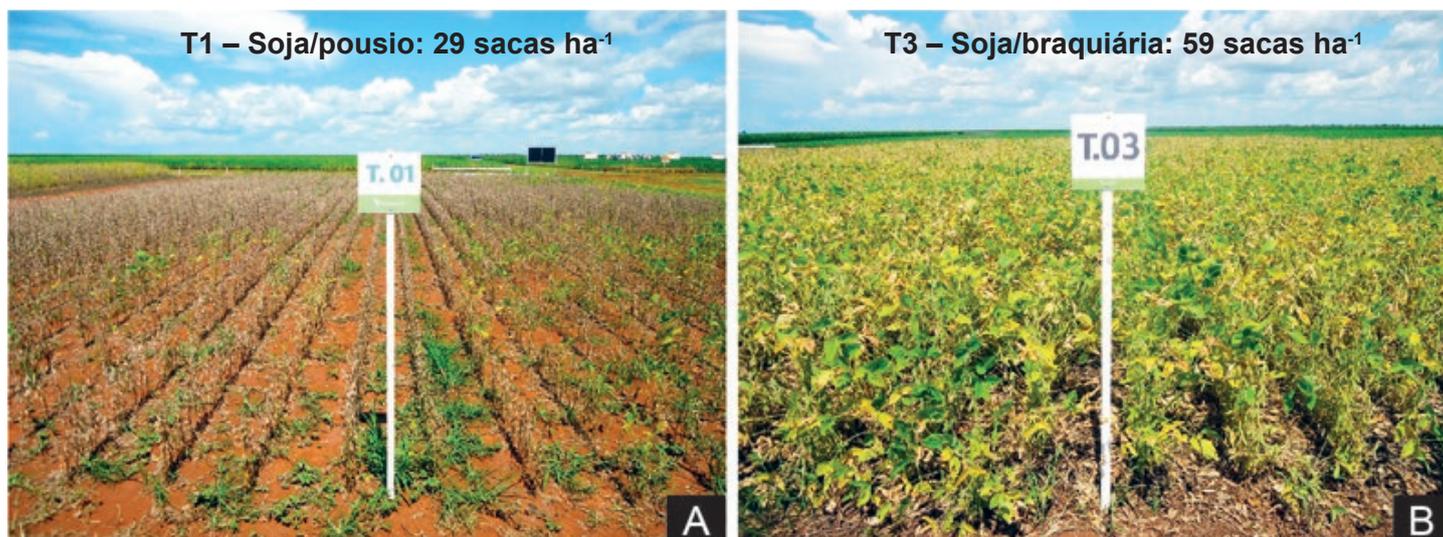
**Figura 5.** Aspecto visual da cobertura do solo nos tratamentos do experimento de rotação de culturas na soja, em Itiquira, MT (SPD = Sistema de plantio direto; SPC = Sistema de preparo convencional).

**Crédito das fotos:** FUNDAÇÃO MT (safra 2015/2016).

dos nutrientes no solo (veja NICOLODI et al., 2008), para explicar resultados como esses. Áreas com teores semelhantes de nutrientes, mas com produtividades de grãos distintas, evidenciam a importância do componente biológico do solo.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de atividade enzimática para os dois tratamentos mencionados anteriormente (soja/pousio e soja/braquiária, ambos em SPD), determinados na safra 2015/2016. As amostras de solo foram coletadas na fase de florescimento da soja (dezembro de 2015) e analisadas no laboratório de Microbiologia do Solo da Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF. Observa-se que, em relação ao tratamento com monocultivo de soja em PD, o tratamento soja/braquiária apresentou 4 e 8 vezes mais atividade de  $\beta$ -glicosidase e de arilsulfatase, respectivamente.

Esses resultados mostram que, embora as duas áreas apresentassem características químicas semelhantes, o componente biológico era completamente distinto. O solo biologicamente mais ativo, decorrente da inserção da braquiária no sistema de produção, foi também o mais produtivo. No caso em questão, a estabilidade produtiva do sistema de sucessão de culturas foi mantida pelo aporte de palhada proveniente do uso da braquiária e pelos seus benefícios ao longo do tempo, enquanto no tratamento sob monocultivo a ausência de palhada na superfície culminou em visível perda de vigor da soja. Esses dados também demonstram que o solo sob sistema de rotação com braquiária foi mais tampicante, estável e resiliente, ou seja, suportou melhor uma situação de estresse, quando comparado ao solo com monocultivo.



