

CAPÍTULO 19

Bioanálise de Solo (BioAS): inovação no monitoramento da saúde do solo para uma agricultura tropical sustentável

Iêda de Carvalho Mendes

Fábio Bueno dos Reis Junior

Guilherme Montandon Chaer

Maria Inês Lopes de Oliveira

Ozanival Dario Dantas

Juaci Vitoria Malaquias

José Roberto Rodrigues Peres



Fotos: Fabiano Bastos (da esquerda para a direita
- 1, 2 e 3); Juliane Alves (da esquerda para a
direita - 4) e Louirival Vilela (primeiro plano).

19.1 Lavouras produtivas em solos saudáveis

Todo solo saudável é produtivo, mas nem todo solo produtivo é saudável. Isso ocorre porque o conceito de saúde do solo vai além da capacidade de produzir grãos, carne, energia e fibras. Um solo saudável é biologicamente ativo, capaz de infiltrar e armazenar água, sequestrar carbono, promover a ciclagem de nutrientes e a degradação de pesticidas, entre vários outros serviços. Portanto, solos saudáveis estão associados a plantas, animais, pessoas e ambientes saudáveis.

Embora seja possível obter lavouras produtivas em solos doentes ou em processo de degradação, essa condição só pode ser mantida com a utilização intensiva de adubos e pesticidas, o que é insustentável a longo prazo. A perda da saúde do solo ocorre devido ao uso de práticas de manejo não conservacionistas, como a monocultura, o uso excessivo de maquinário agrícola pesado, o revolvimento do solo e a ausência de cobertura vegetal. Por outro lado, solos saudáveis são formados mediante a adoção de boas práticas de manejo em longo prazo, o que os torna produtivos e resilientes, capazes de manter uma boa produtividade em situações adversas, como a falta de chuva durante o desenvolvimento das lavouras (Mendes et al., 2017; 2021a). Esses solos também promovem altos níveis de carbono orgânico no solo (COS), maior eficiência no uso de nutrientes pelas culturas, maior biodiversidade e supressão de doenças, além de originarem produtos de melhor qualidade.

Na Tabela 19.1, são apresentados dados que evidenciam aumentos médios de 686 kg ha⁻¹ (mais de 11 sacas) nos rendimentos da soja em áreas onde gramíneas forrageiras de raízes profundas do gênero *Brachiaria* (syn. *Urochloa*) foram cultivadas anteriormente, seja como cobertura vegetal ou como pastagem para animais (Marchão et al., 2024). O uso de espécies desse gênero é uma das melhores formas de manter ambientes edáficos saudáveis. Essas plantas podem ser consideradas excelentes condicionadoras químicas, físicas e biológicas do solo (Figura 19.1).

Tabela 19.1. Ganho de rendimento de soja em áreas onde gramíneas forrageiras de raízes profundas (*Brachiaria* spp.) foram cultivadas anteriormente com dupla finalidade, tanto como cobertura vegetal, quanto como pastagem para animais.

Referência	Produtividade de Soja (kg ha ⁻¹)			Ciclo de cultivo
	Sem braquiária	Com braquiária	Ganho	
Benites et al. (2014)	3.235	3.806	571	3
Vilela et al. (2011)	3.061	3.571	510	3
Vilela et al. (2018)	3.275	4.049	774	1
Dias et al. (2020)	3.492	4.340 ⁽¹⁾	848	2
Muniz et al. (2021)	3.409	4.600 ⁽²⁾	1.191	2
Davi et al. (2022)	3.187	3.531 ⁽³⁾	344	1
Chaer et al. (2023)	3.821	4.381	580	4
Média	3.354	4.040	686	

^(1, 2) Médias de cinco e dois tratamentos, respectivamente, com diferentes gramíneas de raízes profundas.

⁽³⁾ Consórcio combinando de espécies de gramíneas, trigo, niger e nabo.

Fonte: Marchão et al. (2024).



Foto: Lourival Vilela

Figura 19.1. Aspecto das raízes de braquiária no final da estação seca, numa fazenda localizada no Oeste Baiano.

No caso específico do Brasil, a expansão e o uso contínuo 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 (Mendes et al., 2024). A integração de pastagens e florestas às áreas sob cultivo de grãos em SPD (iLPF) também aumentou a complexidade dos agroecossistemas e alterou as relações entre os vários componentes do sistema agrícola (Figura 19.2).

Nesses sistemas conservacionistas, tem-se demonstrado que os aumentos de produtividade das culturas ou a manutenção da produção em condições ambientais adversas frequentemente não são explicados pelos resultados das análises químicas do solo (Drinkwater; Snapp, 2007; Nicolodi et al., 2008; Mendes et al., 2017, 2020). Dito isso, embora sejam importantes para a produtividade das lavouras, os componentes de acidez e os teores de macro e micronutrientes não são suficientes para avaliar a saúde dos solos. Essa constatação evidencia a necessidade de inclusão de parâmetros relacionados ao funcionamento biológico do solo (bioindicadores) nas análises de rotina, permitindo que os agricultores tomem decisões com base em informações mais completas.

Até julho de 2020, quando um agricultor envia uma amostra de solo para análise em laboratório, ele podia acessar apenas os aspectos químicos (componentes de acidez, matéria orgânica, 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: a ausência do componente biológico, base da saúde do solo (Lehman et al., 2015).

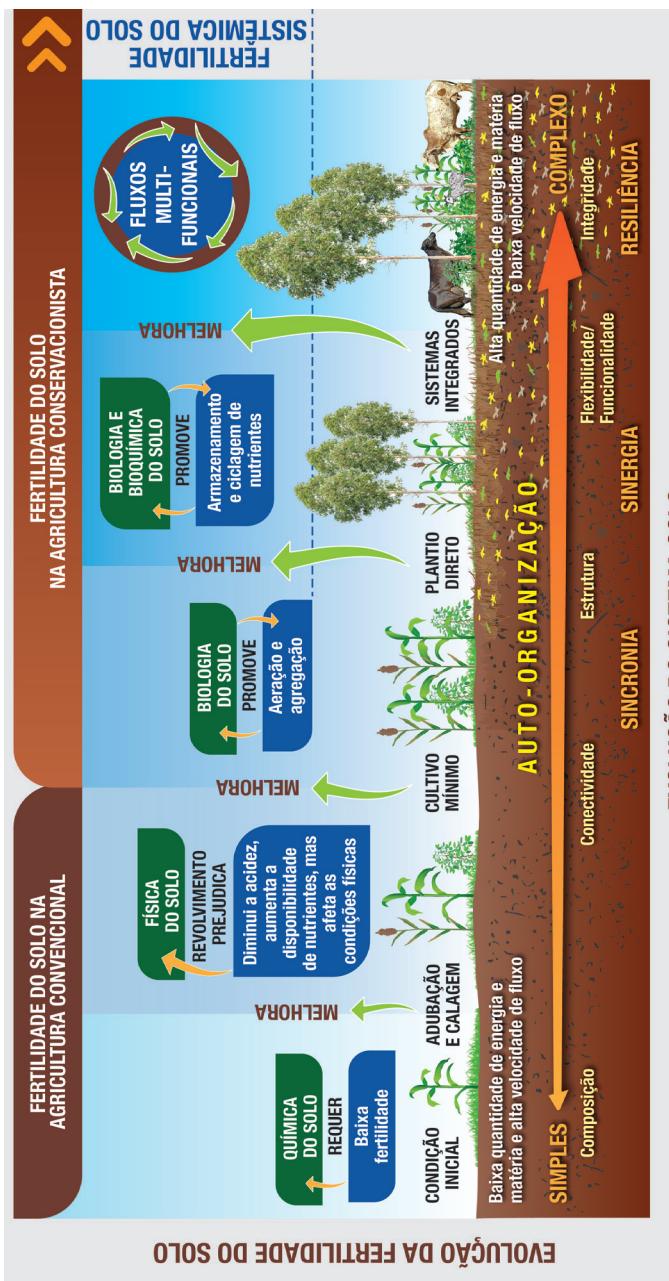


Figura 19.2. Evolução do sistema solo, desde a monocultura convencional até a integração lavoura-pecuária-floresta sob plantio direto. À medida que o sistema de manejo evolui, a complexidade e resiliência aumenta.

Fonte: adaptado de Anghinoni & Vezzani, 2021).

Ilustração: Wellington Cavalcanti

Enquanto as plantas conectam a atmosfera ao solo por meio da fotossíntese, a “maquinaria biológica” do solo (macro, meso e microrganismos) é responsável pelo seu funcionamento, participando de processos desde sua gênese até a decomposição de resíduos orgânicos. Esses processos resultam na ciclagem dos nutrientes minerais que as plantas utilizam e armazenam em seus tecidos (Mendes et al., 2019a). Ao influenciar a formação e a decomposição da matéria orgânica do solo (MOS), o componente biológico afeta também sua estrutura, refletindo na dinâmica da água e nos processos de sequestro ou perda de carbono, além da mitigação ou emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Mendes et al., 2021a). A capacidade do solo de fornecer esses serviços ambientais essenciais é a base do conceito de saúde do solo. Por isso, é fundamental incluir parâmetros biológicos (bioindicadores) nas análises de rotina do solo.

Nos últimos 25 anos, o grupo de pesquisa em saúde do solo da Embrapa dedicou-se à seleção de bioindicadores robustos, permitindo que o agricultor brasileiro monitore a saúde de seu solo com clareza sobre o que avaliar, por que avaliar, como e quando avaliar e, principalmente, como interpretar os resultados (Mendes et al., 2018, 2019a). Em uma iniciativa pioneira em nível mundial, a Tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo (BioAS) foi lançada em julho de 2020 para agregar o componente biológico às análises químicas tradicionais de rotina do solo (Figura 19.3).

Quatro anos após o lançamento da tecnologia BioAS, este capítulo apresenta uma síntese das bases de desenvolvimento dessa tecnologia e de como ela é utilizada para avaliar a saúde dos solos e, indiretamente, a qualidade das práticas de manejo empregadas. Também são apresentados os principais tipos de laudos fornecidos pela BioAS, com foco em seu uso como suporte para decisões de manejo nas áreas agrícolas. Além disso, é apresentada uma nova funcionalidade da BioAS, que permite avaliar tendências de ganho ou perda de carbono no solo por meio de um Modelo de Quatro Quadrantes, relacionando o COS e a atividade enzimática.

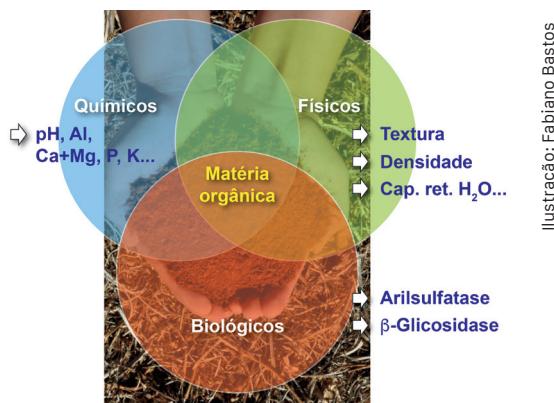


Ilustração: Fabiano Bastos

Figura 19.3. A Tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo (BioAS) consiste na agregação de dois indicadores relacionados ao funcionamento da maquinaria biológica do solo (atividade das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase) às análises de rotina, preenchendo a lacuna deixada pela ausência do componente biológico nas análises de solo.

