

Tecnologia BioAS

Uma maneira simples e eficiente
de avaliar a saúde do solo



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

DOCUMENTOS 369

Tecnologia BioAS

Uma maneira simples e eficiente
de avaliar a saúde do solo

*Iêda de Carvalho Mendes
Guilherme Montandon Chaer
Fábio Bueno dos Reis Junior
Djalma Martinhão Gomes de Sousa (in memoriam)
Ozanival Dario Dantas
Maria Inês Lopes de Oliveira
Juaci Vitoria Malaquias*

Exemplar desta publicação disponível gratuitamente no link: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br> (Digite o título e clique em “Pesquisar”)

Embrapa Cerrados
BR 020, Km 18, Rod. Brasília / Fortaleza
Caixa Postal 08223
CEP 73310-970, Planaltina, DF
Fone: (61) 3388-9898
Fax: (61) 3388-9879
embrapa.br/cerrados
embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações da Unidade

Presidente
Lineu Neiva Rodrigues

Secretária-executiva
Alessandra Duarte de Oliveira

Secretária
Alessandra S. Gelape Faleiro

Membros
*Alessandra Silva Gelape Faleiro;
Alexandre Specht; Edson Eyji Santo;
Fábio Gelape Faleiro; Gustavo José Braga;
Jussara Flores de Oliveira Arbues;
Kleber Worsley Souza;
Maria Madalena Rinaldi;
Shirley da Luz Soares Araújo*

Supervisão editorial
Jussara Flores de Oliveira Arbues

Revisão de texto
Jussara Flores de Oliveira Arbues

Normalização bibliográfica
Shirley da Luz Soares Araújo (CRB 1/1948)

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Wellington Cavalcanti

Tratamento das ilustrações
Wellington Cavalcanti

Foto da capa
Fabiano Bastos

Impressão e acabamento
Alexandre Moreira Veloso

1ª edição

1ª impressão (2021): tiragem (30 exemplares)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Cerrados

T255 Tecnologia BioAS : uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo / Iêda de Carvalho Mendes ... [et al.]. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2021.

50 p. (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111, ISSN online 2176-5081, 369).

1. Biologia do solo. 2. Microbiologia do solo. 3. Estrutura do solo. I. Carvalho, Iêda Mendes de. II. Embrapa Cerrados. III. Série.

CDD (21 ed.) 631.46

Autores

Iêda Carvalho Mendes

Engenheira-agrônoma, Ph.D. em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Guilherme Montandon Chaer

Engenheiro Agrônomo, Ph.D. em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ

Fábio Bueno dos Reis Junior

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Djalma Martinhão Gomes de Sousa (in memoriam)

Químico, mestre em Agronomia, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Ozanival Dario Dantas

Ciência da Computação, mestre em Engenharia Elétrica e de Computação, analista da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Maria Inês Lopes de Oliveira

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciências Agrárias, bolsista (pós-doutorado – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) na Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Juaci Vitoria Malaquias

Estatístico, mestre em Ciência de Materiais em Modelagem e Simulação Computacional, analista da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Agradecimentos

Aos funcionários da Embrapa Cerrados: Clodoaldo Alves de Sousa, Lucas Ferreira Lima Sobreira Rolim, integrantes da equipe do laboratório de Microbiologia do Solo; Osmar Teago de Oliveira e Valmir Vieira de Sousa, técnicos agrícolas; Samuel Teixeira Santos, Daniela Henrique de Oliveira Duarte e Lucas Magalhães, integrantes da equipe de informática.

Aos pesquisadores da Fundação MT, Leandro Zancanaro, Fábio Ono; ao pesquisador Claudinei Kappes; a todos os estudantes de graduação e pós-graduação.

Os autores agradecem, ainda, o auxílio de bolsas e financiamento de projetos pela Embrapa (Projeto Bioindicadores - MP2), CNPq (Edital de Redes REPENSA, Processo: 562433/2010-4, Edital Universal), FAPDF (Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Distrito Federal) e INCT-Microrganismos Promotores do Crescimento de Plantas Visando à Sustentabilidade Agrícola e à Responsabilidade Ambiental – MPCPAgro - (CNPq 465133/2014-4, Fundação Araucária-STI 043/2019, CAPES).

Apresentação

Os estudos com bioindicadores no bioma Cerrado tiveram início em 1999 com o projeto *Caracterização da biomassa e atividade microbiana em solos de cerrado sob vegetação nativa e sob diferentes sistemas de manejo*. Os resultados promissores deram origem ao projeto *Bioindicadores para avaliação da qualidade de solos em diferentes agroecossistemas brasileiros*, que está na sua quarta fase (2021-2023). Essas pesquisas envolveram dezenas de profissionais da Embrapa, universidades e fundações de pesquisa, como a Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso (Fundação MT).

Após 21 anos de estudo, em uma iniciativa pioneira no mundo, no dia 23 de julho de 2020, foi lançada a tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo BioAS, visando a agregar o componente biológico nas análises de rotina de solos. A BioAS tem como base a análise da atividade das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase, associadas aos ciclos do enxofre e do carbono, respectivamente. Por estarem relacionadas ao potencial produtivo e à sustentabilidade do uso do solo, elas funcionam como bioindicadores, permitindo avaliar a saúde dos solos. As pesquisas desenvolvidas pela Embrapa permitiram estabelecer valores de referência para essas enzimas em diferentes solos, de modo a avaliar o estado do funcionamento biológico do solo. Valores elevados de atividade enzimática indicam sistemas de produção e/ou práticas de manejo do solo adequadas e sustentáveis. Ao contrário, valores baixos servem de alerta ao agricultor para uma reavaliação do sistema de produção na direção da adoção de boas práticas de manejo.

A tecnologia BioAS também envolve os Índices de Qualidade de Solo (IQS), calculados com base nas propriedades químicas e biológicas em conjunto (IQS_{FERTBIO}) e separadamente (IQS_{Biológico} e IQS_{Químico}). A grande vantagem da

BioAS é que as enzimas são mais sensíveis que indicadores químicos e físicos e antecipam alterações na saúde do solo, em função de seu uso e manejo. Assim, a BioAS pode auxiliar nas tomadas de decisões relacionadas aos sistemas de manejo adotados nas propriedades agrícolas. No seu estágio atual, a tecnologia está formatada para áreas sob cultivos anuais no bioma Cerrado.

A Embrapa tem atuado na capacitação de laboratórios comerciais de análises de solo (Rede Embrapa de BioAS), que são conectados aos laboratórios de pesquisa por meio da plataforma web MIQS (Módulo Interpretação da Qualidade do Solo da tecnologia BioAS), desenvolvida pela Embrapa Cerrados e pela Embrapa Agrobiologia.

A pesquisa contou com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) – Microrganismos Promotores do Crescimento de Plantas Visando à Sustentabilidade Agrícola e à Responsabilidade Ambiental – MPCPAgro.

Por inaugurar uma forma mais abrangente de interpretação da saúde dos solos, indo além das questões de deficiência/excesso de nutrientes, o lançamento da BioAS foi um sucesso e tem tido uma grande repercussão no agro brasileiro. Considerada a mais nova aliada para a sustentabilidade da agricultura brasileira, a BioAS é uma iniciativa inovadora que credencia o Brasil como embaixador mundial da saúde do solo.

Nesta Série Documentos, são explicadas as bases do desenvolvimento da BioAS e como ela pode ser utilizada para acessar a “memória” e avaliar a saúde dos solos. Aspectos como a importância da manutenção de solos saudáveis para a sustentabilidade agrícola, os principais tipos de laudos da BioAS e sua utilização como suporte para tomadas de decisão de manejo nas áreas agrícolas também são abordados.

Sebastião Pedro da Silva Neto
Chefe-Geral da Embrapa Cerrados

Sumário

Introdução.....	11
Como acessar a memória do solo e avaliar sua saúde.....	14
Os poderes de um solo saudável.....	21
Resiliência	21
Plantas mais nutritivas	22
Biorremediação de pesticidas	23
Ciclagem de nutrientes	24
Tecnologia Embrapa BioAS: uma solução simples para um problema complexo	25
Vantagens da utilização dos bioindicadores arilsulfatase e β -glicosidase ...	30
Laudo da BioAS: uma visão do solo que vai além do excesso/falta de nutrientes	31
Relações entre funções do solo e a qualidade do manejo.....	36
Análise de laudos de propriedades agrícolas do Cerrado	39
Tecnologia BioAS e desempenho ambiental da agricultura	45
Considerações finais	46
Referências	48

Introdução

A simplicidade é o último grau da sofisticação (Leonardo da Vinci)

Até julho de 2020, quando um agricultor enviava uma amostra de solo para análise em laboratório, ele podia acessar apenas os aspectos químicos (componentes de acidez, macro e micronutrientes) e alguns aspectos físicos (em grande parte, determinações dos teores de argila, silte e areia) do solo. Havia uma grande lacuna nessas análises, que era a ausência do componente biológico. E a biologia é a base da saúde do solo.

Enquanto as plantas fazem a conexão da atmosfera com o solo por meio da fotossíntese, a maquinaria biológica do solo (macro, meso e microrganismos) é a responsável pelo seu “funcionamento” e participa de processos que vão desde a gênese até a decomposição de resíduos orgânicos, o que resulta na ciclagem dos nutrientes minerais utilizados pelas plantas e depositados em seus tecidos (Mendes et al., 2019). Ao atuar nos processos de formação/decomposição da matéria orgânica do solo (MOS), o componente biológico influencia a estrutura do solo, com reflexos na dinâmica da água e também nos processos que envolvem o sequestro/perda de carbono e a mitigação/emissão de gases de efeito estufa (GEE). A capacidade de o solo funcionar para a prestação desses importantes serviços ambientais é a base do conceito de “qualidade/saúde do solo” e, por isso, a importância da inclusão de parâmetros ligados ao componente biológico do solo (aqui denominados bioindicadores) nas análises de rotina de solos.

O solo também abriga a maior biodiversidade do planeta. Trata-se de um verdadeiro universo paralelo e pouco conhecido debaixo dos nossos pés. Estima-se que um único grama de solo pode abrigar cerca de 1 bilhão de bactérias, 1 milhão de actinomicetos e 100 mil fungos. Em termos de número de espécies por grama de solo, os números variam de 2 mil a 8,3 milhões (Gans et al., 2005; Schloss; Handelsman, 2006). Independente do grau de conservadorismo da estimativa utilizada, esses valores dão uma ideia da imensa diversidade das comunidades microbianas do solo e, conseqüentemente, da diversidade de processos em que elas atuam.

A despeito da importância do solo para a humanidade, o interesse pelo tema “qualidade ou saúde do solo” é relativamente recente (Doran; Parkin, 1994).