**Figura 6.** Aspecto visual do desenvolvimento da soja (cv. TMG 7262 RR) no veranico da safra 2014/2015, após sete safras consecutivas de monocultivo (A) e em sucessão com braquiária (B) sob SPD, em Itiquira, MT.

**Crédito das fotos:** Claudinei Kappes.

**Tabela 1.** Propriedades químicas do solo<sup>1</sup> na camada de 0 a 10 cm nos tratamentos com soja/pousio e soja/braquiária do experimento de rotação de culturas na soja, realizado em Itiquira, MT (safra 2015/2016).

Tratamento	MOS (g kg <sup>-1</sup> )	pH H <sub>2</sub> O	Al ----- (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	H + Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Ca -----	Mg -----	P --- (mg dm <sup>-3</sup> ) ---	K ---
Soja/pousio	28,2	6,3	0,0	3,0	3,8	2,2	15	131
Soja/braquiária	42,3	6,4	0,0	2,5	4,4	3,1	16	151

<sup>1</sup> MOS = matéria orgânica do solo (Walkley e Black); H + Al (acetato de cálcio a pH 7,0); Ca, Mg e Al (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>); P e K (Mehlich-1).

**Tabela 2.** Resultado da atividade da β-glicosidase e da arilsulfatase na camada de 0 a 10 cm, nos tratamentos com soja/pousio e soja/braquiária sob SPD, do experimento de rotação de culturas na soja realizado em Itiquira, MT (safra 2015/2016).

Atributo microbiológico	Soja/pousio	Soja/braquiária	Diferença
	----- (mg de p-nitrofenol/kg de solo/h) -----		
β-glicosidase	64	233	4 vezes
Arilsulfatase	28	223	8 vezes

Considerando que esse experimento foi iniciado na safra 2008/2009, a bioanálise do solo realizada em 2015 evidenciou a sensibilidade dos bioindicadores arilsulfatase e β-glicosidase para detectar mudanças nos sistemas de manejo, com diferenças bem mais acentuadas que as observadas nos teores de MOS. Entretanto, mais do que isso, esses resultados demonstram claramente a capacidade da atividade enzimática de acessar a memória do solo, evidenciando aspectos de saúde do solo que passavam despercebidos nas análises químicas de rotina.

### 3. TECNOLOGIA EMBRAPA BioAS

A tecnologia BioAS, lançada em julho de 2020, consiste na análise e interpretação das atividades da β-glicosidase e da arilsulfatase, permitindo acessar o funcionamento da

maquinaria biológica do solo complementarmente às análises tradicionais de fertilidade do solo. A BioAS permite que o agricultor monitore a saúde de seu solo, sabendo exatamente o que avaliar (enzimas arilsulfatase e β-glicosidase), como avaliar (solo coletado na profundidade de 0-10 cm), quando avaliar (após a colheita das lavouras) e como interpretar o que foi avaliado (via valores de referência que possibilitam aferir, para cada tipo de solo, se o nível de atividade enzimática está baixo, médio ou adequado). Em seu estágio atual, a tecnologia BioAS está formatada para atender as áreas sob cultivos anuais de grãos no Cerrado, abrangendo uma área em torno de 35 milhões de hectares.

O uso da BioAS em escala comercial, a partir de julho de 2020 (<https://youtu.be/IBJYc30aFas>), é uma inovação pioneira no mundo, alinhada ao objetivo de viabilizar tecnologias

que promovam a sustentabilidade das atividades agrícolas com o equilíbrio ambiental. Para isso, a Embrapa está capacitando uma rede de laboratórios comerciais de análise de solo na realização das análises das enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase. Os resultados das análises são encaminhados à Embrapa para a interpretação dos valores a partir de algoritmos desenvolvidos para diferentes tipos de solo. O laudo gerado é, então, repassado ao laboratório, que o encaminha ao seu cliente.

O motivo para a utilização das duas enzimas como indicadoras do funcionamento da maquinaria biológica do solo deve-se ao fato de que nem sempre as alterações nas propriedades químicas, em particular nos teores de MOS, são capazes de expressar as modificações que ocorrem no solo decorrentes da adoção de sistemas de manejo conservacionistas, como o SPD, a ILP e a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Conforme evidenciado nos dados do experimento de RCS da Fundação MT, muitas vezes, áreas com características químicas semelhantes apresentam características biológicas completamente distintas (MENDES et al., 2018, 2019a).