19.2 Como acessar a “memória” do solo e avaliar sua saúde

As práticas de manejo empregadas, bem como a qualidade e a quantidade dos resíduos vegetais aportados ao solo, moldam as interações entre os diversos componentes dos sistemas agrícolas, deixando uma espécie de “impressão digital” ou “assinatura biológica” única no solo (Figura 19.4). A capacidade do solo de registrar em sua “memória” o histórico de manejo está intimamente relacionada ao seu componente biológico, o qual pode ser mensurado por meio de alguns bioindicadores.

Algumas enzimas hidrolíticas estão entre os bioindicadores capazes de acessar a “memória do solo”, pois são produzidas por diversos grupos de organismos vivos, como microrganismos, plantas e animais (componente biótico), e refletem gerações passadas desses organismos que estiveram presentes no solo (componente abiótico) (Mendes et al., 2019a). As enzimas que constituem o componente abiótico es-

tão 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 MOS (Wallenstein & Burns, 2011) (Figura 19.5).

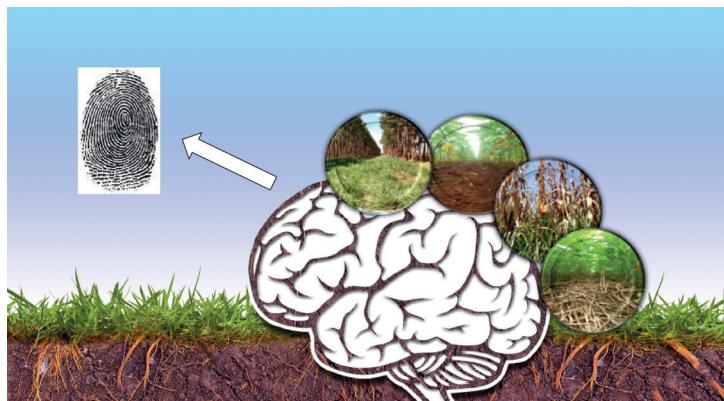


Ilustração: Fabiano Bastos

Figura 19.4. Os sistemas de manejo deixam suas marcas na “memória” do solo.

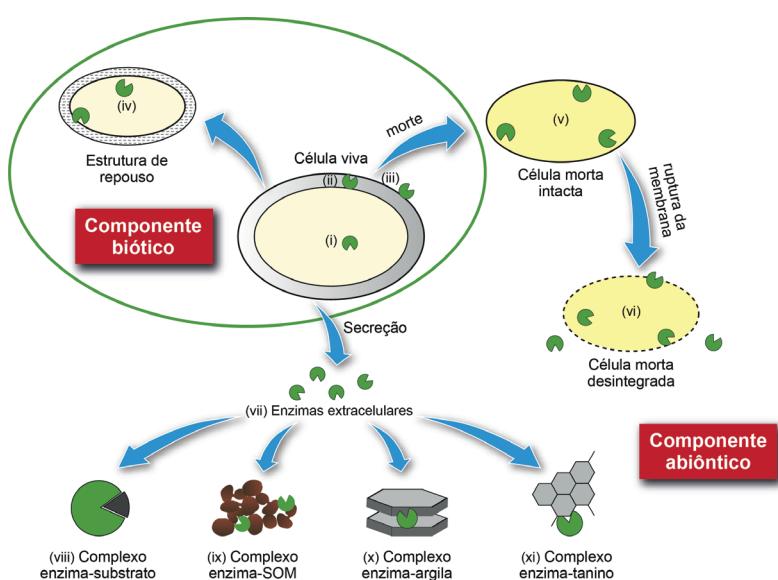


Figura 19.5. Esquema ilustrativo da localização das enzimas nos compartimentos solo. (Adaptado de Wallenstein e Burns, 2011).

A capacidade do solo de estabilizar e proteger enzimas está relacionada à sua aptidão para armazenar e estabilizar a MOS (afinal, a enzima é uma molécula orgânica) e a 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 crescimento da atividade biológica) pode ser um prenúncio de que o sistema está favorecendo o acúmulo de matéria orgânica no solo.

Na Figura 19.6, observa-se que o aumento da atividade biológica, evidenciado pela atividade enzimática, constitui o primeiro degrau na escala de qualidade do solo. Com o passar do tempo, esse crescimento na atividade biológica pode resultar no aumento da MOS, impactando positivamente a qualidade química (por exemplo, melhor armazenamento e disponibilização de nutrientes) e física (como melhoria na estrutura do solo, refletindo-se no armazenamento e na infiltração de água).

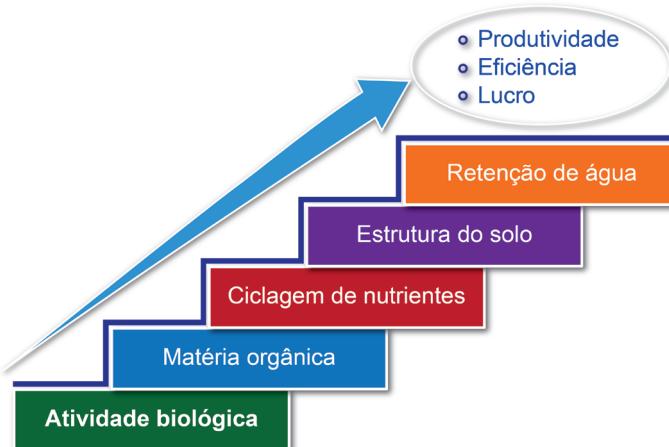


Figura 19.6. Fluxograma demonstrando que, em função de melhorias no sistema de manejo, o aumento na atividade biológica é o primeiro degrau na escalada da melhoria de um solo. (Adaptado de Hatfield, 2017).

19.3 Como avaliar a saúde do solo com a BioAS?

A tecnologia BioAS foi desenvolvida para auxiliar o agricultor a realizar o diagnóstico da saúde do solo por meio da análise e interpretação das atividades das enzimas arilsulfatase (Aril) e β -glicosidase (Beta), juntamente às análises tradicionais de fertilidade (Figura 19.7). Em seu estágio atual, a tecnologia BioAS está calibrada para atender áreas sob cultivos anuais de grãos no Cerrado e no sul do Brasil, abrangendo uma área em torno de 45 milhões de hectares cultivados.

Como avaliar?	Coletar o solo na profundidade 0 cm a 10 cm, seguindo os mesmos princípios da amostragem de solo tradicional para análises químicas.
Quando avaliar?	Após a colheita das lavouras (preferencialmente, após o milho safrinha).
Para onde encaminhar as amostras?	Laboratórios da Rede Embrapa BioAS que estão habilitados a realizar as análises de β -glicosidase e a 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, as pontuações para as funções ciclar, armazenar e suprir nutrientes e os índices de qualidade do solo referentes à cada amostra.

Figura 19.7. Etapas para realização da BioAS. Da amostragem de solo à interpretação dos resultados. Em seu estágio atual (outubro de 2024), a tecnologia BioAS está formatada para atender áreas sob cultivos anuais de grãos no Cerrado e no Sul do Brasil.

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 iLPF.

Para viabilizar a BioAS, além da seleção dos bioindicadores mais adequados, houve a necessidade de interpretar 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 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 baseou-se 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 biológicos 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: baixo ($\leq 40\%$ do RRA), moderado (de 41 a 80% do RRA) e adequado ($> 80\%$ do RRA).

Ao agregar o componente biológico às análises de solo, a BioAS possibilita uma visão do solo que vai além do excesso ou da falta de nutrientes, podendo ser utilizada como suporte para a tomada de decisão sobre o manejo do solo na propriedade agrícola. De forma análoga às tabelas de interpretação de teores de nutrientes no solo, as tabelas de interpretação de bioindicadores, além de estabelecerem valores de referência, fornecem informações sobre a eficácia dos sistemas de produção e/ou práticas de uso da terra e seus impactos sobre a saúde do solo. Por exemplo, um valor de teste "baixo" para as enzimas bioindicadoras pode ser um indicativo 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 neles a necessidade de mudança por meio da adoção de práticas conservacionistas. Da mesma forma, a BioAS serve como incentivo e estímulo para agricultores que já adotam sistemas de manejo conservacionistas, os quais podem utilizá-la para demonstrar a eficiência das práticas adotadas.

As primeiras tabelas de interpretação dos bioindicadores para solos do Cerrado (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. Entretanto, 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 biologia 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 do solo (realizada na fase de pós-colheita) e dos procedimentos de pré-tratamento das amostras (com secagem do solo ao ar antes da realização das análises laboratoriais). Em termos práticos, a adoção do conceito FertBio de amostragem do solo foi vantajosa para os agricultores e para os laboratórios comerciais, resultando em redução dos custos operacionais.

É importante destacar que não foi possível unificar a profundidade de coleta das amostras de solo no campo. A amostragem para avalia-

ção dos aspectos químicos do solo geralmente é efetuada utilizando a profundidade de 0 a 20 cm ou estratificando de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm (Mendes et al., 2021a). Para a BioAS, o solo precisa ser coletado na profundidade de 0 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 a 10 cm como camada diagnóstica para a BioAS, principalmente em áreas sob SPD e/ou com mínimo preparo do solo, maximiza a sensibilidade dos bioindicadores, impedindo que possíveis efeitos na saúde do solo, decorrentes do uso e do manejo, sejam diluídos quando a amostragem é feita na profundidade de 0 a 20 cm.

19.4 Vantagens da utilização dos bioindicadores arilsulfatase e β -glicosidase

Em todos os experimentos e áreas de produção avaliados, as enzimas Aril e Beta, em conjunto ou separadamente, foram os indicadores que, de forma consistente, 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 fundamental para a saúde do solo, e com o rendimento de grãos, indicador que reflete o aspecto econômico das lavouras, essencial para a sustentabilidade do negócio agrícola (Lopes et al., 2013, 2018; Mendes et al., 2019a). Na Figura 19.8, são apresentadas as características que tornaram vantajosa a utilização da Aril e da Beta na tecnologia BioAS, permitindo a seleção de apenas dois indicadores para expressar o funcionamento da maquinaria biológica dos solos.

A título de comparação, o programa *Comprehensive Assessment of Soil Health* (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 opcionais (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 nesse tema, ao possibilitar a inclusão de métricas cuja interpretação tem como base o rendimento das lavouras e a MOS.

- Parâmetros integradores relacionados a todos os componentes biológicos do solo (plantas, animais e microrganismos).
- Sensibilidade para detectar mudanças no solo.
- Relacionadas ao funcionamento do solo (ciclagem de nutrientes).
- Relacionadas ao rendimento de grãos das lavouras e à matéria orgânica do solo.
- Correlacionadas com diversos atributos biológicos (carbono da biomassa microbiana, respiração basal, fosfatase ácida, celulase, desidrogenase, etc.)
- Resultados são interpretáveis: alto, médio e baixo.
- Simplicidade analítica.
- Não influenciadas por adubos e calcário.
- Adequação ao conceito FertBio de amostragem de solo.
- Custo de análise, precisão, coerência e reproduzibilidade.

Figura 19.8. Características que influenciaram na seleção das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase para a Tecnologia Embrapa de Bioanálise do Solo (BioAS).