O conceito de qualidade do solo é amplamente definido como “a capacidade de um solo de funcionar dentro dos limites do ecossistema e do uso da terra para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde vegetal e animal” (Doran; Parkin, 1994). O conceito de saúde do solo, por sua vez, é ilustrado por meio da analogia com a saúde de um organismo ou comunidade (Larson; Piece, 1991; Doran; Parkin, 1994) e se origina da observação de que a qualidade do solo influencia a saúde de animais e humanos por meio da qualidade das plantas nele cultivadas (Warkentin, 1995). De acordo com Pankhurst, et al. (1997), a saúde do solo engloba a natureza viva e dinâmica do solo, focando mais em sua capacidade contínua de sustentar o crescimento das plantas e manter suas funções. Dessa forma, verifica-se que os conceitos de “qualidade” e “saúde” do solo se sobrepõem em grande parte (Pankhurst, et al., 1997; Karlen et al., 2017) e, em muitos casos, como no presente texto, serão usados indistintamente.

Um solo saudável é um solo biologicamente ativo, produtivo, capaz de armazenar água, sequestrar carbono (C) e promover a degradação de pesticidas, entre outros importantes serviços ambientais. O conceito de qualidade de solo inovou ao destacar a importância do funcionamento do solo não só para a produção biológica (grãos, carne, madeira, agroenergia, fibras, etc.), mas também para o funcionamento global dos ecossistemas. Aspectos relacionados à saúde humana, vegetal e animal (solos saudáveis, ambientes saudáveis) e à qualidade do ar e da água (emissão de gases de efeito estufa, sequestro de carbono, armazenamento e filtragem de água, etc) deixam claro que a qualidade do solo vai muito além da produção de grãos, carne, madeira, agroenergia e fibras. Por isso, é possível ter um solo com baixa qualidade, mas cujas elevadas produtividades estejam relacionadas a entradas massivas de adubos e pesticidas, uma condição que não é sustentável em longo prazo.

No caso específico do Brasil, a expansão e o 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, representam 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 SPD (iLPF) também 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 permitiram 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).

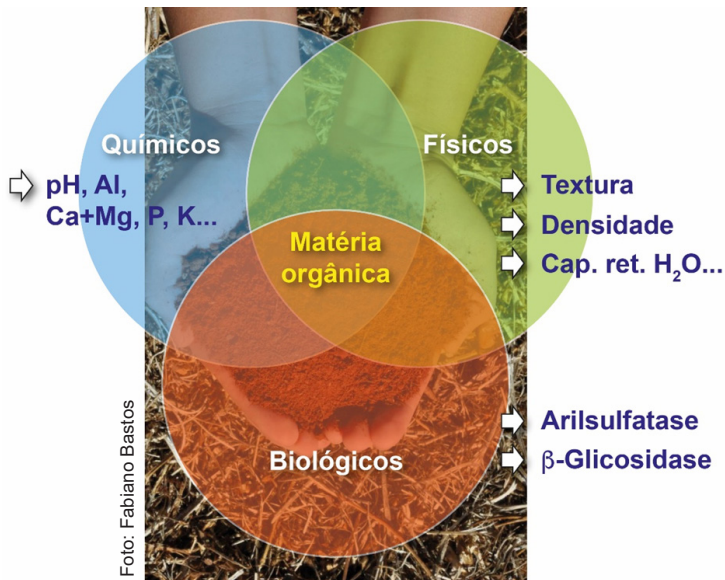


Figura 1. A Tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo (BioAS), que consiste na agregação de dois indicadores relacionados ao funcionamento da maquinaria biológica do solo (enzimas arilsulfatase e β -glicosidase) às análises de rotina, preencheu a lacuna deixada pela ausência do componente biológico nas análises de solo. (Cap. ret H₂O – capacidade de retenção de água no solo).

Nos últimos 20 anos, o grupo de pesquisa em 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

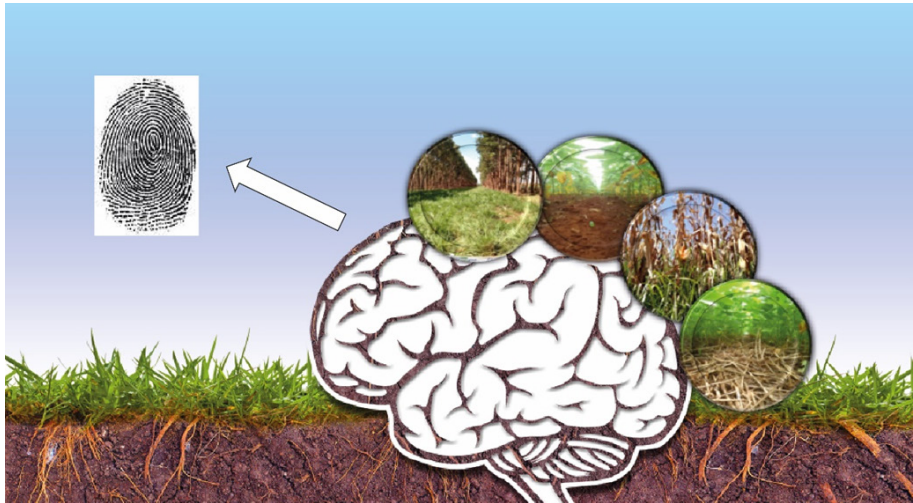
solo, sabendo exatamente o que avaliar, porque avaliar, como avaliar, quando avaliar e, principalmente, como interpretar o que foi avaliado (Mendes et al., 2019a). Lançada em julho de 2020, a BioAS é uma tecnologia que agrega o componente biológico às análises químicas tradicionais de rotina solos (pH, H+Al, P, Ca, K, Mg etc.). Consiste na análise das enzimas arilsulfatase e β -glucosidase, associadas aos ciclos do enxofre e do carbono, respectivamente, preenchendo a lacuna deixada pela ausência do componente biológico nas análises do solo.

O uso de sistemas de manejo que degradam o solo leva a sua perda de qualidade ou “adocimento”. A tecnologia BioAS permite ao agricultor saber se o sistema de manejo adotado na propriedade agrícola está promovendo ou não o incremento na qualidade do solo ou, em outras palavras, promovendo a saúde ou favorecendo o adocimento do solo onde ele cultiva suas lavouras.

Um ano após o lançamento da BioAS, percebeu-se a necessidade de um texto em que fosse possível discutir as bases do desenvolvimento dessa tecnologia e como ela pode ser utilizada para acessar a “memória” e avaliar a saúde dos solos. Aspectos relacionados à importância da manutenção de solos saudáveis para a sustentabilidade agrícola, aos principais tipos de laudos da BioAS e à sua utilização como suporte para tomadas de decisão de manejo nas áreas agrícolas também serão abordados.

Como acessar a memória do solo e avaliar sua saúde

O grau de revolvimento mecânico, em associação com a qualidade e a quantidade dos resíduos vegetais que são aportados ao solo, interferem nas interações dos diversos componentes dos sistemas agrícolas, fazendo 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 foi 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.



Foto/Ilustração: Fabiano Bastos

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 esta representa 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 que constituem o componente abiótico 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 de proteger enzimas está relacionada à sua capacidade de armazenar e estabilizar a matéria orgânica do solo (MOS) (afinal a enzima é uma molécula orgânica) e outras propriedades estruturais associadas como agregação e porosidade. Entretanto, alterações na MOS ou em propriedades estruturais do solo podem levar anos para serem detectadas, diferentemente da atividade enzimática (Bandick; Dick, 1999; Dick; Burns, 2011). Por essa razão, ao longo do tempo, o aumento sistemático da atividade enzimática (refletindo o aumento na atividade biológica) pode ser um prenúncio de que o sistema está favorecendo o acúmulo de MOS, apesar de nem sempre esse aumento de atividade estar acoplado a aumentos efetivos nos teores de MOS, nos estágios iniciais. Na Figura 4, mostra-se que o aumento na atividade biológica, evidenciado pela atividade enzimática, constitui o primeiro

degrau na escala de melhoria de um solo. Com o passar do tempo, esse aumento na atividade biológica pode resultar em aumento na MOS, impactando positivamente a qualidade química (ex., melhor armazenagem de nutrientes) e física do solo (ex., melhor estrutura, com reflexo no armazenamento e infiltração de água).

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 (Itiquira, MT). Nesse experimento, são avaliados oito sistemas de cultivos/produção incluindo o monocultivo, sucessão e 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.

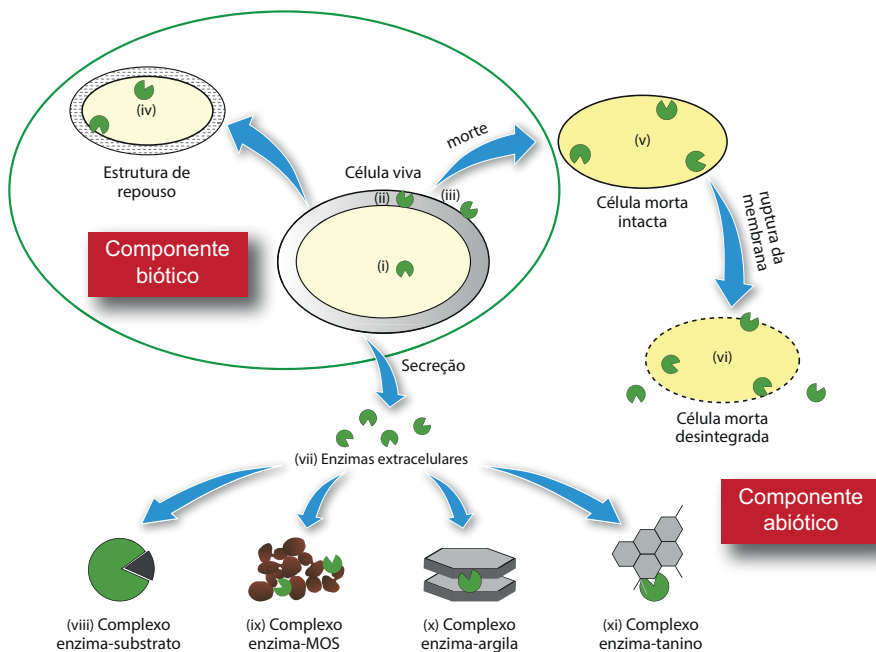


Figura 3. Esquema ilustrativo da localização das enzimas nos compartimentos solo.

Fonte: Adaptado de Wallenstein e Burns (2011).