Além da seleção dos bioindicadores mais adequados, um outro grande desafio que precisava ser transposto no uso desses parâmetros para avaliações da saúde do solo era a dificuldade de interpretação dos seus valores individuais. Diferentemente do que ocorre com os indicadores químicos de fertilidade, cujos níveis de suficiência (baixo, médio, adequado e alto) já estão relativamente bem definidos para cada nutriente e tipo de solo (sempre levando em consideração características como: textura, teor de MOS, etc.), até recentemente era difícil medir e interpretar os bioindicadores, independentemente de um controle ou referencial de comparação.

Visando auxiliar na interpretação individual dos bioindicadores, foi elaborada uma estratégia para interpretação desses parâmetros utilizando os princípios dos ensaios de calibração de nutrientes (LOPES et al., 2013, 2018; MENDES et al. 2019b). A proposta foi fundamentada nas relações dos bioindicadores 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:  $\leq 40\%$  do RRA: baixo, de 41% a 80% do RRA: moderado, e  $> 80\%$  do RRA: adequado.

De forma análoga às tabelas de teores de nutrientes no solo, além de estabelecer os valores de referência para os bioindicadores, o objetivo das tabelas de interpretação é o de fornecer informações sobre a eficácia dos sistemas de produção e/ou práticas de uso da terra e de seus impactos sobre a saúde do solo. Assim, a BioAS pode ser utilizada como suporte para tomadas de decisão sobre o manejo do solo na propriedade agrícola. Por exemplo, um valor de teste “baixo” para os bioindicadores pode ser uma indicação de que práticas de manejo inadequadas estejam sendo utilizadas pelo agricultor. Para cada bioindicador, os limites críticos também

podem ser entendidos como os valores desejáveis que devem ser mantidos para o desempenho normal do solo. Seguindo esse raciocínio, a BioAS pode ser utilizada como instrumento para alertar agricultores que utilizam sistemas de manejo que degradam o solo, despertando o desejo de mudar esse tipo de manejo por meio da adoção de práticas conservacionistas. Esse alerta é reforçado quando se demonstra que a negligência com a maquinaria biológica do solo, cedo ou tarde, resulta em expressivas perdas de produtividade. Da mesma forma, a BioAS serve como um incentivo e estímulo a agricultores que já adotam sistemas de manejo conservacionistas, já que muitas vezes os aumentos de matéria orgânica, principalmente nos solos tropicais argilosos, levam mais tempo para serem observados e, geralmente, não são muito expressivos.

As primeiras tabelas de interpretação dos bioindicadores (LOPES et al., 2013) foram desenvolvidas a partir de amostras de solo coletadas na fase de florescimento das culturas (na metade no período chuvoso), mantidas com a umidade natural do solo e rapidamente transportadas e processadas em laboratório. Porém, essa época coincide com um período de elevada demanda de trabalhos na lavoura e com a cultura estabelecida em máximo desenvolvimento, o que, na prática, dificulta a coleta e o envio dessas amostras para o laboratório (MENDES et al., 2015). Para que o produtor pudesse unificar as amostragens microbiológicas e de fertilidade e para que os laboratórios comerciais de análises de solo pudessem unificar os processos de preparação das amostras (secagem à temperatura ambiente e peneiramento), foi desenvolvido, na Fase III do Projeto Bioindicadores, o conceito de amostra de solo FERTBIO, para fertilidade química e biológica do solo (MENDES et al., 2019b). Esse conceito propõe a unificação da época de amostragem de solo para as análises químicas e biológicas (ambas realizadas na fase de pós-colheita) e também dos procedimentos de pré-tratamento das amostras (com secagem do solo ao ar antes da realização das análises de laboratório).

#### 4. PORQUE A ARILSULFATASE E A $\beta$ -GLICOSIDASE?

Em todos os experimentos/fazendas avaliados, as enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase, em conjunto ou separadamente, foram as indicadoras que consistentemente apresentaram maior sensibilidade para detectar alterações no solo, em função do sistema de manejo utilizado (MENDES et al., 2019a). Essas duas enzimas apresentam uma estreita relação com a MOS – parâmetro base da qualidade de um solo – e com o rendimento de grãos – parâmetro que reflete o aspecto econômico das lavouras – que são fundamentais para a sustentabilidade do negócio agrícola (LOPES et al., 2013, 2018; MENDES et al., 2019a).

Outras características que tornam vantajosa a utilização da arilsulfatase e da  $\beta$ -glicosidase são: precisão, coerência, sensibilidade, simples determinação analítica e reprodutibilidade. Além disso, as duas enzimas são

relacionadas à ciclagem da MOS, não são influenciadas pela aplicação de adubos e calcário e se adequam ao conceito Fertbio de amostragem de solo (MENDES et al., 2019b). Essas enzimas também são correlacionadas com vários outros atributos microbiológicos (carbono da biomassa microbiana, respiração basal, fosfatase ácida, celulase, desidrogenase), o que permitiu a seleção de apenas dois indicadores para expressar o funcionamento da maquinaria biológica dos solos.