Conforme ilustrado na Figura 19.5, a atividade enzimática total de um solo corresponde ao somatório da atividade enzimática dos organismos vivos (plantas, microrganismos e animais) e das enzimas abió-

ticas. Isso confere às determinações das atividades das enzimas aril-sulfatase e β -glicosidase duas vantagens importantes: são parâmetros integradores relacionados a todos os componentes biológicos do solo (plantas, animais e microrganismos) e não estão associadas somente ao componente vivo, podendo estar adsorvidas a partículas de argila e à matéria orgânica. Dessa maneira, funcionam como “impressões digitais” dos sistemas de manejo aos quais o solo foi submetido no passado, permitindo, assim, 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, uma vez que requerem apenas incubadores com temperatura controlada e espectrofotômetros na faixa do visível, equipamentos comumente encontrados nesses locais. Em outubro de 2024, o Brasil possuía 33 laboratórios comerciais habilitados pela Embrapa para determinações de atividade enzimática do solo.

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

Uma inovação importante atrelada ao uso da BioAS é o cálculo de índices para avaliar o desempenho de funções-chave do solo e a integração dessas funções para avaliar a qualidade química ($IQS_{Químico}$), biológica ($IQS_{Biológico}$) ou global do solo ($IQS_{Fertbio}$), conforme apresentado na Figura 19.9.

Os cálculos dos índices da tecnologia BioAS baseiam-se no conceito proposto por Karlen e Stott (1994), que considera a capacidade do solo de funcionar para prestar serviços produtivos e ambientais. As três funções do solo avaliadas estão relacionadas à capacidade do solo de ciclar nutrientes (F1), baseada na atividade das enzimas Aril

e Beta; de armazenar nutrientes (F2), baseada nas determinações da CTC e da MOS; e de suprir nutrientes (F3), baseada nas análises de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , P disponível, pH, H $+\text{Al}$, Al^{3+} , soma de bases e saturação por bases (Mendes et al., 2021a). Todos os índices variam de 0 a 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, maior o desempenho da função ou a qualidade do solo. Semelhante à estratégia utilizada para interpretar os valores de atividade enzimática, todos os IQS e os escores das funções são calibrados em relação ao rendimento de grãos e à MOS (Mendes et al., 2021a).

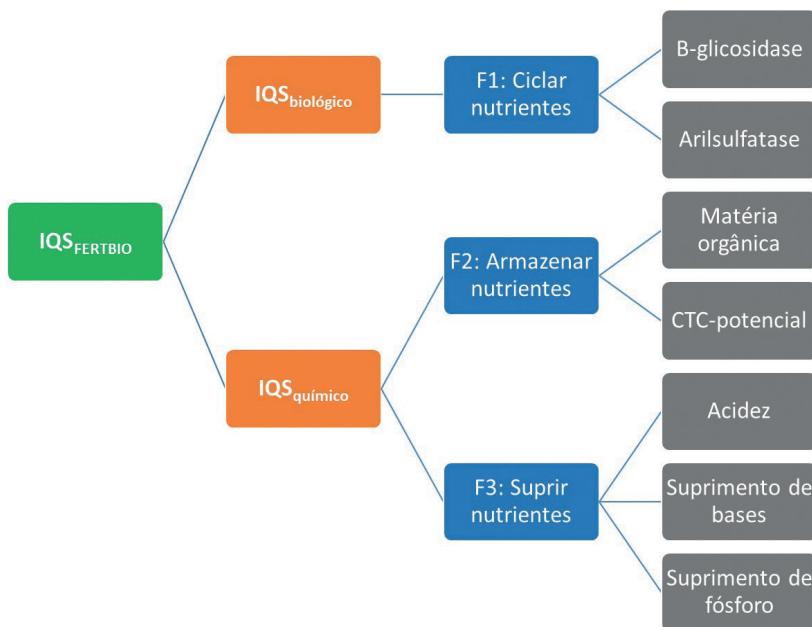


Figura 19.9. Representação esquemática do modelo utilizado para o cálculo do IQS_{FERTBIO}, IQS_{BIOLÓGICO} e IQS_{QUÍMICO}.

A F1 tem por objetivo estimar o desempenho da atividade biológica e dos processos dela derivados, direta ou indiretamente, como a ciclagem de nutrientes e a formação e decomposição da MOS. A F2 visa avaliar o tamanho do reservatório de nutrientes do solo, o qual está

principalmente relacionado à textura, à qualidade das argilas e ao conteúdo e à qualidade da MOS. Já a F3 quantifica os macronutrientes disponíveis no reservatório do solo, assim como aspectos relacionados à acidez do solo. Cada análise ou indicador dessas funções é individualmente interpretado por meio de funções de pontuação (Karlen; Stott, 1994), que transformam o valor do indicador em uma nota na escala entre zero e um (Figura 19.10).

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

Figura 19.10. Escala de qualidade cromática usada para classificar os índices apresentados no laudo da BioAS.

O cálculo dos índices apresentados torna o laudo da BioAS muito distinto de um laudo tradicional de fertilidade do solo, conforme apresentado nas Tabelas 19.2 e 19.3. Em ambas as tabelas, as linhas representam diferentes talhões da propriedade agrícola. No laudo da BioAS, entretanto, as colunas representam, da esquerda para a direita, os valores dos níveis de atividade enzimática, o conteúdo de MOS, os três índices de qualidade do solo (IQS) – IQS_{Fertbio}, IQS_{Biológico} e IQS_{Químico} – e os escores das três funções: F1 (ciclar nutrientes), F2 (armazenar nutrientes) e F3 (suprir nutrientes). Os valores de atividade enzimática, da MOS, dos índices e dos escores das funções são classificados em um padrão cromático semafórico, em que verde-escuro ou verde-claro indicam valores adequados; amarelo, valores intermediários; e laranja ou vermelho, valores baixos.

Tabela 19.2. Laudo tradicional de análise de química de solo de vários talhões de uma fazenda no Mato Grosso.

Amostra	Análise de química de solo									
	pH (H ₂ O)	AI	Ca	H+Al	Mg	CTC	SB	P (Mehlich1)	K	V%
 me/100cc									
1001 LV01	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

P: fosforo disponível (Mehlich1); SB: soma de bases; V: saturação de bases.

Tabela 19.3. Laudo da BioAS de vários talhões de uma fazenda no Mato Grosso gerado pela plataforma Módulo de Interpretação da Qualidade do Solo (MIQS).

Amostra	Aril ⁽¹⁾	Beta ⁽²⁾	MOS ⁽³⁾	IQS _{Fertibio}	IQS _{Biológico}	IQS _{Químico}	Cicular Nutrientes	Armazenar Nutrientes	Suprir Nutrientes
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

⁽¹⁾Aril: aril sulfatase (mg pNP /kg/h).

⁽²⁾Beta = β-glicosidase (mg pNP/kg/h).

⁽³⁾MOS = matéria orgânica do solo (g/kg)

Fonte: Walkley e Black (1934).

Células verdes indicam escores adequados, amarelas escores intermediários, enquanto laranjas ou vermelhas indicam escores baixos para cada indicador, função ou índice de qualidade do solo. Como exemplo, o talhão 1004 12 tem escores no grupo verde, então deve estar recebendo um bom manejo, enquanto, o talhão LV 104 tem, na sua maioria, escores nas cores laranja e vermelho, o que significa que esse talhão necessita de estratégias recuperadoras da saúde do solo.

19.6 Relações entre funções do solo e a qualidade do manejo

A partir do laudo da BioAS, verificam-se diferentes padrões que podem fornecer indicações relevantes sobre a qualidade do uso e do manejo do solo em determinada área. Isso é possível por meio da análise dos padrões de cores atribuídos às funções F1 e F2, que podem ser classificados como estáveis ou de transição.

Os padrões estáveis ocorrem, geralmente, quando o uso e o manejo do solo são praticados a longo prazo em determinada área (acima de cinco 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 que F1 e F2 apresentam cores próximas ou similares. Por exemplo, se ambas estão em tonalidades verdes (claro ou escuro), o solo é considerado saudável ou de alta qualidade, indicando-se a manutenção das práticas de manejo já em curso. Por outro lado, quando F1 e F2 estão simultaneamente nas cores laranja ou vermelha, o solo é considerado doente ou de baixa qualidade, recomendando-se a reavaliação e possível alteração das práticas de manejo ou de todo o sistema de produção adotado. Seguindo essa mesma lógica, se F1 e F2 estão na cor amarela, a condição do solo também é estável, mas em um nível intermediário de saúde ou qualidade. Esses padrões são sintetizados na Figura 19.11.

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

Figura 19.11. 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-escura ou verde-clara significam valores adequados; amarela, valores intermediários; e laranja ou vermelha, valores baixos.

Diferentemente dos padrões estáveis, os padrões de transição geralmente ocorrem em áreas onde houve mudanças significativas no uso e no manejo do solo em um período relativamente recente (normalmente, até três anos). Nessas situações, pode ocorrer um desequilíbrio temporário entre os níveis de MOS e a atividade biológica, o que, dependendo do caso, poderá levar a saúde do solo a níveis mais baixos ou mais elevados do que os atualmente apresentados.

Os padrões de transição podem ser identificados no laudo da BioAS quando há discrepância entre as cores atribuídas às funções F1 e F2, podendo indicar basicamente duas condições do solo:

- a) A primeira ocorre quando F1 apresenta-se nas cores laranja ou vermelha (classes "baixo" ou "muito baixo"), enquanto F2 está nas cores verdes (classes "alto" e "muito alto") (Figura 19.12). Isso indica que o solo está em processo de perda de qualidade ou "adoecendo". Esse fenômeno decorre do fato de que, sob manejo inadequado, a queda na atividade enzimática do solo ocorre primeiro, pois essa é mais sensível e se reduz mais rapidamente que a MOS, cujas alterações acontecem de forma mais lenta e gradual. O padrão F1 baixo e F2 alto (solo adoecendo) permite alertar precocemente o agricultor de que as práticas de manejo em curso poderão comprometer a saúde do solo em médio ou longo prazo. Assim, diante desse tipo de laudo, é necessária uma avaliação criteriosa das práticas adotadas na propriedade agrícola, para que práticas regenerativas sejam implementadas com urgência, evitando perdas nos teores de MOS. Se nenhuma ação for tomada, a tendência é que a qualidade de F2 também decline ao longo do tempo, passando da cor verde para a vermelha.
- 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 19.12). Nesse caso, um solo previamente doente (com comprometimentos nas funções relacionadas à ciclagem e ao

armazenamento de nutrientes) começa a se recuperar. Como as enzimas são mais sensíveis a esse processo, a F1 melhora rapidamente nos primeiros anos após a implementação de novas práticas de uso e manejo do solo. Nessa situação, a recomendação é a manutenção das práticas de manejo adotadas, pois, a longo prazo, F2 também atingirá uma condição elevada 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 19.12. 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.

É importante destacar que, para essas classificações, os escores da função F3 (suprir nutrientes) não são considerados. Diferentemente de F1 e F2, que são interdependentes e influenciadas pelo uso e pelo manejo do solo de forma ampla (por exemplo, sistema de plantio e rotação de culturas), a F3 está diretamente relacionada ao manejo da adubação e da 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 (com F1 e F2 baixas) não o torna saudável. Da mesma forma, um solo ácido e pobre em nutrientes não é necessariamente um solo doente, como ocorre frequentemente com solos sob vegetação natural. Portanto, é possível que um solo apresente alta fertilidade química (F3 elevada) e, ainda assim, esteja biologicamente degradado devido a práticas de manejo inadequadas. Aliás, esse é um dos grandes diferenciais da BioAS: a capacidade de diferenciar solos quimicamente similares, mas biologicamente distintos.