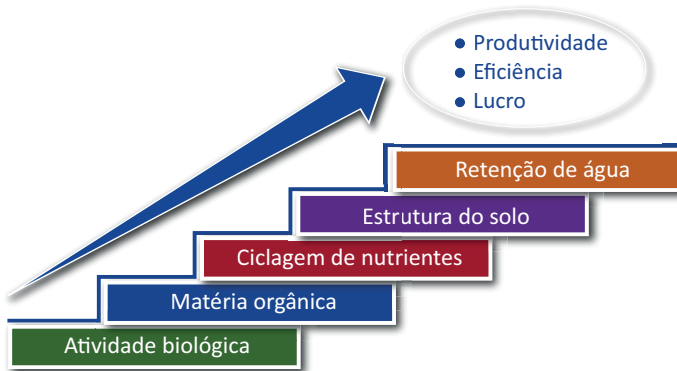
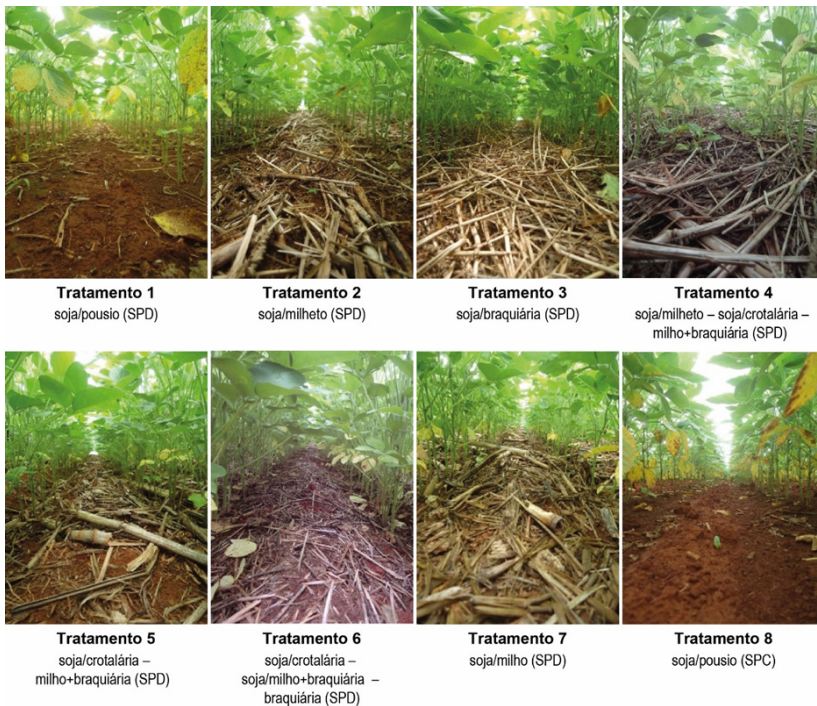


Figura 4. Fluxograma demonstrando que, em função de melhorias no sistema de manejo, o aumento na atividade biológica é o primeiro degrau na escada da melhoria de um solo.

Fonte: Adaptado de Hatfield (2017).



Fotos: Fabio Ono/ Fundação MT

Figura 5. Aspecto visual da cobertura do solo nos tratamentos do experimento de rotação de culturas na soja, em Itiquira, MT, safra 2015/2016 (SPD – Sistema de plantio direto; SPC – Sistema de preparo convencional).

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 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. Na Figura 6, ilustra-se o aspecto geral da soja no tratamento 1 (soja/pousio) e no tratamento 3, em que 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, enquanto, no tratamento soja/braquiária, a produtividade de grãos foi de 59 sc/ha, ou seja, uma diferença de 30 sc/ha entre os dois tratamentos. Apesar da diferença significativa na produtividade de grãos, as características químicas dos solos (0 cm a 10 cm) desses tratamentos foram semelhantes (Tabela 1). A única exceção foi a MOS cujo teor no tratamento com braquiária foi 50% maior do que no tratamento soja/pousio. A semelhança entre as características químicas do solo nos dois tratamentos mostra a insuficiência do conceito mineralista para explicar resultados como esses (baseado apenas nos teores absolutos dos nutrientes no solo) (Nicolodi et al., 2008). Áreas com teores semelhantes de nutrientes, mas com produtividades de grãos distintas, evidenciam que existem outras variáveis relevantes que estão influenciando os níveis de produção.

Tabela 1. Propriedades químicas do solo, na camada de 0 cm a 10 cm, nos tratamentos com soja/pousio e soja/braquiária do experimento de rotação de culturas na soja (RCS), conduzido pela Fundação MT, em Itiquira, MT (safra 2015/2016).

Tratamento	MOS g/kg	pH H ₂ O	Al	H+Al	Ca	Mg	P	K
			----- cmol _c /dm ³ -----					
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

MOS – matéria orgânica do solo (Walkley; Black, 1934); H+Al (acetato de cálcio a pH 7,0); Ca, Mg e Al (KCl 1 mol/L); P e K (Mehlich-1).

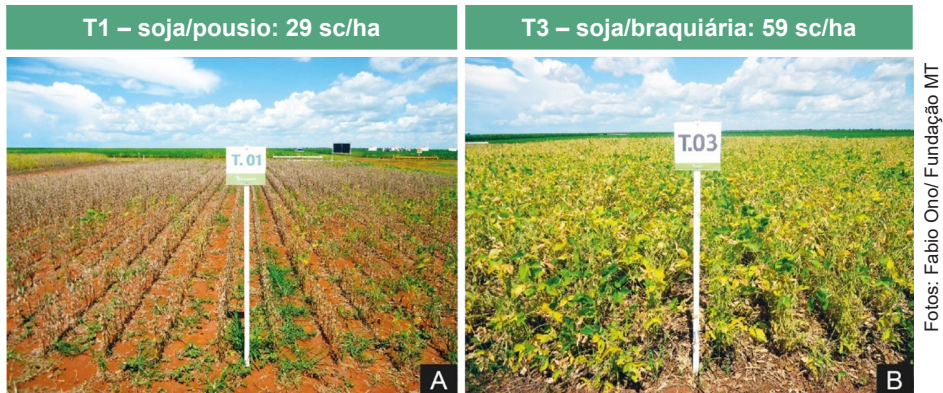


Figura 6. Aspecto visual do desenvolvimento da soja (cv. TMG 7262 RR) no veranico da safra 2014/2015, após sete safras consecutivas de monocultivo (A) e em sucessão com braquiária (B) sob SPD, em Itiquira, MT.

Na Tabela 2, são apresentados os resultados de atividade enzimática determinados na safra 2015/2016, para os dois tratamentos mencionados anteriormente (soja/pousio e soja/braquiária, ambos em SPD). 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. Em relação ao tratamento com monocultivo de soja em PD, o tratamento soja/braquiária incrementou em 4 e 8 vezes as atividades da β -glicosidase e da arilsulfatase, respectivamente. Portanto, embora as duas áreas apresentassem características químicas semelhantes, os resultados de atividade enzimática mostraram que, 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 pela presença da braquiária, a qual gera diversos benefícios ao solo, tanto pelo aporte de palhada (que protege o solo e ajuda a manter a umidade) quanto pelos seus efeitos na melhoria da estrutura do solo. Já no tratamento sob monocultivo, houve visível perda de vigor da soja. Dessa forma, o solo do sistema em sucessão com braquiária foi mais estável e resiliente, ou seja, suportou melhor uma situação de estresse quando comparado ao solo com o monocultivo.

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

Atributo microbiológico ⁽¹⁾	Soja/pousio	Soja/braquiária	Diferença
β -glicosidase	64	233	4 vezes
Arilsulfatase	28	223	8 vezes

⁽¹⁾ Valores de atividade de β -glicosidase e arilsulfatase expressos em mg *p*-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹.

Conforme ilustrado na Figura 4, esses resultados demonstram que, na escada da melhoria de um solo, os atributos microbiológicos são os primeiros a serem impactados. Mais atividade biológica significa, com o passar do tempo, mais MOS e, conseqüentemente, maior estruturação e agregação do solo, o que resulta em melhor infiltração e retenção de água. Portanto, é possível que após oito safras consecutivas, o cultivo de braquiária tenha proporcionado tais melhorias no solo, diminuindo os severos efeitos causados pelo veranico na safra de 2014/2015. A maior retenção de água aumentou a resiliência do solo sob braquiária que, em uma situação de adversidade, teve um desempenho superior ao do tratamento apenas com soja.

O comportamento diferenciado das plantas de soja nos tratamentos sob monocultivo e em sucessão à braquiária também reforça a importância da agrobiodiversidade para a saúde do solo. A melhor forma de transformar o solo em uma biofábrica biologicamente ativa e produtiva é ofertar “alimentos” diversificados e em quantidade adequada às comunidades microbianas que nele residem. Os benefícios da boa alimentação, em quantidade adequada e com diversidade de alimentos, na saúde e na qualidade de vida das pessoas, são bastante conhecidos. Como as plantas são as principais fontes de alimentos (resíduos e exsudatos radiculares) para as comunidades microbianas, esse mesmo raciocínio pode ser aplicado à saúde e à qualidade do solo.

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 clara-

mente a capacidade da atividade enzimática de acessar a memória do solo, evidenciando aspectos de saúde do solo que passavam despercebidos nas análises de química de rotina.

Os poderes de um solo saudável

Resiliência

Da mesma forma que uma pessoa saudável tolera melhor uma situação de adversidade, um solo saudável também reage melhor a situações de estresse do que um solo cuja “saúde” está comprometida. A resiliência de um solo saudável frente a uma situação de estresse abiótico fica evidente quando se observa o aspecto visual do desenvolvimento da soja, no veranico da safra 2014/2015, após sete safras consecutivas de monocultivo e em sucessão com braquiária, no experimento de RCS da Fundação MT (Figura 6). Com base nos sete primeiros anos de condução desse experimento, em que não houve diferença de rendimento de grãos entre os tratamentos soja/pousio (soja/monocultivo) e soja/braquiária (Figura 7), fica claro que nem todo solo produtivo é saudável.

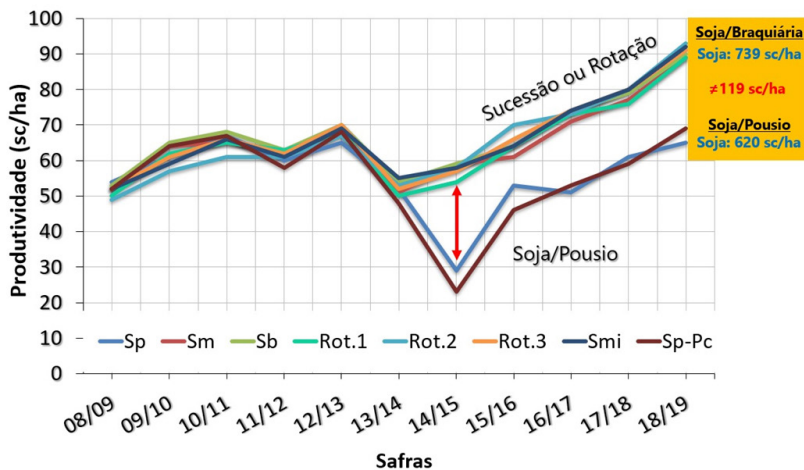


Figura 7. Produtividade da soja no experimento RCS (rotação de culturas na soja) em Itiquira, MT, conduzido sob responsabilidade de Leandro Zancanaro e Fábio Ono, da Fundação MT.