A título de comparação, o programa CASH de monitoramento da saúde do solo da Universidade de Cornell (EUA) selecionou três indicadores obrigatórios (proteínas do solo, respiração basal e carbono ativo) e dois optativos (nível de pressão de doenças nas raízes e nitrogênio potencialmente mineralizável) como indicadores biológicos para avaliar a saúde do solo, cujos níveis foram interpretados com base em distribuições estatísticas (MOEBIUS-CLUNE et al., 2016). Na Holanda, foram utilizados 12 indicadores biológicos, os quais são interpretados com base em valores obtidos em áreas de referência (RUTGERS et al., 2012). Assim, verifica-se que o uso da BioAS coloca o Brasil na vanguarda mundial da tecnologia dos bioindicadores, ao possibilitar a inclusão de métricas, cuja interpretação foi definida com base no rendimento das lavouras e na MOS, para atestar o crescimento agrícola com sustentabilidade.

Conforme ilustrado na Figura 3, a atividade enzimática total de um solo é o somatório da atividade enzimática dos organismos vivos (plantas, microrganismos e animais) e das enzimas abiônicas – enzimas associadas à fração não viva, que se acumulam no solo, protegidas da ação de proteases por meio de sua adsorção às partículas de argila e à matéria orgânica (WALLENSTEIN; BURNS, 2011). Isso confere ao método BioAS vantagens importantes, como: a) as enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase são parâmetros **integradores** relacionados a todos os componentes biológicos do solo (plantas, animais e microrganismos), e b) por não estarem associadas somente ao componente vivo, podendo ser adsorvidas em partículas de argila e na matéria orgânica, funcionam como “impressões digitais” dos sistemas de manejo aos quais o solo foi submetido, permitindo, dessa forma, acessar o que ilustrativamente definimos como memória do solo (MENDES et al., 2019a).

Outra vantagem da tecnologia BioAS é que ela pode ser facilmente implementada na rotina dos laboratórios comerciais, pois é fundamentada em procedimentos analíticos simples e dispensa investimentos elevados em equipamentos.

## 5. O LAUDO DA BioAS: UM NOVO OLHAR SOBRE AS ANÁLISES DE SOLO

Ao agregar parâmetros capazes de detectar, com maior antecedência, alterações que ocorrem no solo decorrentes do seu uso e manejo, a BioAS abre uma nova perspectiva para a utilização das análises de solo como suporte para tomadas de decisão de manejo nas áreas agrícolas.

Outra inovação importante atrelada ao uso da BioAS, desenvolvida na Fase III do Projeto Bioindicadores de Qualidade de Solo, foi a criação de um índice para avaliar a qualidade dos solos ( $IQS_{\text{FERTBIO}}$ ) com base nas determinações dos atributos de fertilidade química (pH, H + Al, Ca, K, P, Mg e MOS) e dos teores das enzimas arilsulfatase e  $\beta$ -glicosidase. Esse índice integra os resultados da Tecnologia BioAS e da fertilidade do solo, gerando uma nota (0 a 1), que expressa a qualidade/saúde do solo. O  $IQS_{\text{FERTBIO}}$  pode ser decomposto em dois subíndices: o índice de qualidade química do solo ( $IQS_{\text{químico}}$ ) e o índice de qualidade biológica do solo ( $IQS_{\text{biológico}}$ ). A subdivisão do IQS-Fertbio nesses dois subíndices representa um grande avanço, pois vários estudos têm evidenciado que áreas que apresentam  $IQS_{\text{químico}}$  alto/muito alto não apresentam necessariamente  $IQS_{\text{biológico}}$  satisfatório.

Apesar do grande interesse mundial no desempenho ambiental da agricultura, não existem metodologias de medição amplamente aceitas que possam ser adotadas em escalas global, nacional, estadual e dentro da fazenda (“on farm”) para avaliar esse desempenho. Várias agências reguladoras internacionais têm discutido os parâmetros a serem utilizados nas avaliações da qualidade do solo. A título de exemplo, o comitê técnico internacional ISO 190, “Qualidade do Solo”, propôs uma lista de 35 parâmetros – 17 químicos, 11 físicos e 7 biológicos – como potenciais indicadores de qualidade do solo; a US Environmental Protection Agency (EPA) propôs uma lista de 1.800 parâmetros como indicadores de qualidade química do solo (BURNS et al., 2006), enquanto a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) definiu 62 indicadores agroambientais (IAAs), abrangendo 11 grandes temas (OECD, 2013).