19.7 Análise de laudos de propriedades agrícolas do Cerrado

Nas Figuras 19.13, 19.14, 19.15 e 19.16, são apresentados exemplos de quatro tipos de laudos de propriedades agrícolas da região do Cerrado. Na Figura 19.13, o aspecto visual do laudo da BioAS, com predominância da cor verde, indica que os talhões da propriedade agrícola estavam em excelente condição quanto às funções “F1 – Ciclar” e “F2 – Armazenar”, evidenciando um solo saudável. Conforme discutido anteriormente, em situações como essa, recomenda-se a manutenção das práticas de manejo adotadas na propriedade.

AMOSTRA	ARIL	BETA	MOS	ARGILA	IQS FERTBIO	IQS Biológico	IQS Químico	CICLAGEM Nutrientes	ARMAZ. Nutrientes	SUPRIMENTO Nutrientes
108043 Th. 24 - 01 0-10	156	202	40	56	0,90	0,88	0,91	0,88	0,93	0,89
108044 Th. 24 - 02 0-10	159	174	40	51	0,92	0,91	0,93	0,91	0,97	0,89
108045 Th. 05 - 01 0-10	187	233	45	51	0,94	0,97	0,93	0,97	0,98	0,88
108046 Th. 06 - 01 0-10	191	191	42	51	0,93	0,94	0,93	0,94	0,97	0,89
108047 Th. 06 - 02 0-10	204	201	48	48,5	0,95	0,97	0,94	0,97	0,99	0,89
108048 Th. 08 - 01 0-10	197	213	45	51	0,94	0,96	0,93	0,96	0,98	0,89
108049 Th. 08 - 02 0-10	211	219	47	53,5	0,94	0,96	0,94	0,96	0,98	0,89
108050 Th. 9 12 - 01 0-10	184	215	43	48,5	0,95	0,97	0,94	0,97	0,98	0,89
108051 Th. 13 c po de rocha - 01 0-10	205	180	45	53,5	0,92	0,92	0,92	0,92	0,96	0,88
108052 Th. 13 c po de rocha - 02 0-10	201	160	47	51	0,92	0,91	0,93	0,91	0,98	0,88
108053 Th. 14 - 01 0-10	189	167	43	56	0,90	0,87	0,91	0,87	0,94	0,89
108054 Th. 14 - 02 0-10	164	176	42	48,5	0,94	0,94	0,94	0,94	0,98	0,89
108055 Th. 15 - 01 0-10	124	181	41	43,5	0,94	0,95	0,93	0,95	0,99	0,88
108056 Th. 15 - 02 0-10	147	192	42	43,5	0,95	0,97	0,93	0,97	0,99	0,88
108057 Th. 16 - 01 0-10	161	166	47	43,5	0,94	0,96	0,94	0,96	0,99	0,88
108058 Th. 16 - 02 0-10	130	152	43	41	0,94	0,95	0,94	0,95	0,99	0,88
108059 Th. 17 - 01 0-10	122	131	43	41	0,93	0,92	0,94	0,92	0,99	0,88
108060 Th. 17 - 02 0-10	161	171	42	38,5	0,95	0,98	0,93	0,98	0,99	0,88
108061 Th. 18 19 - 01 0-10	199	190	46	51	0,94	0,95	0,94	0,95	0,99	0,89
108062 Th. 18 19 - 02 0-10	203	176	47	48,5	0,94	0,95	0,94	0,95	0,99	0,89
108063 Th. 20 - 01 0-10	185	132	46	53,5	0,90	0,84	0,93	0,84	0,96	0,89
108064 Th. 20 - 02 0-10	201	136	46	53,5	0,91	0,85	0,93	0,85	0,98	0,89
108065 Th. Furna 30 - 01 0-10	141	172	47	46	0,94	0,94	0,94	0,94	0,99	0,89
108066 Th. Furna 30 - 02 0-10	139	158	45	48,5	0,92	0,90	0,94	0,90	0,99	0,89
108067 Th. Furna 60 - 01 0-10	219	144	48	56	0,90	0,85	0,92	0,85	0,96	0,89
108068 Th. Furna 60 - 02 0-10	215	169	44	56	0,91	0,89	0,91	0,89	0,94	0,89

Figura 19.13. 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.

Na Figura 19.14, o laudo mostra a predominância de tons vermelhos e alaranjados na coluna “ciclagem”, indicando que o solo está em processo de degradação do ponto de vista biológico, ou seja, que está adoecendo. É 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 do que nas enzimas. Diante desse cenário, aconselha-se uma avaliação criteriosa das práticas de manejo que vêm sendo adotadas na propriedade agrícola, a fim de evitar perdas nos teores de MOS em médio ou longo prazo.

ID Amostra	ID Campo	ARIL	BETA	MOS	ARGILA	IQS FERTBIO	IQS Biológico	IQS Químico	CICLAGEM Nutrientes	ARMAZ. Nutrientes	SUPRIMENTO Nutrientes
1	TH L01 - 01 - B	25	30	41	59	0,66	0,32	0,83	0,32	0,80	0,85
2	TH L01 - 02 - B	29	38	43	63	0,66	0,34	0,82	0,34	0,80	0,84
3	TH L01 - 03 - B	51	50	46	59	0,73	0,46	0,87	0,46	0,88	0,86
4	TH L01 - 01 - B	27	37	41	51	0,71	0,37	0,88	0,37	0,91	0,84
5	TH L01 - 02 - B	27	44	47	53	0,73	0,39	0,90	0,39	0,96	0,84
6	TH L01 - 03 - B	8	74	45	60	0,68	0,36	0,84	0,36	0,91	0,78
7	TH L02 - 01 - B	28	39	57	55	0,74	0,37	0,93	0,37	0,99	0,86
8	TH L02 - 02 - B	21	36	40	55	0,68	0,33	0,85	0,33	0,85	0,85
9	TH L02 - 03 - B	14	17	43	59	0,63	0,24	0,83	0,24	0,87	0,79
10	TH 05 - 01 - B	22	35	35	62	0,57	0,32	0,70	0,32	0,60	0,80
11	TH 05 - 02 - B	36	62	43	57	0,73	0,45	0,86	0,45	0,88	0,85
12	TH 05 - 03 - B	25	44	42	63	0,65	0,35	0,81	0,35	0,79	0,83
13	TH 05 - 01 - B	38	69	35	51	0,70	0,51	0,80	0,51	0,76	0,84
14	TH 05 - 02 - B	42	72	34	52	0,70	0,53	0,78	0,53	0,71	0,85
15	TH 05 - 03 - B	40	87	37	53	0,75	0,55	0,85	0,55	0,80	0,90
16	TH 12 - 01 - B	27	40	40	54	0,66	0,37	0,81	0,37	0,86	0,76
17	TH 12 - 02 - B	16	28	35	65	0,55	0,27	0,69	0,27	0,59	0,78
18	TH 12 - 03 - B	25	27	47	62	0,69	0,31	0,88	0,31	0,92	0,85
19	TH 12 - 01 - B	9	24	44	64	0,61	0,23	0,80	0,23	0,83	0,77
20	TH 12 - 02 - B	14	24	40	59	0,68	0,26	0,88	0,26	0,83	0,94
21	TH 12 - 03 - B	36	40	52	55	0,74	0,40	0,92	0,40	0,98	0,86
22	TH 15 - 01 - B	16	33	36	55	0,62	0,31	0,77	0,31	0,74	0,81
23	TH 15 - 02 - B	24	45	49	57	0,72	0,36	0,90	0,36	0,95	0,85
25	TH 15 - 01 - B	26	32	37	54	0,67	0,35	0,83	0,35	0,78	0,88
26	TH 16 - 01 - B	22	44	41	63	0,66	0,34	0,82	0,34	0,78	0,85
27	TH 15 - 02 - B	27	49	50	51	0,74	0,41	0,91	0,41	0,98	0,84
28	TH 16 - 02 - B	27	38	42	58	0,69	0,35	0,86	0,35	0,86	0,86
29	TH 15 - 03 - B	21	46	44	56	0,70	0,36	0,87	0,36	0,89	0,85
30	TH 16 - 03 - B	20	38	44	57	0,69	0,33	0,88	0,33	0,90	0,85
31	TH 16 - 01 - B	19	36	45	55	0,70	0,33	0,89	0,33	0,92	0,86
32	TH 16 - 02 - B	14	33	50	49	0,71	0,31	0,91	0,31	0,99	0,83
33	TH 16 - 03 - B	9	34	41	62	0,63	0,26	0,81	0,26	0,76	0,86
34	TH 19 - 01 - B	35	65	47	60	0,74	0,44	0,88	0,44	0,92	0,85
35	TH 19 - 02 - B	33	49	46	57	0,72	0,41	0,88	0,41	0,92	0,84
36	TH 19 - 03 - B	28	55	38	60	0,65	0,39	0,79	0,39	0,73	0,84
37	TH 19 - 01 - B	26	30	52	47	0,70	0,36	0,87	0,36	1,00	0,74
38	TH 19 - 02 - B	33	52	47	51	0,74	0,44	0,89	0,44	0,97	0,80
39	TH 19 - 03 - B	18	33	43	58	0,63	0,31	0,79	0,31	0,86	0,72
40	TH 25 - 01 - B	18	46	45	59	0,65	0,34	0,80	0,34	0,89	0,72
41	TH 25 - 02 - B	26	41	44	56	0,70	0,36	0,87	0,36	0,91	0,83
42	TH 25 - 01 - B	35	46	51	50	0,76	0,43	0,92	0,43	0,99	0,86
43	TH 25 - 02 - B	41	48	44	55	0,73	0,44	0,87	0,44	0,91	0,84
44	TH 33 - 01 - B	26	61	52	55	0,73	0,42	0,89	0,42	0,99	0,79
45	TH 33 - 02 - B	17	42	43	60	0,67	0,32	0,85	0,32	0,89	0,81
46	TH 33 - 01 - B	11	29	46	57	0,65	0,27	0,85	0,27	0,93	0,76
47	TH 33 - 01 - B	11	81	46	52	0,75	0,43	0,91	0,43	0,96	0,86

Figura 19.14. 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/alaranjados 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.

À medida que o processo de adoecimento do solo se intensifica, o comprometimento dos aspectos biológicos, evidenciado pela função "F1 – Ciclar", resulta em perdas nos teores de MOS, de modo que, na função "F2 – Armazenar", passa a ocorrer o predomínio das cores alaranjada e vermelha. Essa situação é demonstrada no laudo da Figura 19.15. Perdas de matéria orgânica e redução da atividade biológica indicam uma situação de solo doente, na qual práticas de manejo regenerativas precisam ser adotadas com urgência.