Ainda com relação ao experimento RCS da Fundação MT, também se verifica, na Figura 7, que, após a ocorrência do veranico no 7º ano de cultivo, os rendimentos de grãos entre esses dois tratamentos nunca mais foram equiparados. Na safra 2018/2019, a diferença acumulada em termos de sacas de soja entre os tratamentos soja pousio e soja/braquiária totalizou 119 sc/ha. Ou seja, o solo do tratamento soja/pousio cuja saúde está comprometida ainda não conseguiu se recuperar, mesmo após 4 anos da ocorrência do veranico.

Plantas mais nutritivas

Conforme verificado no item 2, sistemas de manejo que promovem a saúde do solo influenciam a segurança alimentar favorecendo a obtenção de maiores produtividades. Entretanto, um aspecto que muitas vezes passa despercebido é que a manutenção de solos saudáveis também favorece a produção de alimentos com maior valor nutricional.

Anghinoni et al. (2021) estudaram o impacto de sistemas de manejo, que favorecem e que degradam a saúde do solo, na qualidade nutricional dos grãos de soja no experimento de rotação de culturas na soja (RCS) da Fundação MT (abordado nos itens anteriores). Na safra 2016/2017 (9º ano de cultivo), foram determinados os teores de flavonoides e de proteínas nos grãos de soja dos tratamentos soja/pousio, soja/milho, soja/braquiária e soja/rotação (soja-milho safrinha + braquiária/Braquiária/soja-crotalária safrinha).

Conforme pode ser observado na Tabela 3, nos tratamentos com maior atividade enzimática (soja/braquiária e soja/rotação), a qualidade nutricional dos grãos de soja (evidenciada pelos teores de flavonoides e proteínas) foi superior à dos tratamentos com menor atividade enzimática, evidenciando o efeito de solos saudáveis no desenvolvimento de plantas com melhor qualidade nutricional.

Os flavonoides constituem uma classe de compostos fenólicos que ocorre naturalmente em plantas vasculares, especialmente em frutas e vegetais. São considerados componentes essenciais na dieta humana, uma vez que eles são as mais comuns e mais ativas substâncias antioxidantes em nossos alimentos (Shahidi; Naczki, 2003). Além dos benefícios diretos da adoção de

sistemas de manejo que favorecem a saúde do solo, a produção de grãos de soja com alto valor nutricional (alto teor de proteína e flavonoides) é mais uma grande contribuição dos solos saudáveis para aliviar a desnutrição e as doenças relacionadas à alimentação e, portanto, influenciar positivamente a segurança alimentar.

Tabela 3. Atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase (profundidade de 0 cm a 10 cm), carbono orgânico do solo, COS (profundidade de 0 cm a 20 cm) e teores de flavonoides e proteínas em alguns tratamentos no experimento de rotação de culturas na soja (RCS) da Fundação MT, em Itiquira, MT (9º ano de cultivo, safra 2016/17).

Tratamento	β -Glicosidase	Arilsulfatase	COS	Flavonoides	Proteína
	mg <i>p</i> -nitrophenol kg ⁻¹ solo h ⁻¹		g dm ⁻³	mg eq catequina g ⁻¹ peso fresco	(%)
Soja/Pousio	30 c	20 c	16,1bc	1,74 b	33,06 c
Soja/Milho	65 c	68 b	14,4 c	1,75 b	33,90 c
Soja/Braquiária	115 bc	156 a	17,4 ab	2,25 a	36,85 b
Soja/Rotação*	132 ab	140 a	18,3 a	2,41 a	41,62 a

*Rotação = soja-milho safrinha + braquiária/Braquiária/soja-crotalária safrinha.

Fonte: adaptado Anghinoni et al. (2021). Dados de arilsulfatase foram obtidos de Mendes et al. (2017).

Biorremediação de pesticidas

Para reforçar o fato de que a saúde do solo envolve aspectos que transcendem a questão de produtividade das culturas, na Tabela 4, apresenta-se outra vantagem de solos saudáveis e biologicamente ativos. Esse estudo (Portilho et al., 2015) foi realizado em condições controladas em laboratório, com solo coletado na profundidade de 0 cm a 10 cm, no experimento de longa duração de iLP da Embrapa Agropecuária Oeste, em Dourados, MS. O objetivo foi avaliar a persistência dos inseticidas bifentrina e permetrina no solo. No experimento, os solos foram incubados em microcosmos a 28°C, com umidade a 75% da capacidade de campo, por um período de 51 dias. Verificou-se que, nos tratamentos com maior atividade enzimática (i.e., maior atividade biológica), houve redução significativa nos valores de meia vida (TD₅₀) dos dois inseticidas (Tabela 4). Dessa forma, fica evidenciada outra grande vantagem da manutenção de solos biologicamente mais ativos (como os solos sob iLP)

e que novamente passa despercebida: a capacidade de esses solos reduzirem o período de permanência de agentes poluentes no meio ambiente. Dados como esses são, inclusive, a base para várias pesquisas, visando ao desenvolvimento de técnicas de remediação in situ de poluentes de solo com enzimas estabilizadas em fase sólida (Gianfreda; Bollag, 2002).

Tabela 4. Atividade das enzimas β -glicosidase e fosfatase ácida (média \pm erro padrão), na profundidade de 0 cm a 10 cm e meia vida no solo (TD_{50}) de dois inseticidas, sob diferentes sistemas de manejo em Dourados (MS).

Sistema de Manejo*	β -Glicosidase	Fosfatase Ácida	Bifentrina	Permetrina
	--- mg <i>p</i> -nitrofenol kg ⁻¹ solo h ⁻¹ ---		----- TD 50 (dias) -----	
iLP-soja	356 \pm 4	1206 \pm 7	14	9
iLP-pasto	282 \pm 15	649 \pm 4	25	21
SPD	188 \pm 3	612 \pm 14	25	22
SPC	99 \pm 8	291 \pm 15	44	47

* iLP soja: integração lavoura-pecuária fase lavoura; iLP pasto: integração lavoura pecuária fase pastagem; SPD: plantio direto; SPC: plantio convencional.

Fonte: Adaptado de Portilho et al. (2015).

Ciclagem de nutrientes

Além de auxiliar o condicionamento biológico e físico (maior estruturação e agregação do solo), sistemas de manejo conservacionistas e com elevada atividade enzimática, como a iLP, promovem aumentos na MOS e na eficiência do uso de nutrientes. Para ilustrar esses efeitos, na Figura 8, são apresentados dados de um experimento de longa duração (22 anos) conduzido na Embrapa Cerrados, por Djalma Martinhão Gomes de Sousa (in memoriam), em que foram avaliados o manejo da adubação fosfatada (fontes, doses e modos de aplicação) para culturas anuais e pastagem de braquiária, *Urochloa humidicola* (avaliada em regime de cortes, sem animais), em um Latossolo Amarelo muito argiloso.

Após o 13º ano, no sistema apenas com culturas anuais (soja por 10 anos, milho por 2 anos, todos sob SPC) e na sucessão cultura anual/braquiária (soja por 2 anos, pastagem por 9 anos e soja por 2 anos, sendo os cultivos de soja em SPC), os teores de MOS, na camada de 0 cm–20 cm, foram de

28,4 g/kg e 37,3 g/kg, respectivamente. Essas diferenças influenciaram diretamente no desempenho da soja cultivada no 13º ano, que se mostrou mais eficiente no uso do P residual nos sistemas com braquiária (Figura 8). Nos sistemas com braquiária (pastagem), a soja alcançou produtividades superiores às obtidas nos sistemas contendo apenas culturas anuais, mesmo quando em solos com teores de P extraível similares. Considerando que todos os demais nutrientes foram fornecidos de modo balanceado, esse resultado evidencia uma maior eficiência no uso de P após a inserção da braquiária. Como exemplo, pode-se observar que, para produzir 3,0 t ha⁻¹ de grãos de soja no sistema anual, foi necessário ter no solo 6 mg dm⁻³ de P extraível, enquanto, no sistema anual/pastagem, esse valor foi de apenas 3 mg dm⁻³.

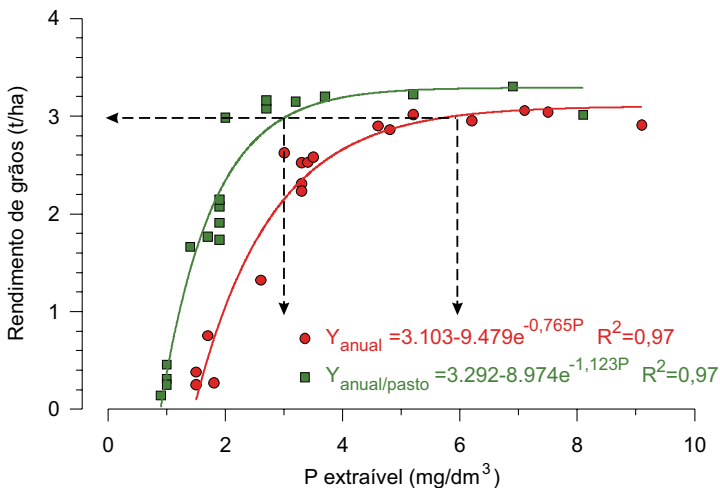


Figura 8. Efeito de sistemas de cultivo com (verde) e sem (vermelho) braquiária na relação entre o fósforo extraível por Mehlich-1 na camada de 0 cm–20 cm de profundidade e a produtividade da soja no 13º cultivo.

Fonte: Sousa et al. (1997).

Tecnologia Embrapa BioAS: uma solução simples para um problema complexo

O valioso conjunto de resultados descritos nos itens 2 e 3, evidencia os benefícios advindos da manutenção de solos saudáveis, com elevada atividade biológica em nossas lavouras: aumentos no rendimento e na qualidade nu-

tricional de grãos, nos teores de MOS, na capacidade de armazenamento de água, na eficiência do uso de nutrientes e na redução da persistência de pesticidas no solo. Mas, como avaliar a saúde do solo? Como diagnosticar se o solo está saudável ou doente?

A tecnologia BioAS, lançada em julho de 2020, foi desenvolvida para auxiliar o agricultor a realizar o diagnóstico da saúde do solo. A BioAS consiste na análise e na interpretação das atividades das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase, permitindo acessar o funcionamento da maquinaria biológica do solo, complementarmente às análises tradicionais de fertilidade do solo. A BioAS também abrange o cálculo do desempenho de três funções essenciais do solo relativas a nutrientes, que consistem na (1) função ciclar; (2) função armazenar e (3) função suprir. A função ciclar nutrientes é a base para o cálculo do $IQS_{\text{BIOLÓGICO}}$ (Índice de Qualidade Biológica do Solo), sendo as outras duas funções utilizadas no cálculo do $IQS_{\text{QUÍMICO}}$ (Índice de Qualidade Química do Solo). Por sua vez, esses dois índices são aplicados no cálculo do IQS_{FERTBIO} (Índice de Qualidade do Solo “FertBio”), que expressa a qualidade química e biológica do solo em um único índice.