Como as condições de clima e ambiente, as particularidades agrícolas e as abordagens de pesquisa diferem entre os países, é pouco provável que exista, em um futuro próximo, uma solução única para mensurar os impactos ambientais da agricultura em nível mundial. Por essa razão, é fundamental que os formuladores de políticas públicas na área agroambiental do Brasil, por meio das instituições nacionais de pesquisa, tenham à sua disposição estudos consistentes, em nível nacional, que permitam um profundo conhecimento e embasamento sobre o melhor conjunto mínimo de IAAs para nortear a atividade agropecuária brasileira, visando o alcance dos melhores resultados ambientais, com melhor retorno econômico, possibilitando maior inserção da nossa agricultura na bioeconomia.

O cálculo do  $IQS_{\text{FERTBIO}}$  baseia-se no conceito proposto por Karlen e Stott (1994), o qual atribui ao solo três funções, sendo elas: (F1) a capacidade do solo de ciclar nutrientes; (F2) a capacidade do solo de armazenar nutrientes e (F3) a capacidade do solo de suprir nutrientes (MENDES et al., 2021). Os valores de  $IQS_{\text{FERTBIO}}$  e das funções variam de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 melhor o desempenho da função (índices das funções F1, F2 e F3) ou a qualidade

do solo ( $IQS_{\text{FERTBIO}}$ ). A F1 objetiva estimar o desempenho da atividade biológica e dos processos derivados dela direta ou indiretamente, como a ciclagem de nutrientes e a formação e decomposição da MOS. A F2 objetiva quantificar o “reservatório” de nutrientes do solo, o qual está principalmente relacionado à textura, à qualidade das argilas e ao conteúdo e qualidade da MOS. A F3 avalia a qualidade do conteúdo do “reservatório” de nutrientes do solo, envolvendo tanto aspectos relacionados à acidez do solo quanto a capacidade do solo de disponibilizar vários dos principais macronutrientes. O desempenho dessas três funções é mensurado pelos indicadores obtidos nas análises químicas e biológicas do solo, os quais são individualmente interpretados por meio de algoritmos definidos conforme a textura do solo (Figura 7).

Todos esses cálculos são realizados com a utilização do Módulo de Interpretação da Qualidade do Solo (MIQS) da tecnologia BioAS, desenvolvido pela Embrapa Cerrados em parceria com a Embrapa Agrobiologia. A comparação do laudo da BioAS com o laudo atual das análises de solo é apresentada na Figura 8, a qual demonstra que atingiu-se uma forma mais abrangente de entendimento dos nossos solos, indo muito além das questões de deficiência/excesso de nutrientes.

Atualmente, em muitas fazendas do Cerrado, as decisões de manejo do solo são influenciadas por aspectos operacionais e econômicos, em detrimento dos aspectos agrônomicos. Assim, a BioAS poderá se tornar um parâmetro para reforçar a importância da adoção de sistemas conservacionistas, melhoradores da qualidade de solo. Ao fornecer informações que normalmente passam despercebidas nas análises químicas de solo, a BioAS antecipa fenômenos que

podem impactar negativamente o desempenho econômico das lavouras, levando o tomador de decisão da propriedade rural a, pelo menos, refletir sobre o assunto. A presença de indicadores relacionados ao funcionamento da maquinaria biológica do solo nas análises comerciais de rotina representa um desafio para os agrônomos e técnicos do setor rural, pois exigirá, muitas vezes, uma reavaliação das práticas de manejo adotadas na propriedade agrícola.

Semelhante a um exame de sangue, no qual, por meio da determinação de vários parâmetros, podemos avaliar como está nosso estado de saúde, a BioAS serve para avaliar a saúde do solo. No exame de sangue, podemos detectar problemas assintomáticos de saúde em seres humanos – por exemplo, taxas elevadas de colesterol. De forma análoga, a BioAS detecta problemas assintomáticos de saúde de solo, antes que estes se revertam em perdas de produtividade nas lavouras. Assim, a BioAS serve para alertar sobre a necessidade da mudança de postura em relação ao manejo do solo. No caso de seres humanos com alterações em seu exame de sangue, essa mudança de postura vai desde o uso de medicamentos até a implementação de um programa de atividades físicas e de reavaliação de hábitos alimentares. No caso do solo, a adoção de sistemas de manejo e de práticas agrícolas, como o plantio direto (sem revolvimento do solo), a rotação de culturas, o uso de plantas de cobertura e a ILP, são o caminho natural para a obtenção de solos saudáveis, ou seja, biologicamente mais ativos e produtivos. Nossa expectativa é de que a BioAS contribua bastante nesse processo de mudança de postura.