ID Amostra	ID Campo	ARIL	BETA	MOS	ARGILA	IQS FERTBIO	IQS Biológico	IQS Químico	CICLAGEM Nutrientes	ARMAZ. Nutrientes	SUPRIMENTO Nutrientes
1	Lav. 134	51	27	22	57	0,51	0,41	0,57	0,41	0,30	0,83
2	Lav. 155	59	42	24	60	0,52	0,46	0,55	0,46	0,29	0,81
3	Lav. 89	41	69	18	34	0,67	0,65	0,68	0,65	0,60	0,77
4	Lav. 141	28	30	21	48	0,53	0,37	0,61	0,37	0,44	0,77
5	Lav. 147	41	36	23	55	0,51	0,41	0,57	0,41	0,33	0,80
6	Lav. 60	29	35	23	56	0,53	0,36	0,62	0,36	0,38	0,85
7	Lav. 45	37	56	24	54	0,57	0,45	0,63	0,45	0,43	0,82
8	Lav. 29	41	67	23	59	0,57	0,47	0,61	0,47	0,37	0,86
9	Lav. 137	60	84	28	62	0,56	0,56	0,56	0,56	0,35	0,78
10	Lav. 15	43	70	24	59	0,58	0,49	0,63	0,49	0,39	0,86
11	Lav. 14	50	69	25	58	0,59	0,51	0,63	0,51	0,41	0,86
12	Lav. 136	40	29	23	49	0,54	0,41	0,61	0,41	0,44	0,77
13	Lav. 156	58	46	21	58	0,52	0,48	0,53	0,48	0,25	0,81
14	Lav. 50	38	32	19	53	0,47	0,39	0,51	0,39	0,18	0,83
15	Lav. 51	48	39	19	53	0,50	0,45	0,53	0,45	0,25	0,81
16	Lav. 23	46	63	24	61	0,57	0,47	0,62	0,47	0,38	0,87
17	Lav. 25	50	87	25	64	0,59	0,52	0,63	0,52	0,37	0,88
18	Lav. 29	9	54	16	56	0,40	0,33	0,43	0,33	0,08	0,78
19	Lav. 19	41	66	30	70	0,55	0,42	0,61	0,42	0,39	0,83
20	Lav. 21	48	56	27	60	0,60	0,46	0,67	0,46	0,48	0,87
21	Lav. 28	53	76	22	61	0,57	0,52	0,59	0,52	0,32	0,86
22	Lav. 35A	12	47	15	40	0,42	0,38	0,44	0,38	0,20	0,67

Figura 19.15. Laudo da BioAS de amostras de solos doentes. Os tons verdes indicam valores adequados, os tons laranja-vermelho, valores inadequados e em amarelo, valores intermediários, para os resultados de análises de arilsulfatase (ARIL), β -glicosidase (BETA) e matéria orgânica do solo (MOS), assim como para os índices e funções do solo apresentados. O laudo indica as funções ciclagem de nutrientes e armazenamento de nutrientes predominantemente em níveis intermediários a inadequados, indicando solos com níveis baixos e estáveis de carbono orgânico e atividade biológica. Dados obtidos pelos laboratórios da Rede Embrapa de BioAS.

Já o laudo apresentado na Figura 19.16 demonstra um solo doente (com comprometimentos nas funções "F1 – Ciclar" e "F2 – Armazenar") em início de recuperação. Conforme ilustrado na Figura 19.6, na escalaada de melhoria de um solo, o componente biológico é o primeiro a ser impactado. Assim, os níveis de atividade enzimática, representados na

função “F1 – Ciclar”, encontram-se em patamares elevado e muito elevado (verde-clara e verde-escura), enquanto os escores da função “F2 – Armazenar” permanecem nos níveis baixo e muito baixo (laranja e 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, o que, por sua vez, refletirá em elevação dos escores da função “F2 – Armazenar”. O tempo necessário para que isso ocorra dependerá das condições edafoclimáticas de cada local e das práticas regenerativas adotadas (intensidade e duração).

A sensibilidade das enzimas como bioindicadores, capazes de detectar precocemente se o solo está em processo de adoecimento ou de recuperação, fica evidente nos laudos transicionais apresentados nas Figuras 19.14 e 19.16. Nesses laudos, as enzimas atuam como mensageiras de más notícias (Figura 19.14) e de boas notícias (Figura 19.16).

AMOSTRA	ARIL	BETA	MOS	ARGILA	IQS FERTBIO	IQS Biológico	IQS Químico	CICLAGEM Nutrientes	ARMAZ. Nutrientes	SUPRIMENTO Nutrientes
8009_SEDE 1	71	79	11	46	0,58	0,64	0,55	0,64	0,24	0,86
8010_SEDE 2	68	60	16	42	0,65	0,64	0,66	0,64	0,44	0,88
8011_SEDE 3	65	78	18	48	0,57	0,58	0,56	0,58	0,27	0,85
8012_MARIQUINHA 1	82	90	13	44	0,54	0,73	0,45	0,73	0,14	0,75
8013_MARIQUINHA 2	104	104	14	38	0,57	0,89	0,40	0,89	0,26	0,55
8014_MARIQUINHA 2 AREA 1	75	65	15	44	0,52	0,64	0,45	0,64	0,31	0,60
8015_AREA EDIO 1	82	85	14	32	0,55	0,89	0,38	0,89	0,26	0,49

Figura 19.16. Laudo da BioAS de amostras de solo em recuperação. Os tons verdes indicam valores adequados, os tons laranja-vermelho, valores inadequados e em amarelo, valores intermediários, para os resultados de análises de arilsulfatase (ARIL), β-glicosidase (BETA) e matéria orgânica do solo (MOS), assim como para os índices e funções do solo apresentados. O laudo indica a função ciclagem de nutrientes em nível adequado e a função armazenamento de nutrientes em nível inadequado, indicando solos com alta atividade biológica e tendência a ganho de carbono orgânico. Dados obtidos pelos laboratórios da Rede Embrapa de BioAS).

Atualmente, em muitas fazendas do Cerrado, as decisões de manejo do solo são influenciadas por aspectos operacionais e econômicos, em detrimento dos aspectos agronômicos. A BioAS contribuirá para a

adoção de sistemas conservacionistas que incrementam a saúde do solo, reforçando a percepção sobre a importância da presença de solos saudáveis para a manutenção de lavouras produtivas. Ao fornecer informações que normalmente passam despercebidas nas análises químicas convencionais do solo, a BioAS antecipa fenômenos que podem impactar negativamente o desempenho econômico das lavouras, levando o(a) responsável pelas decisões na propriedade rural a, pelo menos, refletir sobre o assunto.

A presença de enzimas bioindicadoras nas análises comerciais de rotina, evidenciando como está o funcionamento da maquinaria biológica do solo, representa um desafio para agrônomos(as) e técnicos(as) do setor rural, pois exigirá, muitas vezes, uma reavaliação das práticas de manejo adotadas na propriedade agrícola e soluções customizadas, específicas para cada fazenda.

Semelhante a um exame de sangue, no qual, por meio da determinação de vários parâmetros, pode-se avaliar o estado de saúde de um indivíduo, a BioAS serve para avaliar a saúde do solo. No exame de sangue, é possível detectar problemas assintomáticos de saúde humana, como taxas elevadas de colesterol. De forma análoga, a BioAS detecta problemas assintomáticos de saúde do solo, antes que esses se revertam em perdas de produtividade nas lavouras. Dessa maneira, a BioAS serve para alertar sobre a necessidade de 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, a mudança de postura pode envolver 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, ou seja, biologicamente mais ativos e produtivos. Os laudos gerados pela tecnologia BioAS auxiliarão significativamente nesse processo de mudança de postura.

19.8 O modelo de quatro quadrantes (M4Q) da BioAS para avaliar tendências de ganho ou perda de C no solo

Em 2023, nosso grupo de pesquisa publicou o artigo intitulado *Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities* (Chaer et al., 2023), no qual foi proposto um método expedido para avaliar tendências de ganho ou perda de carbono no solo. Esse método, baseado em um modelo de quatro quadrantes (M4Q), permite avaliar se o COS se apresenta estável ou em processo de transição, ou seja, em tendência de ganho ou perda (Figura 19.17). Esses padrões são facilmente identificados em um gráfico que relaciona os valores da atividade enzimática específica média (AEM) da Aril e Beta com o COS obtido na camada de 0–10 cm.

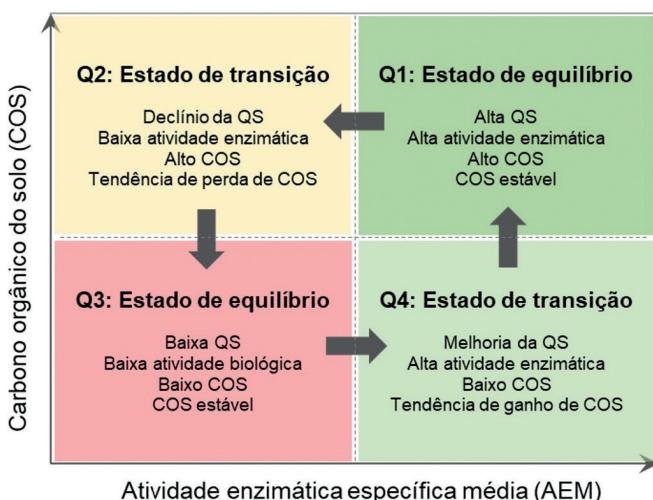


Figura 19.17. Representação esquemática do modelo de quatro quadrantes para avaliar as tendências de C no solo usando um gráfico de dispersão de atividade enzimática específica média (AEM) versus carbono orgânico do solo (COS). (Q: quadrante; QS: qualidade do solo).

O M4Q é fundamentado em quatro premissas importantes para a compreensão das tendências de ganho ou perda de carbono no solo:

- 1) As enzimas Aril e Beta são mais sensíveis ao tipo de uso do solo ou às mudanças no sistema de manejo do que o COS.
- 2) Mudanças na atividade de Aril, Beta e no COS ocorrem na mesma direção, mas as enzimas, por serem bioindicadores altamente sensíveis, mudam em um ritmo mais rápido.
- 3) Áreas sob as mesmas práticas de uso e manejo do solo por um longo período atingem um estado de equilíbrio entre a atividade das duas enzimas e o COS.
- 4) Devido à primeira premissa, áreas que sofrem mudanças recentes e significativas nas práticas de manejo agrícola, que incrementam ou degradam a saúde do solo, apresentam um desacoplamento do equilíbrio entre atividade enzimática e COS.

Considerando um gráfico de dispersão que apresenta a relação entre AEM e COS, é possível definir quatro estados de saúde do solo, representados em quatro quadrantes distintos (Figura 19.17). O primeiro e o terceiro quadrantes indicam estados de equilíbrio do solo, enquanto o segundo e o quarto quadrantes indicam estados transitórios. O quadrante 1 (Q1) representa solos de alta qualidade, saudáveis e com elevados níveis de AEM e COS. Esses são solos em que boas práticas de manejo foram adotadas por um longo período. A introdução de práticas de manejo inadequadas em solos de alta qualidade pode resultar em uma rápida redução da AEM, levando o solo a se deslocar de Q1 para Q2 (Figura 19.17). Caso as práticas de manejo inadequadas persistam por longo prazo, o COS também diminui, atingindo um estado de equilíbrio inferior, compatível com o nível mais baixo de AEM anteriormente alcançado. Isso trará a condição do solo para o estado de equilíbrio de baixa qualidade em Q3 (Figura 19.17).