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 cm–10 cm), quando avaliar (após a colheita das lavouras) e como interpretar o que foi avaliado (via valores de referência que permitem avaliar, 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 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 β -glicosidase. Os resultados das análises são encaminhados para a Embrapa para a interpretação dos valores a partir de algoritmos desenvolvidos para diferentes tipos de solo. O laudo gerado é repassado ao laboratório que o encaminha ao seu cliente.

Etapas para realização da BioAS, da amostragem de solo à interpretação dos resultados

Como avaliar?	Coletar o solo na profundidade 0 cm a 10 cm, seguindo os mesmos princípios da amostragem de solo tradicional para química.
Quando avaliar?	Após a colheita das lavouras (preferencialmente após o milho safrinha).
Para onde encaminhar as amostras?	Laboratório da Rede Embrapa BioAS que estará habilitado a realizar as análises de beta-glicosidase e arilsulfatase.
Como interpretar as análises?	O laboratório encaminha os resultados das análises para uma plataforma web na Embrapa, que gera o laudo final contendo os valores de atividade enzimática interpretados e índices de qualidade do solo referentes à cada amostra. Em seu estágio atual, a tecnologia BioAS está formatada para atender áreas sob cultivos anuais de grãos no Cerrado

A utilização de duas enzimas como bioindicadores do funcionamento da maquinaria biológica do solo deve-se ao fato de que nem sempre as alterações nas propriedades químicas, em particular os teores de MOS, são capazes de identificar as modificações que ocorrem no solo, por exemplo, em função 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 possuem características biológicas completamente distintas (Mendes et al., 2018, 2019a).

Para viabilizar a BioAS, além da seleção dos bioindicadores mais adequados, houve a necessidade 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 interpretar os bioindicadores, independentemente de um controle ou referencial de comparação.

Visando a 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 baseada 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 enzima de acordo com os seguintes critérios: $\leq 40\%$ do RRA: baixo; de 41% a 80% do RRA: moderado; e $> 80\%$ do RRA: adequado.

Ao agregar o componente biológico às análises de solo, a BioAS possibilita uma visão do solo que vai além do excesso/falta de nutrientes, podendo ser utilizada como suporte para tomadas de decisão sobre o manejo do solo na propriedade agrícola. 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 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. Por exemplo, um valor de teste “baixo” para as enzimas bioindicadoras pode ser uma indicação de que práticas de manejo inadequadas estejam sendo utilizadas. Para cada enzima, os limites críticos também podem ser entendidos como os valores desejáveis que devem ser alcançados ou superados para o funcionamento 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 a vontade 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 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 com amostras de solo coletadas na fase de florescimento das culturas (na metade do período chuvoso), rapidamente transportadas para processamento em laboratório onde eram mantidas resfriadas na umidade natural do solo. Porém, essa época coincide com um período de

elevada demanda de trabalho na lavoura e com a cultura estabelecida em máximo desenvolvimento, o que, na prática, dificultaria a coleta e o envio dessas amostras para o laboratório (Mendes et al., 2015). Para que o produtor pudesse unificar as amostragens para microbiologia e 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 o conceito de amostra de solo Fertbio para fertilidade química (FERT) e biológica (BIO) do solo (Mendes et al., 2019b). Esse conceito possibilitou a unificação da época de amostragem de solo para as análises químicas e biológicas (ambas realizadas na fase de pós-colheita) e dos procedimentos de pré-tratamento das amostras (com secagem do solo ao ar antes da realização das análises de laboratório). Em termos práticos, a adoção do conceito Fertbio de amostragem de solo foi vantajosa para os agricultores e para os laboratórios comerciais, resultando em reduções de custos operacionais. A unificação da amostragem de solo (química e biológica) na fase de pós-colheita das lavouras facilita a coleta e o envio dessas amostras para o laboratório. Da mesma forma, para os laboratórios comerciais, a possibilidade de secar amostras de solo ao ar, antes da realização dos ensaios de atividade enzimática, facilita o manuseio e o armazenamento dessas amostras.

Importante destacar que, embora tenha sido possível unificar a época de amostragem de solo para as análises químicas e biológicas (ambas realizadas na fase de pós-colheita) e os procedimentos de preparação das amostras em laboratório (secagem à temperatura ambiente e peneiramento), não foi possível unificar a profundidade de coleta das amostras de solo no campo. A amostragem para avaliação dos aspectos de química de solo, geralmente, é efetuada utilizando a profundidade 0 cm a 20 cm ou estratificando 0 cm a 10 cm e 10 cm a 20 cm. Para a BioAS, o solo precisa ser coletado na profundidade de 0 cm a 10 cm, pois essa camada é a mais impactada pelas plantas, principais agentes moduladores da biologia do solo. Portanto, o uso da camada de 0 cm a 10 cm como camada diagnóstica para a BioAS principalmente em áreas sob SPD e/ou com mínimo preparo de solo maximiza a sensibilidade dos bioindicadores, impedindo que possíveis efeitos na saúde do solo, decorrentes do uso e do manejo, sejam diluídos quando se faz a amostragem na profundidade de 0 cm a 20 cm.

Vantagens da utilização dos bioindicadores arilsulfatase e β -glicosidase

Em todos os experimentos/fazendas avaliados, as enzimas arilsulfatase e β -glicosidase, em conjunto ou separadamente, foram os indicadores que consistentemente apresentaram maior sensibilidade para detectar alterações no solo, em função do sistema de manejo (Mendes et al., 2019a). Essas duas enzimas possuem uma estreita relação com a MOS, parâmetro base da qualidade de um solo, e o rendimento de grãos, parâmetro que reflete o aspecto econômico das lavouras, que é fundamental para a sustentabilidade do negócio agrícola (Lopes et al., 2013, 2018; Mendes et al., 2019a).

Outras características que tornaram vantajosa a utilização da arilsulfatase e da β -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, etc.), o que permitiu a seleção de apenas dois indicadores para expressar o funcionamento da maquinaria biológica dos solos.

Vantagens da utilização da arilsulfatase e da β -glicosidase

- Sensibilidade para detectar mudanças no solo.
- Relacionadas ao funcionamento do solo (ciclagem de nutrientes).
- Relacionadas ao rendimento de grãos das lavouras e com a matéria orgânica do solo.
- Resultados são “interpretáveis”: alto, médio e baixo.
- Simplicidade analítica e não geram resíduos.
- Não influenciadas por adubos e calcário.
- Se adequam ao conceito Fertbio de amostragem de solo.
- Custo de análise, coerência e reprodutibilidade.

A título de comparação, o programa Comprehensive Assessment of Soil Health (CASH) de monitoramento da saúde de 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 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 desse assunto ao possibilitar a inclusão de métricas cuja interpretação tem como base o rendimento das lavouras e a MOS.

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 abióticas. Isso confere às determinações das atividades das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase mais outras duas vantagens importantes: (1) elas são parâmetros integradores relacionados a todos os componentes biológicos do solo (plantas, animais e microrganismos); (2) 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, define-se como “memória” do solo (Mendes et al., 2019a).

Em termos de adoção em rotina nos laboratórios comerciais, as determinações de atividade enzimática podem ser facilmente implementadas, pois baseiam-se em procedimentos analíticos simples e praticamente dispensam investimentos na compra de novos equipamentos (requerem incubadores com temperatura controlada e espectrofotômetros na faixa do visível, equipamentos comumente já encontrados nesses locais).

Laudo da BioAS: uma visão do solo que vai além do excesso/falta de nutrientes

O laudo tradicional de uma análise de química solo e o laudo da BioAS são apresentados na Tabelas 5 e 6, respectivamente. As linhas representam diferentes talhões da propriedade agrícola. No laudo da BioAS nas colunas,

são apresentados da esquerda para a direita: os valores dos níveis de atividade enzimática e da MOS; os três índices de qualidade de solo (IQS): IQS_{FERTBIO} , $IQS_{\text{BIOLÓGICO}}$ e $IQS_{\text{QUÍMICO}}$ e os escores das três funções: F1: Ciclar, F2: Armazenar e F3: Suprir nutrientes. No laudo da BioAS, os valores de atividade enzimática, a matéria orgânica, os índices e os escores das funções são representados em um padrão cromático “semafórico”, em que verde-escuro ou verde-claro significam valores adequados; amarelo, valores intermediários; e laranja ou vermelho, valores baixos (Figura 9).

A comparação do laudo da BioAs com o laudo atual das análises de solo apresentada nas Tabelas 5 e 6 e demonstra que, com a BioAS, é possível obter uma forma mais abrangente de relacionamento com nossos solos, indo muito além das questões de deficiência/excesso de nutrientes.

Uma inovação importante atrelada ao uso da BioAS é o cálculo de índices para avaliar a qualidade dos solos (IQS), conforme apresentado na Figura 9. O IQS_{FERTBIO} é calculado com base nas determinações dos atributos de fertilidade química (pH, H+Al, Ca, K, P, Mg e MOS) e nas enzimas arilsulfatase e β -glicosidase. O IQS_{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 com $IQS_{\text{QUÍMICO}}$ alto/muito alto não necessariamente possuem $IQS_{\text{BIOLÓGICO}}$ satisfatórios.

Os cálculos dos IQS da tecnologia BioAS (IQS_{FERTBIO} , $IQS_{\text{QUÍMICO}}$ e $IQS_{\text{BIOLÓGICO}}$) baseiam-se no conceito proposto por Karlen e Stott (1994), que leva em consideração a capacidade do solo funcionar para prestar importantes serviços ambientais. Na BioAS, com base nas determinações de atividade enzimática e nas propriedades químicas, são avaliadas três funções relacionadas à capacidade do solo promover a nutrição das plantas: (F1) a capacidade do solo ciclar nutrientes; (F2) a capacidade do solo armazenar nutrientes; e (F3) a capacidade do solo suprir nutrientes (Mendes et al., 2021). Como os IQS, os escores das funções também variam de 0 a 1, sendo quanto mais próximo de 1 melhor o desempenho da função (índices das funções F1, F2 e F3). Semelhante à estratégia utilizada para interpretar os valores de atividade enzimática, todos os IQS e os escores das três funções são calibrados em relação ao rendimento de grãos e a MOS (Mendes et al., 2021).

Tabela 5. Laudo Tradicional de Análise de química de solo de vários talhões de uma fazenda no MT.

Amostra	Análise de química de solo										
	pH (H ₂ O)	Al	Ca	H+Al	Mg	CTC	SB	P (Mehlich1)	K	V (%)	Argila (%)
1001 LV01	5,5	0,05	3,1	5,3	1,3	10	5	17	96	46	67
1002 09	5,6	0,01	7,7	2,6	4,0	15	12	39	114	82	70
1003 02/19 BC	5,1	0,08	2,8	5,6	0,9	9	4	14	55	40	52
1004 12	5,7	0,03	6,6	5,2	1,8	14	9	27	75	62	71
1005 20	6,2	0,02	5,9	4,0	0,9	11	7	10	92	64	52
LV 101	5,6	0,01	5,5	5,3	1,1	12	7	35	36	56	73
LV 102	5,7	0,02	4,0	5,1	1,1	10	5	18	54	51	71
LV 103	6,1	0,01	3,7	3,9	2,2	10	6	13	39	60	66
LV 104	5,5	0,02	2,1	3,5	0,6	6	3	22	35	44	41
LV 105	5,9	0,02	5,3	4,1	0,8	10	6	17	61	60	69

P: fósforo disponível (Mehlich1); SB: soma de bases; V: saturação de bases; Argila: teor de argila.