## 6. PRÓXIMOS PASSOS

Para disponibilizar a BioAS para os produtores brasileiros, a Embrapa tem atuado na capacitação de laboratórios comerciais de análises de solo (Rede Embrapa de BioAS), os quais estão conectados aos laboratórios de pesquisa por meio da plataforma MIQS. Essa plataforma, além de fazer a interpretação dos resultados das análises enzimáticas, também calcula os índices de qualidade de solo (IQS) com bases nas propriedades químicas e biológicas.

O lançamento da tecnologia Embrapa BioAS ocorreu em julho de 2020 (<https://youtu.be/IBJYc30aFas>) e inaugura uma forma mais abrangente de avaliação da qualidade e saúde dos solos, indo além de questões relacionadas apenas à deficiência/excesso de nutrientes.

Na continuação desses estudos (Projeto Bioindicadores Fase IV), pretende-se consolidar as bases científicas já desenvolvidas para os cultivos anuais e

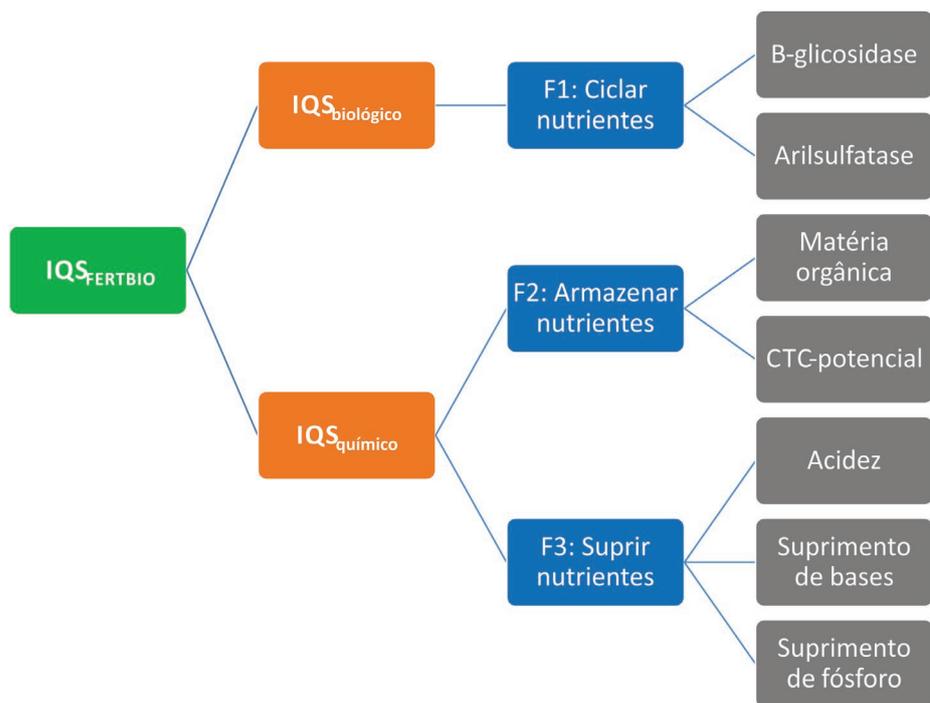


Figura 7. Representação esquemática do modelo utilizado para o cálculo do  $IQS_{\text{FERTBIO}}$ .

Análise química do solo										(A)
Amostra	pH em água	Al	Ca	H + Al	Mg	CTC	SB	P (Mehlich 1)	K	V
				----- (me/100 cc) -----			----- (mg L <sup>-1</sup> ) -----			%
1001 LV01 B.B	5,5	0,05	3,1	5,3	1,3	10	5	17	96	46
1002 09	5,6	0,01	7,7	2,6	4,0	15	12	39	114	82
1003 02/19 BC	5,1	0,08	2,8	5,6	0,9	9	4	14	55	40
1004 12	5,7	0,03	6,6	5,2	1,8	14	9	27	75	62
1005 20	6,2	0,02	5,9	4,0	0,9	11	7	10	92	64
LV 101	5,6	0,01	5,5	5,3	1,1	12	7	35	36	56
LV 102	5,7	0,02	4,0	5,1	1,1	10	5	18	54	51
LV 103	6,1	0,01	3,7	3,9	2,2	10	6	13	39	60
LV 104	5,5	0,02	2,1	3,5	0,6	6	3	22	35	44
LV 105	5,9	0,02	5,3	4,1	0,8	10	6	17	61	60