Um solo de baixa qualidade pode ser recuperado com a introdução de práticas de manejo conservacionistas. Quando essas práticas são implementadas em solos no estado de equilíbrio em Q3, há uma res-

posta do componente biológico, e a atividade enzimática (ARIL e BETA) aumenta rapidamente, enquanto o COS não apresenta aumento imediato. Dessa forma, o solo passa para o quadrante 4 (Q4, alta atividade enzimática e baixo COS). Mantidas as práticas conservacionistas de manejo por longo prazo, o COS eventualmente atinge novo patamar (mais elevado), compatível com a atividade enzimática estabelecida anteriormente, levando o solo ao estado de equilíbrio de alta qualidade em Q1 (Figura 19.17).

É importante notar que as mudanças no estado de saúde do solo ao longo dos quatro quadrantes ocorrerão no sentido anti-horário (ver as setas na Figura 19.17), desde que as mudanças nas práticas de manejo do solo que eventualmente desacoplam os estados de equilíbrio sejam mantidas ao longo do tempo. Isso ocorre porque o AEM, que representa a atividade enzimática, sempre aumentará ou diminuirá mais rapidamente que o COS.

O M4Q constitui mais uma funcionalidade da BioAS e foi desenvolvido a partir de dados gerados em experimentos de longa duração, envolvendo doses e modos de aplicação de fósforo, idealizados e conduzidos pelo pesquisador Djalma Martinhão Gomes de Souza (*in memoriam*), e validado em fazendas da região do Cerrado com solos saudáveis, adoecendo, doentes e em recuperação (Chaer et al., 2023).

É possível demonstrar as relações entre o M4Q e os quatro padrões típicos de laudos da BioAS, tomando como exemplo o conjunto de dados das 102 amostras de solo de cinco fazendas comerciais localizadas na região do Cerrado, apresentadas no item anterior (Figuras 19.13, 19.14, 19.15 e 19.16). Essas fazendas apresentavam solos sob cultivos anuais e com históricos de manejo contrastantes. As fazendas foram classificadas em quatro grupos, constituídos por solos saudáveis, adoecendo, doentes e em recuperação (grupos 1, 2, 3 e 4, respectivamente), conforme os resultados da BioAS. Um breve histórico das áreas das fazendas de cada grupo é fornecido a seguir:

- Grupo 1 (Laudo da Figura 19.13): representado por áreas com histórico de manejo conservacionista em longo prazo. Constituem

26 talhões (média de 65 ha) de uma fazenda em Chapadão do Sul, no estado de Mato Grosso do Sul ($18^{\circ}46'S$, $52^{\circ}37'W$), cultivados desde 1970. De 1970 a 1980, as áreas foram cultivadas com arroz e pastagens. O cultivo da soja iniciou-se em 1980. No período de 2000 até 2015, a fazenda cultivou soja e milho em rotação, sob plantio direto. De 2015 em diante, o milho, cultivado em primeira safra (plantio em outubro) ou segunda safra (plantio em fevereiro), é sucedido por culturas de cobertura como nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), *Crotalaria spectabilis* e braquiária (*Urochloa ruziziensis*). As lavouras estão em plantio direto e iLP.

- Grupo 2 (Laudos das Figura 19.14): representado por áreas com adoção recente de manejo não conservacionista. Constituem 47 talhões (média de 120 ha) de uma fazenda em Tapurah, estado de Mato Grosso ($12^{\circ}44'S$, $56^{\circ}30'W$), que começou a ser cultivada na safra 2012/2013. Desde 2016, a fazenda é cultivada com soja e algodão em rotação, sem a presença de plantas de cobertura. Houve uma operação de preparo mecânico (gradagem pesada) em 2019, dois anos antes da amostragem do solo (2021).
- Grupo 3 (Laudo da Figura 19.15): representado por áreas com manejo não conservacionista em longo prazo. Constituem 22 talhões de duas fazendas localizadas em Diamantino (média de 220 ha; $14^{\circ}24'S$, $56^{\circ}26'W$) e Querência (média de 180 ha; $12^{\circ}35'S$, $52^{\circ}12'W$), no estado de Mato Grosso. A fazenda de Diamantino (Fazenda 3.1; talhões de 1 a 16) começou a ser cultivada na safra 2001/2002. Desde 2017, a fazenda é cultivada com soja e algodão em rotação, sem culturas de cobertura. A última operação de preparo mecânico (gradagem pesada) também ocorreu em 2017 (quatro anos antes da amostragem de solo em 2021). As áreas de Querência (Fazenda 3.2; talhões 17 a 22) são cultivadas desde 2013/2014, e prevalece a monocultura de soja. A última operação de preparo mecânico (gradagem pesada) ocorreu em 2018, três anos antes da amostragem de solo em 2021.

- Grupo 4 (Lindo da Figura 19.16): representado por áreas com adoção recente de manejo conservacionista. Constituem sete talhões (média de 25 ha) de uma fazenda em Jandaia, estado de Goiás ($17^{\circ}02'S$, $50^{\circ}08'W$), cultivada de 2002 até 2018 com soja sob preparo convencional (aração com arado de discos e gradagem), sem plantas de cobertura. A adoção de práticas agrícolas regenerativas começou em 2019, quando foi iniciado o cultivo de soja sob plantio direto, em sucessão com uma mistura de braquiária (*U. ruziziensis*) e sorgo (*Sorghum vulgaris*).

Em todas as fazendas, os solos eram do tipo Latossolo Vermelho distrófico argiloso típico, com teores de argila variando de 48% a 60%. Todas as fazendas apresentavam teores adequados de macronutrientes, além de pontuarem nas classes alta ou muito alta na função suprimento de nutrientes da BioAS. Os dados de localização e as propriedades químicas dessas fazendas são apresentados na Tabela 19.4.

Tabela 19.4. Localização, área (ha) e média das propriedades químicas do solo (0–10 cm profundidade) das fazendas agrupadas em quatro grupos quanto ao histórico de manejo⁽¹⁾.

Fazenda/ Grupo	Município/ Estado	Área (ha)	pH (CaCl ₂)	H+Al ³⁺	CTC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P
						----- cmolc dm ⁻³ -----	(mg dm ⁻³)		
1/1	Chapadão do Sul/MS	1.467	5,6	3,6	12,5	6,2	2,0	263	29
2/2	Tapurah/MT	22.175	5,2	5,4	11,3	4,2	1,7	132	32
3.1/3	Diamantino/MT	45.725	5,1	3,8	7,6	2,8	0,8	57	13
3.2/3	Querência/MT	19.873	5,5	2,6	6,4	2,3	1,2	76	12
4/4	Jandaia/GO	188	5,2	2,2	6,4	2,9	1,0	58	13

⁽¹⁾Segundo Sousa; Lobato (2004), para sistemas de produção de grãos em Latossolos argilosos do Cerrado os níveis de adequação são os seguintes: pH (CaCl₂): 4,9 a 5,5; CTC: 9,1 a 13,5 cmolc dm⁻³; Ca²⁺: 1,5 a 7,0 cmolc dm⁻³; Mg²⁺: 0,5 a 2,0 cmolc dm⁻³; K: 57 a 80 mg dm⁻³; e P: 8,1 a 12 mg dm⁻³.

Fonte: Sousa; Lobato (2004),

Na Tabela 19.5, é apresentada a média dos dados de Aril, Beta, COS, AEM, teores de argila e rendimento de grãos dos talhões nas fazendas dos quatro grupos, considerando o período de 2018 a 2021. Nessa tabela, também são apresentadas as médias de aplicação de P_2O_5 ha^{-1} e K_2O ha^{-1} nessas fazendas durante o mesmo período.

Tabela 19.5. Teores médios de: argila, níveis de atividade enzimática (Aril e Beta), carbono orgânico do solo (COS), atividade enzimática específica média (AEM), rendimento de soja (Grãos) e teores de P_2O_5 e K_2O (P–K) utilizados nas fazendas de referência dos grupos 1 a 4 no período de 2018 a 2021.

Fazenda/ Grupo	Município/ Estado	Argila (%)	Aril	Beta	COS	AEM ⁽¹⁾	Grãos	$P/K^{(2)}$ ($kg\ ha^{-1}$)
			(mg PNP $kg^{-1}\ h^{-1}$)	g kg^{-1}				
1/1	Chapadão do Sul/MS	50	177	177	25,7	6,9	4.351	80/90
2/2	Tapurah/MT	57	25	44	25,3	1,4	3.926	73/87
3.1/3	Diamantino/ MT	55	43	45	13	3,0	3.692	36/87**
3.2/3	Querência/MT	52	28	49	12	4,0	3.900	87/93
4	Jandaia/GO	43	78	80	8,4	9,7	4.410	92/98

⁽¹⁾AEM: (Aril + Beta)/2)/COS. Valores expressos em g PNP kg^{-1} COS h^{-1} .

⁽²⁾P/K: $kg\ P_2O_5\ ha^{-1}$ e $kg\ K_2O\ ha^{-1}$.

⁽³⁾Nesta fazenda, a aplicação de doses menores de adubo fosfatado na soja é compensada pela utilização de doses mais elevadas na cultura do algodão.

As áreas foram amostradas na profundidade de 0 a 10 cm durante a fase de pós-colheita, entre abril e julho de 2021, ao final da estação chuvosa. Com o objetivo de normalizar as atividades das enzimas em função do teor de COS, o valor da atividade de cada enzima (Aril e Beta) foi dividido pelo COS, resultando na atividade específica de Aril (AE-Aril) e Beta (AE-Beta), respectivamente (Trasar-Cepeda et al., 2008 a,b):

$$AE\text{-Aril} = Aril/COS$$

$$AE\text{-Beta} = Beta/COS$$

A Atividade Enzimática Específica Média (AEM) foi calculada com base na média de AE-Aril e AE-Beta:

$$\text{AEM} = (\text{AE-Aril} + \text{AE-Beta})/2$$

A AEM é expressa em g p-nitrofenol kg⁻¹ COS h⁻¹ (= g PNP kg⁻¹ COS h⁻¹).

O processo de definição das linhas de corte do M4Q foi descrito detalhadamente em Chaer et al. (2023). Em resumo, as linhas de corte para o COS (15,5 g kg⁻¹) e para a atividade enzimática específica média (AEM: 4,3) foram definidas com base em 50% do rendimento acumulado de grãos (RAG) obtido em experimentos de longa duração conduzidos em latossolos argilosos na Embrapa Cerrados. Esses valores foram utilizados para definir o M4Q em um gráfico de dispersão AEM vs. COS, separando os dados obtidos nesse experimento, conforme apresentado. Na Figura 19.18, é apresentada a representação gráfica do M4Q com a plotagem das amostras de solo coletadas nas fazendas de referência dos grupos de 1 a 4, em que cada grupo de amostras foi separado em um dos quatro quadrantes.