Tabela 6. Laudo da BioAS da fazenda apresentada na Tabela 5 gerado pela plataforma Módulo de Interpretação da Qualidade do Solo, MIQS.

Amostra	Laudo da BioAS									
	Aril	Beta	MOS	IQS		IQS Químico	CICLAR Nutriente	Armazenar nutriente	Suprir nutriente	
				Fertbio	Biológico					
1001 LV01	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	

Aril= arilsulfatase; beta= β -glucosidase; MOS= Matéria orgânica do solo (Walkley & Black).

Classe	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Faixa	0 a 0,20	0,21 a 0,40	0,41 a 0,60	0,61 a 0,80	0,81 a 1,00

Figura 9. Escala de qualidade cromática usada para classificar os índices apresentados no laudo da BioAS.

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 à capacidade do solo de disponibilizar os principais macronutrientes (Figura 10). 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.

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 laboratórios comerciais interagem com a Embrapa por meio da plataforma web denominada Módulo de Interpretação da Qualidade do Solo (MIQS), desenvolvida pela Embrapa Cerrados e pela Embrapa Agrobiologia. Além de fazer a interpretação dos resultados das análises enzimáticas e dos teores de MOS, com base nas propriedades químicas e biológicas, a plataforma MIQS calcula os índices de qualidade de solo (IQS) e os escores das funções ciclar, armazenar, e suprir nutrientes.

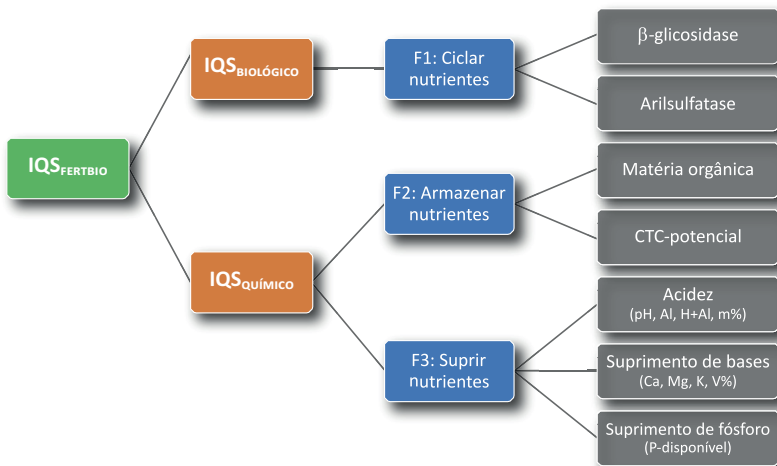


Figura 10. Representação esquemática do modelo utilizado para o cálculo do $IQS_{FERTBIO}$, $IQS_{BIOLÓGICO}$ e $IQS_{QUÍMICO}$.

Considerando a capacidade de as enzimas funcionarem como bioindicadores capazes de antecipar mudanças no solo, em função do tipo de manejo, a utilização da BioAS abre uma nova perspectiva para a utilização das análises de solo como suporte para tomadas de decisão de manejo nas áreas agrícolas.

Relações entre funções do solo e a qualidade do manejo

A partir do laudo da BioAS, é possível verificar diferentes padrões que podem fornecer indicações relevantes sobre a qualidade do uso e manejo do solo de determinada área. Isso é possível por meio da análise dos padrões de cores atribuídos às funções F1 e F2. Esses padrões podem ser classificados em “estáveis” ou de “transição”. Padrões estáveis, normalmente, ocorrem quando o uso e o manejo do solo são praticados durante um longo prazo em determinada área (geralmente acima de 5 anos). Nessas condições, tanto a MOS quanto a atividade biológica do solo atingem um certo nível de equilíbrio.

Na prática, um padrão estável pode ser identificado quando, no laudo da BioAS, observa-se tanto F1 quanto F2 com cores próximas ou similares. Por exemplo, se F1 e F2 estão com tonalidades verdes (claro ou escuro), o solo é considerado saudável ou de alta qualidade e, conseqüentemente, indica-se a manutenção das práticas de manejo já em curso. Ao contrário, quando F1 e F2 estão simultaneamente nas cores laranja ou vermelha, o solo é considerado doente ou de baixa qualidade, recomendando-se uma reavaliação das práticas de manejo ou de todo o sistema de produção em curso. Utilizando-se essa mesma lógica, se F1 e F2 estão na cor amarela, a condição do solo é também estável, mas em uma condição de saúde ou qualidade intermediária. Esses padrões são sintetizados na Figura 11.

Ao contrário dos padrões estáveis, os padrões de transição geralmente ocorrem em áreas em que houve mudanças significativas no uso e no manejo do solo em período relativamente recente (normalmente até 3 anos). Em tais situações, pode ocorrer um desequilíbrio temporário entre os níveis de MOS e de atividade biológica, os quais, a depender de cada situação, poderá levar a saúde/qualidade do solo a níveis mais baixos ou mais elevados do que aquele atualmente apresentado.

Condição do solo	F1 - Ciclar nutrientes	F2 - Armazenar nutrientes	O que fazer?
Solo saudável / alta qualidade	verde-escuro muito alto / alto	verde-escuro muito alto / alto	Manter práticas de manejo
Solo doente / baixa qualidade	laranja baixo / muito baixo	laranja baixo / muito baixo	Solo na UTI! Reavaliar práticas de manejo
Saúde / qualidade média	amarela médio	amarela médio	Verificar possíveis melhorias no manejo

Figura 11. Padrões estáveis de saúde/qualidade do solo que podem ser identificados em laudos da BioAS a partir das cores atribuídas às funções F1 e F2. Verde-escuro ou verde-clara significam valores adequados; amarela, valores intermediários; e laranja ou vermelha, valores baixos.

Padrões de transição podem ser identificados no laudo da BioAS quando ocorre uma discrepância entre cores atribuídas às funções F1 e F2, as quais podem indicar basicamente duas condições de solo:

- a) A primeira condição ocorre quando F1 apresenta-se nas cores laranja ou vermelha (classes baixo ou muito baixo) e F2 nas cores verdes (classes alto e muito alto) (Figura 11), indicando que o solo está em processo de perda de qualidade ou “adoecendo”, e resulta do fato de que, sob um manejo inadequado, ocorre primeiramente a queda na atividade enzimática do solo, a qual é mais sensível e reduz os níveis mais rapidamente que a MOS, cujas alterações ocorrem de maneira mais lenta e gradual. O padrão F1 baixo/F2 alto (solo adoecendo) permite alertar o agricultor de que as práticas de manejo em curso levarão a saúde/qualidade do solo a um nível inferior ao atual em médio ou em longo prazos, servindo como um alerta precoce para reavaliação de práticas de manejo. Assim, a forma de proceder diante desse tipo de laudo envolve uma avaliação criteriosa das práticas de manejo que vêm sendo adotadas na propriedade agrícola, de modo que práticas regenerativas sejam adotadas com a devida urgência para evitar perdas nos teores de MOS. Se nada for feito, a tendência será que a condição de qualidade de F2 também transite da cor verde para a vermelha em longo prazo.

- b) A segunda condição ocorre quando F1 está nas cores verde e F2, nas cores laranja ou vermelha, indicando um solo em processo de melhoria ou recuperação de uma condição degradada (Figura 12). Nesse caso, um solo doente (previamente com comprometimentos nas funções relacionadas à ciclagem e armazenamento de nutrientes) começa a se recuperar. Como as enzimas são mais sensíveis a esse processo, a F1 é rapidamente melhorada durante os primeiros anos após a implementação de novas práticas de uso e manejo do solo. Nesse caso, naturalmente, a recomendação é de manutenção das práticas de manejo em curso, o que, em longo prazo, também levará F2 para uma condição alta de qualidade.

Condição do solo	F1 - Ciclar nutrientes	F2 - Armazenar nutrientes	O que fazer?
Solo adoecendo	baixo / muito baixo	muito alto / alto	Atenção! Reavaliar práticas de manejo
Solo em recuperação	muito alto / alto	baixo / muito baixo	Manter práticas de manejo

Figura 12. Padrões de transição da condição de saúde/qualidade do solo que podem ser identificados em laudos da BioAS a partir das cores atribuídas às funções F1 e F2. Verde-escura ou verde-clara significam valores adequados; e laranja ou vermelha, valores baixos.

Importante destacar que para essas classificações, os escores da função F3 (suprir nutrientes) não são considerados. Diferentemente de F1 e F2, as quais são interdependentes e influenciadas pelo uso e manejo do solo de forma mais ampla (ex., sistema de plantio, rotação de culturas, etc.), a F3 está diretamente relacionada ao manejo da adubação e calagem do solo. Dessa forma, os valores de F3 são independentes daqueles observados para F1 e F2. Por exemplo, adubar e corrigir um solo doente (F1 e F2 baixas) não o torna saudável; ou ainda, um solo ácido e pobre em nutrientes não é necessariamente um solo doente, como normalmente é o caso de solos sob vegetação natural. Portanto, é possível que um solo apresente alta fertilidade química (F3 elevada) e mesmo assim apresente-se doente, do ponto de vista biológico, em função de práticas de manejo inadequadas. Aliás esse é um dos grandes diferenciais trazidos pela BioAS: a possibilidade de diferenciar solos quimicamente similares, mas biologicamente distintos.

Análise de laudos de propriedades agrícolas do Cerrado

Nas Figuras 13, 14, 15 e 16 são apresentados exemplos de quatro tipos de laudos de propriedades agrícolas da região do Cerrado. Na Figura 13, o aspecto visual do laudo da BioAS, com predominância da cor verde, indica que os talhões da propriedade agrícola estavam em excelente condição com relação às funções “F1 - Ciclar” e “F2 - Armazenar”, indicando um solo “saudável”. Conforme discutido anteriormente, em situações como essa, recomenda-se a manutenção das práticas de manejo adotadas na propriedade. Na Figura 14, o laudo mostra a predominância de tons vermelhos/alaranjados na coluna ciclagem, indicando que o solo está em um processo de degradação sob o ponto de vista biológico, ou seja, que está adoecendo. Interessante destacar que, nesse tipo de laudo, a pontuação da função “F2 Armazenar” ainda se encontra em patamares adequados (indicado pelas cores verde-clara e verde-escura), pois as alterações na MOS ocorrem de maneira mais lenta e gradual que nas enzimas. Diante desse tipo de laudo, aconselha-se uma avaliação criteriosa das práticas de manejo que vêm sendo adotadas na propriedade agrícola para evitar perdas nos teores de MOS em médio ou em longo prazos.