Laudo da BioAS										(B)
Amostra	ARIL	BETA	MOS	IQS FERTBIO	IQS biológico	IQS químico	Ciclagem de nutrientes	Armazenamento de nutrientes	Suprimento de nutrientes	
1001 LV01 B.B	161	165	34	0,73	0,70	0,75	0,70	0,59	0,91	
1002 09	219	151	45	0,72	0,71	0,72	0,71	0,61	0,83	
1003 02 19 BC	78	96	32	0,82	0,61	0,93	0,61	0,88	0,97	
1004 12	319	196	44	0,89	0,83	0,92	0,83	0,86	0,99	
1005 20	71	60	34	0,79	0,51	0,93	0,51	0,88	0,98	
LV 101	68	87	39	0,67	0,36	0,82	0,36	0,70	0,94	
LV 102	73	94	35	0,63	0,39	0,76	0,39	0,58	0,93	
LV 103	77	69	33	0,64	0,40	0,76	0,40	0,58	0,95	
LV 104	23	45	19	0,54	0,42	0,61	0,42	0,35	0,86	
LV 105	56	72	33	0,62	0,34	0,76	0,34	0,58	0,95	

**Figura 8.** Laudo Tradicional de Análise de química de solo de vários talhões de uma fazenda no MT (A) e laudo da BioAS dos mesmos locais gerado pela plataforma Módulo de Interpretação da Qualidade do Solo MIQS (B). No laudo da BioAS, os índices também são representados em um padrão cromático “semafórico”, onde verde escuro ou verde claro significam valores adequados, amarelo, valores intermediários, e laranja ou vermelho, valores inadequados.

expandir o uso da BioAS para novas culturas (cana-de-açúcar, café, pastagens e eucalipto). O objetivo é ampliar o monitoramento da saúde do solo dos agroecossistemas brasileiros, difundir a importância estratégica da sustentabilidade nas cadeias produtivas associadas (biocombustível, café, carne, grãos e silvicultura) e fomentar a utilização de sistemas de manejo conservacionistas, que otimizam o uso dos insumos e dos fatores de produção. A ampliação do uso da BioAS como parte das rotinas de análise de solo favorecerá a inserção do país na bioeconomia, fornecendo métricas para atestar o crescimento agrícola com sustentabilidade em um processo no qual todos saem ganhando: o agricultor, o país, a sociedade e o meio ambiente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o auxílio, por meio de bolsas e financiamento de projetos, à Embrapa (Projeto Bioindicadores - MP2), ao CNPq (Edital de Redes REPENSA, Processo: 562433/2010-4, Edital Universal Processo 404764/2016-9), à FAPDF (Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Distrito Federal, processos 193.000.079/2012 e 1355/2016) e ao MCTI/CNPq/CAPES/FAPS (INCT-MPCPAgro). Também agradecemos aos Drs. Leandro Zancanaro e Fabio Ono, da Fundação MT; aos funcionários atuais Clodoaldo A. de Sousa e Lucas F.L.S. Rolim, e aos aposentados Emílio J. Taveira, Maria das Dores Silva, Odete dos Santos e Vilderete Alves, do laboratório de Microbio-

logia do Solo; aos técnicos-agrícolas Osmar T. Oliveira e Valmir V. de Sousa; a todos os estudantes de graduação e pós-graduação e aos analistas de informática Samuel Santos, Lucas Magalhães e Daniela Duarte.

## REFERÊNCIAS

- BANDICK, A. K.; DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, p. 1471-9, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00051-6).
- BURNS, R. G.; NANNIPIERI, P.; BENEDETTI, A.; HOPKINS, D. W. Defining soil quality. In: BLOEM, J.; HOPKINS, D. W.; BENEDETTI, A. (Ed.). **Microbiological methods for evaluating soil quality**. Cambridge: CABI Publishing, 2006. p. 23-49.
- DICK, R. P.; BURNS, R. G. A brief history of soil enzyme research. In: DICK, R. P. (Ed.). **Methods of soil enzymology**. Madison: Soil Science Society of America, 2011. p. 1-19.
- DRINKWATER, L. E.; SNAPP, S. S. Nutrients in agroecosystems: re-thinking the management paradigm. **Advances in Agronomy**, v. 92, p. 163-186, 2007. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)92003-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)92003-2).
- HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J.; CRUSE, R. M. Soil: The forgotten piece of the water, food, energy nexus. **Advances in Agronomy**, v. 143, p. 1-46, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.02.001>.
- 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. R.; STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 53-72. (Special Publication, 35). DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c4>.
- LEHMAN, R. M.; CAMBARDELLA, C. A.; STOTT, D. E.; ACOSTA-MARTINEZ, V.; MANTER, D. K.; BUYER, J. S.; MAUL, J. E.; SMITH, J. L.; COLLINS, H. P.; HALVORSON, J. J.; KREMER, R. J.; LUNDGREN, J. G.; DUCEY, T. F.; JIN, V. L.; KARLEN, D. L. Understanding and enhancing soil biological health: The solution for reversing soil degradation. **Sustainability**, v. 7, n. 1, p. 988-1027, 2015.
- LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B.; GOEDERT, W. J.; MENDES I. C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America**, v. 77, p. 461-472, 2013.
- LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; dos REIS, F. B.; FIGUEIREDO, C. C.; MALAQUIAS, J. V.; SOUZA, L. M.; MENDES, I. C. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 12, p. 72-82, 2018.
- MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, v. 32, p. 191-209, 2015.
- MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; LOPES, A. A. C. Indicadores de qualidade biológica para manejo sustentável de solos arenosos. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. 20-25, 2018.
- MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; LOPES, A. A. C.; SOUZA, L. M. Bioanálise de solo: Aspectos teóricos e práticos. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. X, p. 399-462, 2019a.
- MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; DANTAS, O. D.; LOPES, A. A. C.; REIS JUNIOR, F. B.; OLIVEIRA, M. I. L.; CHAER, G. M. Soil quality and grain yield: a win-win combination in clayey tropical Oxisols. **Geoderma**, 2021. Aceito para publicação.
- MENDES, I. C.; SOUZA, L. M.; SOUSA, D. M. G.; LOPES, A. A. C.; REIS JUNIOR, F. B.; LACERDA, M. P. C.; MALAQUIAS, J. V. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, v. 139, p. 85-93, 2019b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>.
- MENDES, I. C.; ONO, F. B.; OLIVEIRA, M. I.; SILVA, R. G.; KAPPES, C.; REIS JUNIOR, F. B.; ZANCANARO, L. Rotação de culturas, bioindicadores e saúde do solo. In: SILVA, P. A. da; OLIVEIRA, L. C. de (Org.). **Boletim de Pesquisa 2019/2020**. 19.ed. Rondonópolis: Fundação MT, 2020. p. 102-110.
- MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; KAPPES, C.; ONO, F. B.; SEMLER, T. D.; ZANCANARO, L.; LOPES, A. A. C. Qualidade biológica do solo: Por que e como avaliar. **Boletim de Pesquisa da Fundação MT**. 1.ed. Rondonópolis: Fundação MT, v. 1, p. 98-105, 2017.
- MOEBIUS-CLUNE, B. N.; MOEBIUS-CLUNE, D. J.; GUGINO, B. K.; IDOWU, O. J.; SCHINDELBECK, R. R.; RISTOW, A. J.; VAN ES, H. M.; THIES, J. E.; SHAYLER, H. A.; MCBRIDE, M. B.; KURTZ, K. S. M.; WOLFE, D. W.; ABAWI, G. S. **Comprehensive assessment of soil health – The Cornell Framework**. ed. 3.2. Geneva, NY: Cornell University, 2016.
- NICOLODI, M.; GIANELLO, C.; ANGHINONI, I.; MARRÉ, J.; MIELNICZUK, J. Insuficiência do conceito mineralista para expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas cultivadas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 32, p. 2735-41, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000700017>
- OECD. Organisation for Economic Co-operation and Development. **OECD Compendium on Agri-Environmental Indicators**. 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1787/9789264186217-en>
- RUTGERS, M.; VAN WIJNEN, H. J.; SCHOUTEN, A. J.; MULDER, C.; KUITEN, A. M. P.; BRUSSAARD, L.; BREURE, A. M. A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. **Science of the Total Environment**, v. 415, p. 39-48, 2012.
- WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, p. 29-38, 1934.
- WALLENSTEIN, M. D.; BURNS, R. G. Ecology of extracellular enzyme activities and organic matter degradation in soil: A complex community-driven process. In: DICK, R. P. (Ed.). **Methods of soil enzymology**. Madison: Soil Science Society of America, 2011. p. 35-56. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser9.c2>.