Com base na plotagem das amostras das fazendas de referência dos grupos de 1 a 4 no M4Q (Figura 19.18), observou-se:

- 1) Todas as amostras de solo do grupo 1 foram plotadas em Q1, indicando solos com níveis elevados e estáveis de carbono orgânico e atividade biológica (alto COS/alto AEM). Este grupo representa áreas sob iLP em plantio direto desde 2015. Além da presença de animais pastejando em solos sob braquiária com sistema radicular profundo. Essa foi sucedida pela soja ou soja/milho, com um esquema de rotação de culturas de cobertura com crotalária, nabo forrageiro e sorgo, também amplamente adotado nessa fazenda. Os sistemas de iLP são considerados uma forma estratégica de intensificação ecológica que se beneficia do sinergismo entre solo, plantas e animais. Esses sistemas possuem características únicas, que incluem a diversificação das atividades agrícolas e a promoção de funções agrícolas complexas que garantem maior produtividade, rentabilidade e sustentabilidade (Lemaire et al., 2014; Salton et al., 2014; Anghinoni; Vezzani, 2021).

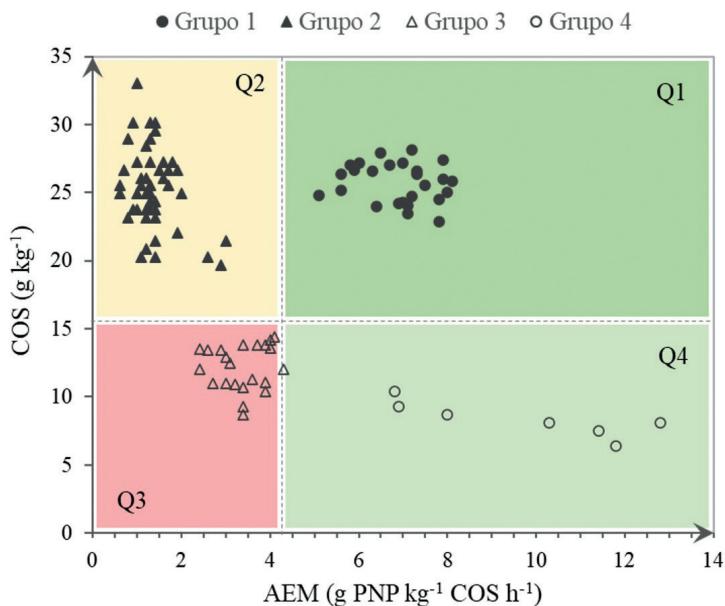


Figura 19.18. Amostras de solo (0 a 10 cm) do conjunto de dados das fazendas de referência dos grupos 1 a 4 plotadas no modelo de quatro quadrantes. As linhas de limite nos eixos x (AEM) e y (COS) foram definidas com base em 50% do rendimento acumulado de grãos (RAG) obtido em experimentos de longa duração conduzidos em latossolos argilosos na Embrapa Cerrados. Maiores detalhes podem ser obtidos em Chaer et al. (2023).

- 2) Todas as amostras de solo do grupo 2 foram plotadas em Q2, indicando solos com baixa atividade biológica e com tendência a perda de carbono orgânico (alto COS/baixo AEM). Este grupo inclui áreas recentemente convertidas para agricultura (menos de 10 anos) e sob sistemas intensivos de produção de soja/algodão sem culturas de cobertura.
- 3) Todas as amostras de solo, exceto uma (localizada na intersecção entre Q3 e Q4) do grupo 3, foram plotadas em Q3, indicando a predominância de solos com níveis baixos e estáveis de carbono orgânico e atividade biológica (baixo COS/baixo AEM). Este grupo é composto por duas fazendas. A primeira é culti-

vada há mais de 20 anos (soja e milho). Desde 2017, vem sendo cultivada com sistemas de produção mais intensivos de soja/algodão, sem plantas de cobertura. Na segunda fazenda, cultivada há oito anos, predomina a monocultura da soja (desde 2013). Ambas as fazendas não tinham histórico de uso de plantas de cobertura nos quatro anos anteriores a esse estudo. Os sistemas de produção de algodão e soja, com baixa entrada de biomassa, possuem alto potencial de lucratividade, mas historicamente têm sido prejudiciais à sustentabilidade dos recursos naturais (Reeves, 1997; Mbuthia et al., 2015; Lopes et al., 2021; Ferreira et al., 2020).

- 4) Todas as amostras de solo do grupo 4 foram plotadas em Q4, indicando solos com alta atividade biológica e tendência a ganho de carbono orgânico (baixo COS/alto AEM). Este grupo incluiu uma fazenda cultivada de 2002 a 2018 com soja sob preparo convencional (aragem de discos e gradagem) sem plantas de cobertura. Desde 2019, são adotadas práticas agrícolas regenerativas, como o plantio direto, e a soja é plantada em sucessão com uma mistura de braquiária e sorgo.

Além de aspectos relacionados ao tamanho das fazendas (200 ha a 45.000 ha) e aos sistemas de produção (iLP, soja/algodão, monocultivo de soja, soja/milho + braquiária), que influenciam diretamente os procedimentos operacionais diários das lavouras, há um aspecto muito importante que merece ser destacado com base na Figura 19.18 e nos dados apresentados na Tabela 19.5: o desempenho econômico das fazendas nos diferentes grupos. Os rendimentos médios de grãos de soja dos últimos quatro anos (kg ha^{-1}) nas fazendas dos grupos 1 e 4 (solos saudáveis ou em recuperação) foram de 4.351 e 4.410, respectivamente, enquanto, nas fazendas dos grupos 2 e 3 (solos em degradação ou degradados), foram de 3.926 e 3.717, respectivamente (Tabela 19.5). Esse padrão mostra claramente os benefícios de um ambiente com solo saudável (de alta qualidade) para a obtenção de maiores produtividades.

Outro aspecto interessante é que, embora as fazendas dos grupos 2 e 3 tenham apresentado as menores produtividades, estas foram superiores à média brasileira de produtividade da soja em 2020/2021, equivalente a 3.525 kg ha⁻¹ (Conab, 2022). Ou seja, os dados mostram que os níveis de produtividade nessas fazendas poderiam ser ainda maiores, caso manejos conservacionistas fossem adotados, de modo a modificar a condição desses solos para aquelas definidas nos quadrantes Q4 e Q1. Esses dados reforçam a importância da presença de solos saudáveis para a manutenção de lavouras de alta produtividade.

Por fim, outro aspecto que merece destaque é que, à exceção da fazenda 3, em que a aplicação reduzida de P₂O₅ na soja é compensada por uma maior adubação no algodão, os níveis médios de adubação da soja (kg P₂O₅ ha⁻¹; kg K₂O ha⁻¹) nas demais fazendas foram semelhantes. Níveis diferenciados de rendimento de grãos, associados a níveis semelhantes de adubação, evidenciam maior eficiência de uso de nutrientes nas fazendas onde o solo é saudável ou está em processo de regeneração (Q1 e Q4). Isso demonstra mais uma vantagem dos solos saudáveis, que vai além dos níveis de produtividade.

É possível relacionar o M4Q com os quatro padrões típicos de laudos da BioAS, conforme demonstrado na Figura 19.19. Um aspecto importante que deve ser destacado nos laudos das Figuras 19.13 a 19.16 é que, com exceção de três talhões, todos os demais, das cinco fazendas avaliadas, obtiveram pontuação verde para a "F3 – Suprir Nutrientes". Isso indica que os solos estavam com acidez corrigida e níveis adequados de disponibilidade de macronutrientes para as culturas, conforme verificado na Tabela 19.4. Enquanto F1 e F2 são interdependentes e influenciadas pelo uso e manejo do solo de forma mais ampla (por exemplo, sistema de plantio, rotação de culturas, iLP etc.), a F3 está diretamente relacionada ao manejo da adubação e da calagem do solo. O suprimento adequado de nutrientes é tão crucial quanto a ciclagem e o armazenamento, em um contexto de uso do solo para produção de alimentos, fibras ou energia. Um solo empobrecido em nutrientes dificilmente alcançará altas produtividades, que são essenciais para promover a maquinaria biológica do solo e a formação e o acúmulo de

MOS em longo prazo. Entretanto, como já mencionado, apenas condições químicas adequadas não garantem solos saudáveis e produtivos.

Tipo de laudo	Função ciclagem de nutrientes (enzimas)	Função armazenamento de nutrientes (MOS+CTC)	Modelo de quatro quadrantes / Tendência COS
1 - Solo "saudável" / alta qualidade	Alta	Alta	Q1 / estável
2 - Solo "adoecendo" / perda de qualidade	Baixa	Alta	Q2 / perda
3 - Solo "doente" / baixa qualidade	Baixa	Baixa	Q3 / estável
4 - Solo "recuperando" / ganho de qualidade	Alta	Baixa	Q4 / ganho

Figura 19.19. Principais tipos de laudo da BioAS encontrados em fazendas de produção de grãos, definidos em função das pontuações das funções ciclagem de nutrientes (associada à atividade enzimática) e armazenamento de nutrientes (associada à matéria orgânica e CTC) (Mendes et al., 2021a) e a relação destes padrões com o modelo de quatro quadrantes.

19.9 Como funciona a BioAS

O uso da BioAS em escala comercial, desde julho de 2020²², é uma inovação pioneira no mundo, alinhada ao objetivo da Embrapa de viabilizar tecnologias que promovam a sustentabilidade das atividades agrícolas com equilíbrio ambiental. Para isso, a Embrapa está capacitando uma rede de laboratórios comerciais de análise de solo na realização das análises das enzimas Aril e Beta. Os resultados das análises realizadas pelos laboratórios associados a essa rede são encaminhados à Embrapa para interpretação, com base em algoritmos desenvolvidos para diferentes tipos de solo. O laudo gerado é repassado ao laboratório, que o encaminha ao seu cliente.

Para integrar a Rede Embrapa BioAS, os laboratórios passam por rigorosos treinamentos teóricos e práticos. A confiabilidade dos resultados gerados em todo o país é garantida pela padronização dos métodos analíticos e dos protocolos de amostragem de solo. Além disso, os laboratórios da rede se submetem a testes interlabororiais que asseguram padrões de excelência nas análises.

²² Acesse este link para saber mais sobre a bioanálise do solo: <https://youtu.be/IBJYc30aFas>

Após a habilitação, esses laboratórios se conectam a um servidor da Embrapa por meio da plataforma web denominada Módulo de Interpretação da Qualidade do Solo da Tecnologia BioAS (MIQS). Além de interpretar os valores de atividade enzimática e MOS, indicando se estão baixos, moderados ou elevados, a plataforma MIQS também pontua as funções de ciclagem, armazenagem e suprimento de nutrientes e calcula os IQS com base nas propriedades químicas e biológicas em conjunto ($\text{IQS}_{\text{Fertibio}}$) e separadamente ($\text{IQS}_{\text{Biológico}}$ e $\text{IQS}_{\text{Químico}}$).

Em 15/10/2024, 33 laboratórios comerciais capacitados pela Embrapa e credenciados na Rede BioAS utilizavam essa tecnologia, com outros 31 em fase de capacitação. Em 17 de outubro de 2024, o banco de dados da BioAS continha 43.267 amostras provenientes de 1.265 municípios dos 27 estados brasileiros, tornando-se o maior banco de dados de saúde do solo do mundo. Com base nesse universo amostral, dinâmico e em constante expansão, é possível determinar o estado de saúde do solo (saudável, em recuperação, adoecendo ou doente) nas áreas de produção dos municípios usuários da BioAS. Em médio prazo, espera-se disponibilizar esse banco para consulta pública, tornando o Brasil o primeiro país a criar uma Plataforma Nacional de Saúde dos Solos, com mapas interativos geoespecializados. Isso apoiará o desenvolvimento de práticas e políticas públicas mais eficientes para a conservação e promoção da saúde do solo, visando ao uso racional de insumos e ao incentivo às boas práticas de manejo.

19.10 Considerações finais

Diante dos cenários de uma população mundial crescente, agravamento dos extremos climáticos, limitação cada vez mais acentuada de recursos naturais e insumos agrícolas, além de guerras na Europa e no Oriente Médio, produzir alimentos saudáveis e de forma ambientalmente sustentável é uma tarefa desafiadora. A agricultura global terá de produzir mais com menos, aumentando a pressão sobre o uso do solo. Considerando esses cenários delicados e preocupantes, a sociedade mundial passou a exigir, cada vez mais, de todo o setor produtivo

— e, principalmente, dos governantes — a formulação de políticas que possam criar um ambiente propício para que agricultores e proprietários de terra adotem práticas sustentáveis que ajudem a preservar a saúde do solo e, consequentemente, o meio ambiente. Esses fatos aumentam significativamente a importância do uso de indicadores da saúde do solo no monitoramento das práticas conservacionistas adotadas no manejo dos sistemas agrícolas.

O desenvolvimento da tecnologia BioAS, baseada na utilização das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase e de índices de qualidade do solo calibrados em relação ao rendimento de grãos e à matéria orgânica (Mendes et al., 2021b), colocou o Brasil na vanguarda mundial desse assunto, demonstrando que o monitoramento da saúde do solo não precisa, necessariamente, ser uma tarefa onerosa. Ao possibilitar a avaliação da saúde do solo, a tecnologia BioAS fornece subsídios para a tomada de decisões sobre o manejo, visando à manutenção de lavouras produtivas e sustentáveis em solos saudáveis — um processo em que todos saem ganhando: o agricultor, a sociedade e o meio ambiente.

Em 2024, o grupo de saúde do solo da Embrapa iniciou, em parceria com o Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR), um projeto voltado ao diagnóstico da saúde do solo no Polo de Agricultura Irrigada do Planalto Central de Goiás (PAIPCG). A Política Nacional de Irrigação (PNI – Lei nº 12.787, de 11 de janeiro de 2013) é regida pelo princípio do uso e manejo sustentável dos solos e dos recursos hídricos destinados à irrigação. É importante considerar que as perspectivas para a agricultura irrigada envolvem produtividade e rentabilidade aliadas à eficiência no uso da água, energia e insumos, sempre com respeito ao meio ambiente. Nesse contexto, a evolução tecnológica dos sistemas de irrigação, por si só, é insuficiente para alcançar tais objetivos. Em um sistema de produção irrigado, os insumos que mais impactam os custos de produção são a energia e a água. Isso reforça a importância da adoção de práticas de manejo sustentáveis, visando à maximização de todos os fatores de produção e, ao mesmo tempo, à preservação da saúde do solo e do meio ambiente.

Diante disso, com base nas amostras de solo coletadas nesse projeto, será possível identificar o percentual de áreas classificadas como saudáveis, em recuperação, adoecendo ou doentes nas áreas do PAIPCG. Esse diagnóstico, pioneiro no Brasil, possibilitará a implementação de ações de conservação e recuperação, promovendo a saúde do solo e, assim, assegurando a produtividade sustentável das lavouras irrigadas. Com isso, busca-se fortalecer a produção agrícola da região, estabelecendo uma base de solos saudáveis que sustentem a atividade no longo prazo. Os cenários futuros demandam a construção de uma agricultura resiliente, eficiente e multifuncional. A expectativa é de que, além da produção de alimentos, fibras e energia, a moderna agricultura do século XXI também seja reconhecida por sua capacidade de prestar importantes serviços ambientais, tais como a ciclagem de nutrientes, o sequestro de carbono, a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), a degradação de poluentes etc.

Conforme apresentado nas Figuras 19.11 e 19.12, a combinação dos escores das funções Ciclar e Armazenar nutrientes, além de permitir que o agricultor saiba se o solo onde cultiva suas lavouras está saudável, adoecendo, doente ou em recuperação, pode ser utilizada como métrica para distinguir fazendas que investem em sistemas de manejo que favorecem a saúde do solo daquelas em que ocorre o contrário. A percepção dos efeitos benéficos e o interesse na avaliação de aspectos relacionados à saúde do solo são crescentes entre agricultores(as) e tomadores(as) de decisão no meio rural, principalmente à medida que aumenta a vulnerabilidade dos sistemas de produção intensivos e de grande escala, 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. Com o lançamento da tecnologia Embrapa BioAS, foi inaugurada uma forma mais abrangente de avaliação da saúde dos solos, indo além de questões relacionadas apenas à deficiência ou ao excesso de nutrientes.

Da mesma forma que investimentos na saúde dos trabalhadores resultam 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 agregação de valor aos produtos agrícolas ou à propriedade, o agricultor sai ganhando, pois, além de mais produtivos, solos saudáveis são biologicamente ativos e resilientes, com maior eficiência no uso de nutrientes, capacidade de armazenamento de água e biorremediação de pesticidas. Em adição à maior estabilidade produtiva, todos esses fatores resultam em mais lucratividade, tanto sob o ponto de vista econômico quanto ambiental.

19.11 Agradecimentos

Dedicamos este capítulo ao nosso querido colega Djalma Martinhão Gomes de Sousa.

Agradecemos os 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.

A todos os estudantes de graduação e pós-graduação do Laboratório de Microbiologia do Solo especialmente, André de Castro Alves e Leandro Moraes de Souza.

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 404764/2016-9 e 407642/2023-4), 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).

19.12 Referências

- ANGHINONI, I.; VEZZANI, F. M. Systemic Soil Fertility as product of system self-organization resulting from management. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, v. 45. 2021 DOI: 10.36783/18069657rbcs20210090
- BANDICK, A. K; DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 31, p. 1471-9, 1999. DOI: 10.1016/S0038-0717(99)00051-6.
- CHAER, G. M.; MENDES, I. C.; DANTAS, O. D.; MALAQUIAS, J. V.; REIS JUNIOR, F. B.; OLIVEIRA, M. I. L. Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities. *Applied Soil Ecology*, v. 183, p. 104742, 2023. DOI:10.1016/j.apsoil.2022.104742
- CONAB. Tabela de dados - Produção e balanço de oferta e demanda de grãos, **Boletim da Safra de Grãos**. Brasília, DF: 2022. Disponível: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 12 jul. 2022.
- 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: 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: 10.1016/S0065-2113(04)92003-2.
- FERREIRA, A. C. B.; BORIN, A. L. D. C.; LAMAS, F. M., BOGIANI; J. C.; SILVA, M. A. S.; SILVA FILHO, J. L.; STAUT, L. A. Soil carbon accumulation in cotton production systems in the Brazilian Cerrado. *Acta Scientiarum-Agronomy*, v. 42, e43039. 2020. DOI: 10.4025/actasciagron.v42i1.43039.
- 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: 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. DOI: 10.3390/su7010988.
- LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P. C. F.; DEDIEU, B. Integrated crop–livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural

production and environmental quality. **Agriculture Ecosystem Environment**, v. 190, p. 4-8. 2014. DOI: 10.1016/j.agee.2013.08.009.

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, n. 2, p. 461-472, Mar. 2013. DOI: 10.2136/sssaj2012.0191.

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. DOI: 10.1016/j.geodrs.2018.01.003.

LOPES, A. A. C.; BOGIANI, J. C.; FIGUEIREDO, C. C. de; REIS JUNIOR, F. B.; SOUSA, D. M. G.; MALAQUIAS, J. V.; MENDES, I. C. Enzyme activities in a sandy soil of Western Bahia under cotton production systems: short-term effects, temporal variability, and the FERTBIO sample concept. **Brazilian Journal Microbiology**, v. 52, n. 4, p. 2193-2204, Dec. 2021. DOI: 10.1007/s42770-021-00606-z

MARCHÃO, R. L.; MENDES, I. C.; VILELA, L.; JÚNIOR, R. G. ; NIVA, C. C.; PULROLNIK, K.; SOUZA, K. W.; DE CARVALHO, A. M. Integrated crop–livestock–forestry systems for improved soil health, environmental benefits, and sustainable production. In: MENDES, I. C.; CHERUBIN, M.R. (org.). **Soil health and sustainable agriculture in Brazil**. Madison: Soil Science Society of America, 2024, v. 03, p. 19-61. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780891187448.ch2>

MBUTHIA, L. W.; MARTÍNEZ, V. A.; DEBRUYN, J.; SCHAEFFER, S.; TYLER, D.; ODOI, E.; MPHESHEA, M.; WALKER, F.; EASH, N. Long-term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality. **Soil Biology Biochemistry**, v. 89, p. 24-34, 2015. DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.06.016.

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, n. 1, p. 20-25, 2018.

MENDES, I. C.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B.; DANTAS, O. D.; MALAQUIAS, J. V.; OLIVEIRA, M. I. L.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Soil bioanalysis (SoilBio): a sensitive, calibrated, and simple assessment of soil health for Brazil. In: MENDES, I. C.; CHERUBIN, M. R. (org.). **Soil health and sustainable agriculture in Brazil**. Madison: Soil Science Society of America, 2024. v. 03, p. 292-326. DOI: 10.1002/9780891187448.ch10

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.

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, p. 114880, 2021b.

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 & Tecnologia**, Brasília, DF, v. 32, n. 1/2, p. 191-209, jan./ago. 2015. Debate. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/138889/1/Bioindicadores-de-qualidade.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2025.

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.; CHAER, G. 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: 10.1016/j.apsoil.2019.02.025.

MENDES, I. C.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B.; SOUSA, D. M. G.; DANTAS, O. D.; OLIVEIRA, M. I. L.; MALAQUIAS, J. V. **Tecnologia BioAS**: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021a. 50 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 369). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1133109/1/Tecnologia-Bioas-Documentos-369.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2025.

MOEBIUS-CLUNE, B. N.; MOEBIUS-CLUNE, D. J.; GUGINO, B. K.; IDOWU, O. J.; SCHINDELBECK, R. R.; A.J. 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: 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: 10.1590/S0100-06832008000700017.

REEVES, D. W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. **Soil Tillage Research**, v. 43, p. 31–167, 1997. DOI: 10.1016/S0167-1987(97)00038-X.

- 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.041>.
- SALTON, J. C., MERCANTE, F. M., TOMAZI, M., ZANATTA, J. A., CONCENÇO, G., SILVA, W. M., RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: toward a sustainable production system. **Agriculture Ecosystem Environment**, v. 190, n. 1, 70-79, Jun. 2014. DOI: 10.1016/j.agee.2013.09.023.
- TRASAR-CEPEDA, C.; LEIRÓS, M. C.; GIL-SOTRES, F. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n. 9, p. 2146–2155, Sept. 2008a. DOI: 10.1016/j.soilbio.2008.03.015.
- TRASAR-CEPEDA, C.; LEIRÓS, M. C.; SEOANE, S.; GIL-SOTRES, F. Biochemical properties of soils under crop rotation. **Applied Soil Ecology**, v. 39, n. 2, p.133-143, Jun. 2008b. DOI: 10.1016/j.apsoil.2007.12.003.
- 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, n. 1, p. 29-38, Jan. 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: 10.2136/sssabookser9.c2.