À medida que o processo de adoecimento do solo é intensificado, o comprometimento dos aspectos biológicos, evidenciado pela função “F1 Ciclar”, resulta em perdas nos teores de MOS, de tal forma que, na função “F2 Armazenar”, passa a ocorrer um predomínio das cores alaranjada e vermelha. Isso é demonstrado no laudo da Figura 15. Perdas de matéria orgânica e redução da atividade biológica indicam uma situação de solo “doente”, em que práticas de manejo regenerativas precisam ser adotadas com urgência.

Já no laudo apresentado na Figura 16, demonstra-se quando um solo doente (com comprometimentos nas funções “F1 Ciclar” e F2 “Armazenar”) começa a se recuperar. Conforme ilustrado na Figura 4, na escalada da melhoria de um solo, o componente biológico é o primeiro impactado. Assim, os níveis de atividade enzimática, representados na função “F1 Ciclar”, encontram-se em patamares elevado/muito elevado (verde-clara/verde-escura), enquanto os escores da função “F2 Armazenar” permanecem nos níveis baixo/muito baixo (alaranjado/vermelho escuro). Nesse tipo de laudo, as enzimas, em níveis adequados, indicam que as práticas de manejo utilizadas estão impactando o

solo positivamente e que ele está em processo de recuperação do ponto de vista biológico. O uso contínuo e persistente de práticas de manejo regenerativas poderá resultar, ao longo do tempo, em aumentos nos teores de MOS, que resultarão em aumentos dos escores da função “F2 Armazenar”. O tempo exato para que isso aconteça dependerá das condições edafoclimáticas de cada local e das práticas regenerativas adotadas (intensidade e duração).

Conforme já mencionado, a sensibilidade das enzimas como bioindicadores capazes de detectarem precocemente se o solo está em processo de perda ou ganho de qualidade (em processo de adoecimento ou de recuperação) fica evidente nos laudos transicionais apresentados nas Figuras 14 e 16. Nesses laudos, as enzimas atuam como mensageiras de más (Figura 14) e de boas notícias (Figura 16). Na Figura 14, as enzimas alertam para o fato de que as práticas de manejo utilizadas na propriedade rural estão causando a degradação do solo. Na Figura 16, indica-se que o aumento na atividade enzimática em solos com baixos teores de MOS serve para estimular/motivar os agricultores que estão adotando práticas de manejo que possibilitem a recuperação da qualidade/saúde do solo.

Atualmente, em muitas fazendas do Cerrado, as decisões de manejo de solo são influenciadas por aspectos operacionais e econômicos, em detrimento dos aspectos agrônômicos. Assim, a BioAS contribuirá para a adoção de sistemas conservacionistas, melhoradores da qualidade de solo, reforçando a percepção da importância da presença de solos saudáveis para a manutenção de lavouras produtivas. Ao fornecer informações que normalmente passam despercebidas nas análises de química 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 enzimas bioindicadoras, nas análises comerciais de rotina, mostrando como está o funcionamento da maquinaria biológica do solo, 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 e soluções customizadas, específicas para cada fazenda.



Figura 13. Exemplo de um laudo de BioAS, com padrão estável, indicando que o solo está saudável, conforme mostrado pela predominância de tons verdes nas colunas das funções "Ciclagem" e "Armazenamento". Dados obtidos pelos laboratórios da Rede Embrapa de BioAS (os valores dos IQS e dos escores das funções são apresentados utilizando ponto como separador decimal ao invés de vírgula).

Módulo de Interpretação da Qualidade do Solo

REDE EMBRAPA **BioAS**
INTEGRAÇÃO DE SABERES

Embrapa

0 42m 53s 2 Genar Joda 3


Resultado do pedido:

Amostra (Coloq. Joda... como de sempre)	Aril	Beta	MOS	IQS FertBio	IQS Bio	IQS Quim	Ciclagem	Armazenamento	Suprimento	LINE VALIDAÇÃO	OBS
64	96	43	0,58	0,35	0,7	0,35	0,35	0,64	0,75	12	Efetivado com sucesso
58	129	40	0,59	0,38	0,7	0,38	0,38	0,59	0,81	12	Efetivado com sucesso
64	116	46	0,65	0,4	0,78	0,4	0,72	0,72	0,84	12	Efetivado com sucesso
52	120	44	0,67	0,43	0,8	0,43	0,43	0,77	0,82	12	Efetivado com sucesso
45	108	44	0,62	0,36	0,75	0,36	0,7	0,7	0,8	12	Efetivado com sucesso
54	81	47	0,63	0,33	0,78	0,33	0,74	0,74	0,82	12	Efetivado com sucesso
70	102	47	0,68	0,38	0,82	0,38	0,81	0,81	0,84	12	Efetivado com sucesso
41	104	40	0,59	0,35	0,71	0,35	0,61	0,61	0,81	12	Efetivado com sucesso
46	96	54	0,69	0,36	0,85	0,36	0,89	0,89	0,82	12	Efetivado com sucesso
64	92	43	0,62	0,38	0,74	0,38	0,7	0,7	0,78	12	Efetivado com sucesso
58	93	47	0,66	0,38	0,8	0,38	0,78	0,78	0,82	12	Efetivado com sucesso
61	87	47	0,65	0,36	0,79	0,36	0,77	0,77	0,81	12	Efetivado com sucesso
46	89	40	0,55	0,31	0,66	0,31	0,59	0,59	0,73	12	Efetivado com sucesso
44	104	43	0,63	0,37	0,76	0,37	0,72	0,72	0,79	12	Efetivado com sucesso
36	55	43	0,54	0,25	0,69	0,25	0,65	0,65	0,73	12	Efetivado com sucesso
50	121	45	0,62	0,37	0,75	0,37	0,69	0,69	0,8	12	Efetivado com sucesso
40	87	46	0,61	0,31	0,76	0,31	0,71	0,71	0,81	12	Efetivado com sucesso
48	97	45	0,65	0,37	0,79	0,37	0,75	0,75	0,82	12	Efetivado com sucesso
60	122	45	0,64	0,4	0,75	0,4	0,71	0,71	0,8	12	Efetivado com sucesso
77	109	43	0,62	0,4	0,73	0,4	0,67	0,67	0,78	12	Efetivado com sucesso
73	68	45	0,61	0,34	0,75	0,34	0,69	0,69	0,81	12	Efetivado com sucesso


Embrapa
Laboratório de Microbiologia de Solos da Embrapa Cerrados
BR 020 Km 18 - Planaltina, DF - Brasil - Contato: (61) 3388-8998 - Fax: (61) 3388-9979

Empresas Participantes do Programa Agropecuária
Todos os direitos reservados, conforme Lei nº 9.610.

Figura 14. Exemplo de um laudo transicional de BioAS indicando que o solo está em processo de adoecimento (comprometimento dos aspectos biológicos), com predominância de tons vermelhos/laranja na coluna da função “Ciclagem”. A pontuação da função “Armazenamento” ainda se encontra em patamares adequados (indicado pelas cores verde-clara e verde-escura). Dados obtidos pelos laboratórios da Rede Embrapa de BioAS (os valores dos IQS e dos escores das funções são apresentados utilizando ponto como separador decimal ao invés de vírgula).



Módulo de Interpretação da Qualidade do Solo



REDE EMBRAPA
BioAS
MANEIRAS DE SOLO

0 42m 42s | Gestor João A

[pedidos](#) | [laboratórios](#) | [referências](#) | [usuários](#) | [ajuda](#) | [sua](#) | [sobre...](#)

Resultado do pedido

Amostra (Código interno - nome da amostra)	Ari	Beta	MOS	IQS FertBio	IQS Bio	IQS Quim	Ciclagem	Armazenamento	Suprimento	LINK VALIDAÇÃO	OBIS
58	68	28	0.48	0.32	0.56	0.32	0.32	0.32	0.8	12	Efetuada com sucesso
70	52	27	0.48	0.33	0.55	0.33	0.31	0.31	0.79	12	Efetuada com sucesso
68	63	28	0.51	0.37	0.58	0.37	0.35	0.35	0.82	12	Efetuada com sucesso
30	41	24	0.52	0.38	0.59	0.38	0.4	0.4	0.78	12	Efetuada com sucesso
62	54	27	0.49	0.33	0.57	0.33	0.29	0.29	0.85	12	Efetuada com sucesso
57	64	27	0.47	0.31	0.55	0.31	0.28	0.28	0.82	12	Efetuada com sucesso
53	42	27	0.46	0.28	0.54	0.28	0.28	0.28	0.81	12	Efetuada com sucesso
73	66	30	0.54	0.38	0.62	0.38	0.41	0.41	0.84	12	Efetuada com sucesso
52	61	26	0.65	0.59	0.68	0.59	0.58	0.58	0.78	12	Efetuada com sucesso
44	37	22	0.44	0.26	0.53	0.26	0.21	0.21	0.84	12	Efetuada com sucesso
49	51	20	0.43	0.29	0.49	0.29	0.17	0.17	0.81	12	Efetuada com sucesso
85	61	28	0.51	0.34	0.6	0.34	0.32	0.32	0.88	12	Efetuada com sucesso
75	60	26	0.51	0.36	0.59	0.36	0.3	0.3	0.87	12	Efetuada com sucesso
84	104	28	0.65	0.64	0.66	0.64	0.45	0.45	0.87	12	Efetuada com sucesso
68	70	28	0.5	0.34	0.59	0.34	0.34	0.34	0.84	12	Efetuada com sucesso
59	46	25	0.45	0.27	0.54	0.27	0.25	0.25	0.83	12	Efetuada com sucesso
82	77	27	0.48	0.32	0.56	0.32	0.27	0.27	0.85	12	Efetuada com sucesso
81	88	27	0.49	0.39	0.55	0.39	0.28	0.28	0.81	12	Efetuada com sucesso



Laboratório de Microbiologia de Solos da Embrapa Cerrados
 BR 020 Km 18 - Planaltina, DF - Brasil - Contato: (61) 3388-8988 - Fax: (61) 3388-8979
 Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
 Todos os direitos reservados, conforme Lei nº 9.610.

Figura 15. Exemplo de um laudo de BioAS, com padrão estável, indicando que o solo está doente (com comprometimento dos aspectos biológicos e perdas nos teores de MOS), conforme mostrado pela predominância das cores laranja ou vermelha para “Ciclagem” e “Armazenamento”. Dados obtidos pelos laboratórios da Rede Embrapa de BioAS (os valores dos IQS e dos escores das funções são apresentados utilizando ponto como separador decimal ao invés de vírgula).

Resultado do pedido:

Amostra nº	Ari	Beta	MOS	IOS FerBio	IOS Bio	IOS Quim	Ciclagem	Armazenamento	Suprimento	LINK VALIDAÇÃO	OBS
19	86	9	0.73	0.81	0.69	0.81	0.58	0.81	Efetuada com sucesso		
28	143	11	0.76	0.92	0.68	0.92	0.55	0.8	Efetuada com sucesso		
20	86	8	0.65	0.78	0.59	0.78	0.39	0.79	Efetuada com sucesso		
20	93	8	0.58	0.79	0.47	0.79	0.25	0.7	Efetuada com sucesso		
25	124	9	0.65	0.89	0.53	0.89	0.42	0.64	Efetuada com sucesso		
19	69	8	0.55	0.69	0.48	0.69	0.19	0.76	Efetuada com sucesso		
26	105	12	0.7	0.86	0.63	0.86	0.46	0.79	Efetuada com sucesso		
19	85	9	0.63	0.77	0.56	0.77	0.33	0.79	Efetuada com sucesso		
20	105	9	0.6	0.8	0.5	0.8	0.24	0.76	Efetuada com sucesso		
20	79	9	0.62	0.73	0.57	0.73	0.34	0.8	Efetuada com sucesso		
21	95	9	0.63	0.8	0.55	0.8	0.31	0.79	Efetuada com sucesso		
19	77	9	0.6	0.71	0.54	0.71	0.31	0.77	Efetuada com sucesso		
13	67	9	0.55	0.63	0.51	0.63	0.24	0.77	Efetuada com sucesso		
11	54	8	0.53	0.57	0.51	0.57	0.23	0.78	Efetuada com sucesso		
26	93	9	0.63	0.84	0.53	0.84	0.27	0.78	Efetuada com sucesso		
15	59	8	0.51	0.66	0.43	0.66	0.23	0.64	Efetuada com sucesso		
18	88	9	0.58	0.76	0.48	0.76	0.2	0.77	Efetuada com sucesso		



 Laboratório de Microbiologia de Solos da Embrapa Cerrados
 BR 020 Km 18 - Planaltina, DF - Brasil - Contato: (61) 3388-9898 - Fax: (61) 3388-9879
 Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
 Todos os direitos reservados, conforme Lei nº 9.610.

Figura 16. Exemplo de um laudo transicional de BioAS indicando que o solo está em processo de recuperação sob o ponto de vista biológico, com predominância de tons verdes na coluna “Ciclagem”. A pontuação da função “Armazenamento” ainda se encontra em patamares baixos (indicado pelas cores vermelhos/laranjados). Dados obtidos pelos laboratórios da Rede Embrapa de BioAS (os valores dos IQS e dos escores das funções são apresentados utilizando ponto como separador decimal ao invés de virgula).

Semelhante a um exame de sangue, no qual, por meio da determinação de vários parâmetros, pode-se avaliar como está o estado de saúde, a BioAS serve para avaliar a saúde do solo. No exame de sangue, pode-se 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. Dessa maneira, a BioAS serve para alertar sobre a necessidade da mudança de postura em relação ao manejo do solo, a famosa “vontade de mudar”. 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 atividade física 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, é o caminho natural para a obtenção de solos saudáveis, isto é, biologicamente mais ativos e produtivos (caso da fazenda exemplificada na Figura 13). A expectativa é de que a BioAS auxiliará bastante nesse processo de mudança de postura.

Tecnologia BioAS e desempenho ambiental da agricultura

Os cenários futuros demandam construir uma agricultura resiliente, eficiente e multifuncional. A expectativa é de que, além da produção de alimentos, fibras e energia, a moderna agricultura do século 21 também seja reconhecida pela sua capacidade de prestar importantes serviços ambientais.

Entretanto, apesar do grande interesse no desempenho ambiental da agricultura, ainda não existem metodologias amplamente aceitas de medição que possam ser usadas 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 de qualidade do solo. A título de exemplo, o comitê técnico internacional ISO 190, “Qualidade do Solo”, propôs uma lista de 35 parâmetros (químicos, 17; físicos, 11; e biológicos, 7) como potenciais indicadores de qualidade de solo; a Agência de Proteção Ambiental Americana (US Environmental Protection Agency, EPA) propôs uma lista de 1,8 mil parâmetros como indicadores de

qualidade química do solo (Burns et al., 2006), enquanto, na Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) foram definidos 62 indicadores agroambientais (IAAs), abrangendo 11 grandes temas (Organization... 2013).

Assim 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 a 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 do País, visando ao alcance dos melhores resultados ambientais com maior retorno econômico, possibilitando mais inserção da agricultura brasileira na bioeconomia.

O desenvolvimento da tecnologia BioAS, baseada na utilização das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase e de índices de qualidade de solo (IQS), calibrados em relação ao rendimento de grãos e matéria orgânica (Mendes et al., 2021), coloca o Brasil na vanguarda mundial desse assunto, demonstrando que o monitoramento da saúde/qualidade do solo, não precisa, necessariamente, ser uma tarefa onerosa. Conforme apresentado nas Figuras 13, 14, 15 e 16, a combinação dos escores das funções Ciclar e Armazenar nutrientes, além de permitir que o agricultor saiba se o solo onde ele cultiva suas lavouras está saudável, adoecendo, doente ou em recuperação, pode ser utilizado como IAA (métricas) que permitem separar fazendas que investem em sistemas de manejo que favorecem a saúde do solo, daquelas em que ocorre o contrário.

Considerações finais

A percepção dos efeitos benéficos e o interesse na avaliação de aspectos relacionados à saúde do solo são crescentes entre agricultores e tomadores de decisão no meio rural, principalmente à medida em que a vulnerabilidade dos sistemas de produção intensivos e de grande escala aumentam em função da baixa adoção da rotação de culturas. A produtividade das lavouras, os

componentes de acidez e os teores de macro e micronutrientes não podem ser os únicos parâmetros para avaliar a saúde dos nossos solos.

O lançamento da tecnologia Embrapa BioAS, em julho de 2020, inaugurou, nas áreas sob cultivos anuais do bioma Cerrado, uma forma mais abrangente de avaliação da qualidade e saúde dos solos, indo além de questões relacionadas apenas à deficiência/excesso de nutrientes. Ao possibilitar a avaliação da saúde do solo, incluindo aspectos relacionados à ciclagem e ao armazenamento de nutrientes, a tecnologia BioAS fornece subsídios para tomadas de decisões sobre o manejo, visando à manutenção de lavouras produtivas e sustentáveis. Da mesma forma que investimentos na saúde dos trabalhadores revertem em benefícios econômicos para as empresas, investimentos na saúde do solo resultam em lavouras produtivas, com maior eficiência no uso de água e nutrientes. Ao investir em saúde do solo, independentemente da questão de agregação de valor aos produtos agrícolas ou a sua propriedade, o agricultor sai ganhando, pois, solos saudáveis além de produtivos são solos biologicamente ativos e resilientes, com melhor eficiência no uso de nutrientes, maior capacidade para armazenamento de água e biorremediação de pesticidas. Em adição a uma maior estabilidade produtiva, todos esses fatores resultam em mais lucratividade, tanto sob o ponto de vista de aspectos econômicos quanto ambientais.

Embora a BioAS seja o mais novo aliado para a sustentabilidade agrícola, a pesquisa precisa avançar, pois, de fato, inaugura-se uma forma mais abrangente de relacionamento com os solos, indo além das questões de deficiência/excesso de nutrientes. Na nova etapa de desenvolvimento da tecnologia, o objetivo é consolidar as bases científicas já desenvolvidas para os cultivos anuais e expandir o uso da BioAS para novas culturas (cana de açúcar, café, pastagens e plantios de eucalipto). Por meio do monitoramento da qualidade dos solos dos agroecossistemas brasileiros, espera-se difundir a importância estratégica da sustentabilidade nas cadeias produtivas associadas (biocombustível, café, carne, grãos e silvicultura) e fomentar o uso de sistemas de manejo conservacionistas que otimizam o uso dos insumos e fatores de produção, possibilitando a obtenção de altas produtividades com sustentabilidade. Dessa forma, como parte das rotinas de análise de solo, a ampliação do uso da BioAS favorecerá a inserção do país na bioeconomia, fornecendo métricas para atestar o crescimento agrícola com sustentabilidade. Um processo em que todos saem ganhando: o agricultor, o país, a sociedade e o planeta.

Referências

- ANGHINONI, G.; ANGHINONI, F.; TORMENA, C. A.; BRACCINI, A. L.; MENDES, I. C.; ZANCANARO, L.; LAL, R. Conservation agriculture strengthen sustainability of Brazilian grain production and food security. **Land Use Policy**, v. 108, p. 105591, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105591>.
- BANDICK, A. K.; DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, p. 1471-9, 1999. DOI: [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. DOI: doi.org/10.2136/sssabookser9.c1
- 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: 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>.
- KARLEN, D. L.; GOESER, N. J.; VEUM, K. S.; YOST, M. A. On-farm soil health evaluations: challenges and opportunities. **Journal of Soil Water Conservation**, v. 72, n. 2, p. 26A-31A, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.72.2.2>.
- LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. Conservation and enhancement of soil quality. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON EVALUATION FOR SUSTAINABLE LAND MANAGEMENT IN THE DEVELOPING WORLD, 1991, Chiang Rai, Thailand. **International Board for Soil Research and Management**: Technical papers. Bangkok: IBSRAM, 1991. p. 175-203.
- LARKIN, R. P. Soil health paradigms and implications for disease management. **Annual Review of Phytopathology**, v. 53, p. 199-221, 2015.
- 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. DOI: doi.org/10.3390/su7010988.

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.; REIS JUNIOR, 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.; DANTAS, O. D.; LOPES, A. A. de 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**, v. 388, n. 114880, 2021.

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.; 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**, v. 1, p. 98-105, 2017.

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. 10, p. 399-462, 2019a.

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.; OLIVEIRA, L. C. (org.). **Rotação de Culturas, bioindicadores e saúde do solo**. 19. ed. Rondonópolis: Fundação MT, 2020. v. 19, p. 102-110.

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**. 3rd ed. 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 Solo**, v. 32, p. 2735-2741, 2008. DOI: doi.org/10.1590/S0100-06832008000700017

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **OECD Compendium on Agri-Environmental Indicators**. Paris, 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1787/9789264186217-en> 2013

- PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R. Biological indicators of soil health: synthesis. In: PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R. (ed.). **Biological Indicators of Soil Health**. Wallingford: CAB International, 1997. p. 419-435.
- PORTILHO, I. I. R.; SCORZA JÚNIOR, R. P.; SALTON, J. C.; MENDES, I. M.; MERCANTE, F. M. Persistência de inseticidas e parâmetros microbiológicos em solo sob sistemas de manejo. **Ciãncia Rural**, v. 45, p. 22-28, 2015.
- 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: doi.org/10.2136/sssabookser9.c2.
- WARKENTIN, B. P. The changing concept of soil quality. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 50, p. 226-228, 1995.

Embrapa

Cerrados

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL