

SAÚDE DO SOLO EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA

Ieda Carvalho Mendes

Pesquisadores da Embrapa Cerrados,
Planaltina-DF. E-mail: ieda.mendes@embrapa.br

Robélio Leandro Marchão

Pesquisadores da Embrapa Cerrados,
Planaltina-DF. E-mail: robelio.marchao@embrapa.br

Fabio Bueno Reis Junior

Pesquisadores da Embrapa Cerrados,
Planaltina-DF. E-mail: fabio.reis@embrapa.br

Guilherme Montandon Chaer

Pesquisador da Embrapa Agrobiologia,
Seropédica – RJ. E-mail: guilherme.chaer@embrapa.br

Júlio César Salton

Pesquisadores Embrapa Agropecuária Oeste,
Dourados-MS. E-mail: julio.salton@embrapa.br

Lourival Vilela

Pesquisadores da Embrapa Cerrados,
Planaltina-DF.

Maria Inês Lopes de Oliveira

Bolsista Pós-Doutorado, Embrapa Cerrados,
Brasília – DF. E-mail: minesoliveira2@gmail.com

Michely Tomazi

Pesquisadores Embrapa Agropecuária Oeste,
Dourados-MS. E-mail: michely.tomazi@embrapa.br

Vinicius Melo Benites

Pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro
– RJ. E-mail: vinicius.benites@embrapa.br

1. INTRODUÇÃO

1.1 Agricultura tropical, capim e saúde do solo

Nos últimos 45 anos, com a incorporação de solos do Cerrado ao processo agrícola, foi desenvolvida no Brasil, uma agricultura tropical única no mundo. Diferentemente dos demais locais com extensas áreas agrícolas no planeta, a agricultura do Cerrado foi estabelecida em solos ácidos e pobres em nutrientes, em uma região em que a distribuição de chuvas é concentrada em um período, geralmente, de seis meses. Investimentos feitos pelo governo federal em infraestrutura básica, instrumentos de política agrícola e especialmente, ciência e tecnologia para agricultura tropical, resultaram no desenvolvimento e incorporação de tecnologias modernas para os sistemas de produção no Cerrado. De país importador de alimentos na década de 1970, o Brasil é atualmente um dos grandes exportadores de alimentos.

Hoje, notícias relacionadas aos registros sucessivos de rendimento de grãos na região do Cerrado são usuais. Entretanto, no início dos anos 1970, os solos dessa região eram considerados improdutivos e impróprios para o cultivo. Assim, a construção do perfil do solo, com o uso das tecnologias de calagem e fertilização, juntamente com a tropicalização de variedades de soja (*Glycine max*), constitui o que pode ser

chamado de primeira quebra de paradigma da agricultura nos Cerrados (1975 a 1990).

O reconhecimento da necessidade de manter e melhorar o conteúdo de matéria orgânica (MO) dos solos deste bioma, estabeleceu as bases para a segunda quebra de paradigma na agricultura dessa região. Como se sabe, a MO é o componente mais importante da fertilidade dos solos de Cerrado, sendo a principal responsável pelas cargas negativas, principalmente nas camadas superficiais (Raij, 1969). Além dos aspectos relacionados à química, a MO é essencial para melhorar as propriedades biológicas e físicas do solo, importantes não apenas para o crescimento das plantas, mas também para a conservação dos recursos naturais como água e carbono (Resck et al., 1991). Assim, a segunda quebra de paradigma envolveu a semeadura direta dos cultivos, sem revolvimento do solo, no início dos anos 1990, culminando no Sistema Plantio Direto (SPD). Em combinação com variedades de soja de ciclo mais curto e com tolerância a herbicidas, este sistema possibilitou que uma segunda safra de milho (*Zea mays*) fosse cultivada durante a mesma estação de crescimento (sucessão soja/milho safrinha), sob condições de sequeiro. Atualmente, o SPD é adotado na maioria das fazendas da região do Cerrado, com amplas vantagens em termos de custos operacionais, permitindo que os agricultores façam a semeadura já no início da estação chuvosa. Atualmente, estima-se que cerca de 11 milhões de hectares sejam cultivados sob sistemas de semeadura direta nestas regiões (FEBRAPD, 2017).

O manejo dos solos, neste bioma, é um processo de aprendizado contínuo que, mais recentemente, levou a uma terceira grande quebra de paradigma - a adoção dos sistemas integrados de lavoura-pecuária (ILP) e lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Até o início dos anos 2000, os sistemas de produção de grãos no Cerrado envolviam esquemas de rotação ou sucessão de culturas, com baixa capacidade de aporte de palha e de cobertura do solo, predominando o monocultivo da soja. Por essa razão, conceitualmente, o SPD era pouco usado porque os três princípios básicos do sistema – rotação de culturas; manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo e ausência de revolvimento do solo – não eram plenamente respeitados. Um dos principais motivos para essa adoção parcial do SPD, era a dificuldade de obter uma planta de cobertura capaz de manter o solo coberto na época da seca. Felizmente, o plantio de gramíneas forrageiras com raízes profundas (braquiárias e *Panicum*, principalmente), após cultivo consorciado com o milho, sorgo ou mesmo em sobressemeadura na soja (uma prática considerada impensável nos cursos de fitotecnia dos anos 1980/90) preencheu essa lacuna, possibilitando cobertura vegetal ou pasto para o gado durante a estação seca (inverno).

Um solo saudável é um solo biologicamente ativo, produtivo, capaz de armazenar água, sequestrar carbono e promover a degradação de pesticidas, entre outros importantes serviços ambientais. Assim, a inserção das braquiárias e outras gramíneas forrageiras nos sistemas agrícolas tropicais, aumentando o aporte de resíduos vegetais, promovendo a

proteção do solo com uma planta de cobertura viva durante a estação seca e auxiliando na produção de palhada, foi um marco fundamental para a construção de um ambiente edáfico biologicamente mais ativo e saudável. A integração das pastagens e florestas às áreas sob cultivos de grãos, em semeadura direta, aumentou a complexidade dos agroecossistemas tropicais e alterou as relações entre os vários componentes do sistema agrícola. Essas mudanças são de magnitude tão grande que alguns autores defendem, inclusive, a necessidade de um novo conceito de fertilidade do solo para essas áreas, baseado na adubação do sistema agrícola. Este novo patamar de manejo agrícola, demanda um novo sistema de avaliação que inclua indicadores que expressem o funcionamento do solo, como um todo e não apenas sua condição química (Nicolodi et al., 2004; 2008).

2 . REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Bioindicadores para avaliar a saúde e acessar a memória solo

Conforme observado por Lehman et al. (2015), a biologia é a base da saúde do solo e uma das aliadas para reverter os processos de degradação, que ocorrem em escala mundial. De fato, a importância do componente biológico do solo para a manutenção de lavouras saudáveis, resilientes e sustentáveis, que possam fornecer alimentos, em quantidade e qualidade, para uma população mundial crescente, tem sido cada vez mais percebida pelos produtores, no dia a dia de suas lavouras. No caso específico do Brasil, a expansão e a adoção por longos períodos de sistemas de manejo conservacionistas, como o SPD e a ILP, permitiu verificar que os aumentos de produtividade das culturas ou a manutenção da produção frente a situações ambientais adversas, muitas vezes não são explicados pelos resultados das análises químicas de solos (Nicolodi et al., 2008; Mendes et al., 2017). Essa constatação de que solos quimicamente semelhantes possuíam desempenhos diferenciados, demonstrou a necessidade da inclusão de parâmetros relacionados ao funcionamento biológico do solo (bioindicadores) nas análises de rotina (Figura 1) (Mendes et al., 2017; 2018; 2019; 2021).

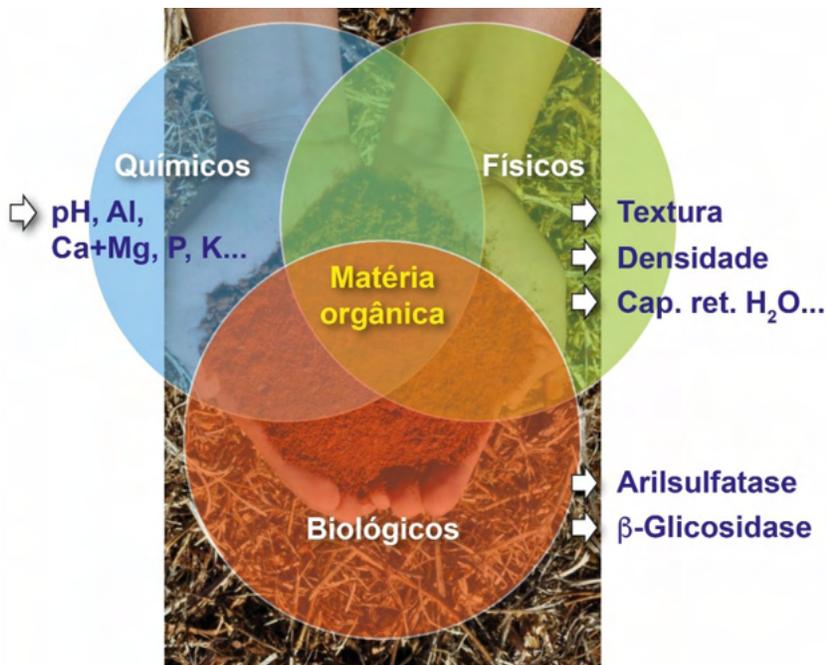


Figura 1. A inclusão das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase nas análises de rotina de solo (bioanálise do solo) preencheu a lacuna deixada pela ausência do componente biológico nessas determinações. Fonte: elaborado pelos autores.

A bioanálise do solo (BioAS) consiste na agregação de parâmetros relacionados ao funcionamento da maquinaria biológica do solo às análises químicas tradicionais de rotina (pH, H+Al, P, Ca, K, Mg, etc.). Nos últimos 20 anos, o grupo de pesquisa com Bioindicadores de Qualidade de Solo da Embrapa, dedicou-se à seleção de bioindicadores robustos que permitissem que o agricultor brasileiro pudesse monitorar a “saúde” de seu solo, sabendo exatamente o que avaliar, porque avaliar, como avaliar, quando avaliar e, principalmente, como interpretar o que foi avaliado. Como resultado desses estudos, duas enzimas presentes no solo, a arilsulfatase e a β -glicosidase (associadas aos ciclos do S e C) foram selecionadas e tabelas de interpretação foram desenvolvidas (Mendes et al., 2018, 2021).

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

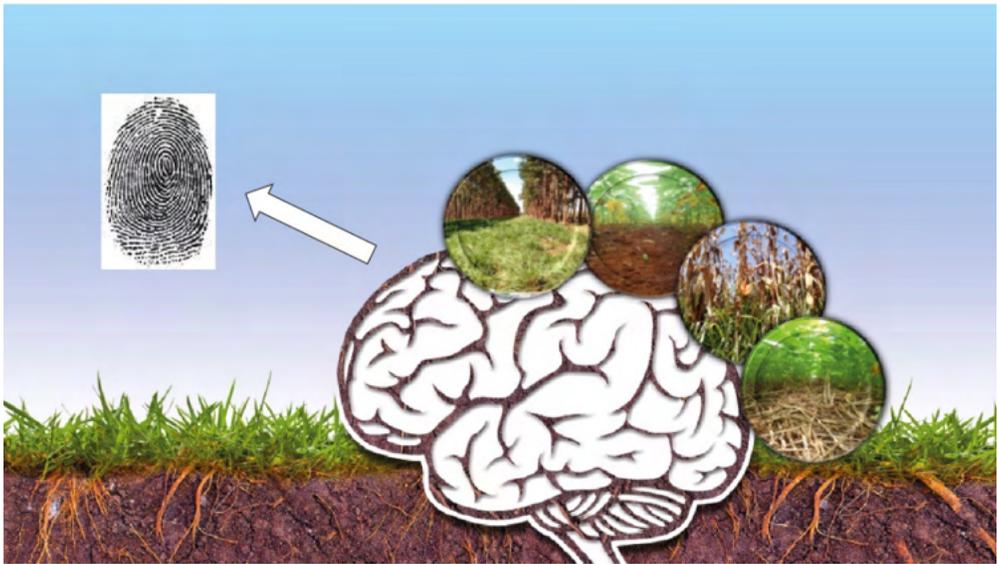


Figura 2. Os sistemas de manejo deixam sua impressão digital na *memória* do solo. Fonte: Elaborado pelos autores.

O acesso à *memória* do solo, por meio de determinações da atividade enzimática, é possível devido ao fato de que a atividade enzimática de um solo é a somatória da atividade de enzimas dos organismos vivos (microrganismos, plantas e animais) e de gerações passadas de organismos que estiveram presentes no solo (componente abiótico). As enzimas abióticas estão associadas à fração não viva e se acumulam no solo protegidas da ação de proteases por meio de sua adsorção em partículas de argila e na matéria orgânica (Figura 3) (Wallenstein e Burns, 2011). A capacidade do solo de estabilizar e proteger enzimas está relacionada à sua capacidade de armazenar e estabilizar MO (afinal a enzima é uma molécula orgânica) e outras propriedades estruturais associadas (agregação e porosidade). Entretanto, alterações na MO ou de propriedades estruturais do solo podem levar anos para serem detectadas, diferentemente da atividade enzimática (Bandick e Dick, 1999; Dicke Burns, 2011). Por essa razão, o aumento da atividade enzimática (refletindo o aumento na atividade biológica), ao longo do tempo, pode ser um prenúncio de que o sistema está favorecendo o acúmulo de Matéria Orgânica do Solo (MOS) e, por isso, nem sempre está acoplado, nos estágios iniciais, a aumentos nos teores de MOS. A Figura 4 ilustra essa teoria, mostrando que na escalada da melhoria de um solo, o aumento na atividade biológica, evidenciado pela atividade enzimática, constitui o primeiro degrau (Figura 4).

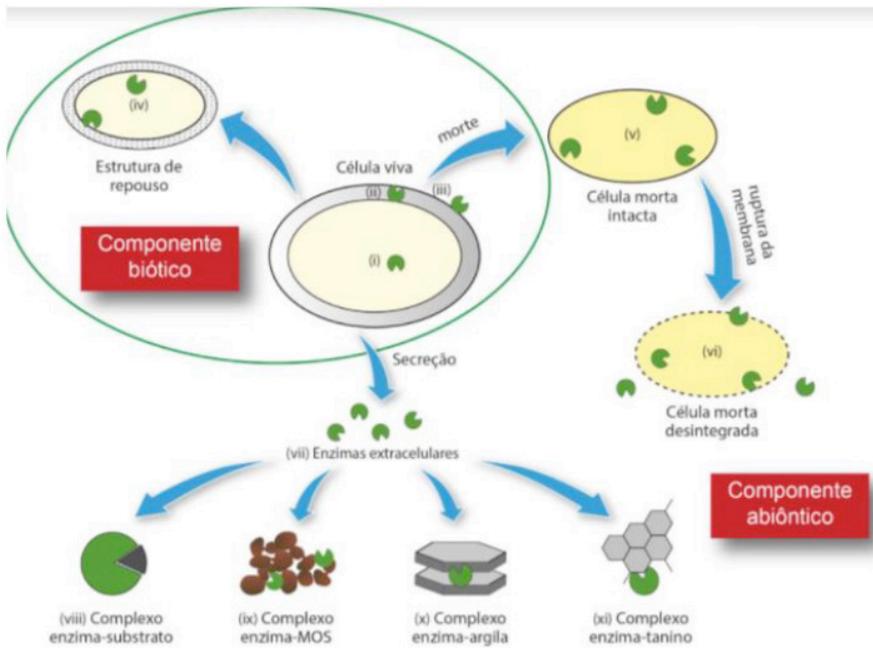


Figura 3. Esquema ilustrativo da localização das enzimas nos compartimentos solo. Fonte: Adaptado de Wallenstein e Burns (2011).



Figura 4. Fluxograma demonstrando que em função do aumento no aporte de resíduos vegetais ao solo, o aumento na atividade biológica é o primeiro degrau na escalada da melhoria de um solo. Fonte: Adaptado de Hatfield, 2017.

O acúmulo de atividade abiótica no solo, ao longo do tempo, faz com que a

atividade enzimática funcione como uma verdadeira impressão digital dos sistemas de manejo aos quais o solo foi submetido, permitindo, dessa forma, acessar à “memória do solo”. A presença do componente abiótico também explica o porquê de muitas vezes a atividade enzimática de um solo é desacoplada dos teores de C da biomassa microbiana (CBM) (Mendes et al., 2019), conforme poderá ser verificado mais adiante, no exemplo do Tabela 3.

A capacidade de acessar a memória do solo através das análises de atividade enzimática será abordada a seguir, quando será discutido o biofuncionamento do solo, em áreas sob sistemas ILP.

2.2 Biofuncionamento do solo em sistemas integrados (ILP)

O funcionamento de um solo é determinado pela interação entre suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Contudo, a maquinaria biológica é o principal componente que movimenta essa complexa engrenagem. Por constituírem a parte viva e mais ativa da MOS, é possível utilizar alguns indicadores biológicos (aqui, denominados bioindicadores) para avaliar o seu biofuncionamento e, dessa forma, embasar tomadas de decisão com relação ao manejo do solo na propriedade agrícola. Exemplos de como os solos podem guardar em sua memória os efeitos do sistema de manejo referem-se ao funcionamento biológico do solo em áreas cultivadas com grãos (soja e milho) sob Sistema de Plantio Convencional (SPC), SPD e sistemas ILP.

Do ponto de vista microbiológico, a comparação entre áreas agrícolas sob SPC (com revolvimento do solo) e sob SPD é uma das mais emblemáticas e mais estudadas (Mendes, 2016; Zuber; Villamil, 2016). Em áreas sob SPC e SPD, a ecologia do ambiente solo-planta é bem distinta, pois envolve alterações frequentes da estrutura do solo e a preservação das relações construídas com o tempo de cultivo. Isso se deve, principalmente, às diferenças no grau e intensidade de revolvimento do solo, no manejo da palha e da diversidade biológica (rotação de culturas) desses sistemas. No SPD, a camada arável deixa de existir dando origem a uma camada superficial enriquecida com resíduos. Essa constatação respaldada pela literatura mundial (Zuber e Villamil, 2016), além de mostrar que o sistema de manejo, deixa sua impressão digital no solo, novamente remete ao fato de que o solo é capaz de guardar em sua “memória” o tipo de manejo ao qual ele foi submetido (Figura 2). Um ponto a ser destacado é que a impressão digital que cada sistema de manejo deixa no solo, varia em função das condições edafoclimáticas, da intensidade e da duração do impacto. Nas áreas sob ILP, por exemplo, o tempo de permanência do componente pastagem e a quantidade de matéria vegetal produzida são fatores determinantes.

A Tabela 1 apresenta dados de um estudo conduzido no âmbito do Projeto Solo Vivo (convênio Itaipu Binacional/Embrapa), em experimento de longa duração de ILP, da Embrapa Agropecuária Oeste (Dourados/MS). O solo é um Latossolo Vermelho distrófico típico, de

textura muito argilosa. As glebas encontram-se dispostas num modelo experimental físico em faixas. O experimento foi iniciado em 1995 e as avaliações realizadas em 2015, no 20º ano de condução, com solo coletado na camada 0-10cm. Os sistemas avaliados, neste experimento, constituem uma oportunidade única para acessar a memória de um solo em função de diferentes tipos de manejo. Os usos da terra avaliados foram: 1. Lavoura em SPC, utilizando-se grades de discos (pesada + niveladora), com monocultivo de soja no verão e aveia no outono/inverno; 2. Lavoura em SPD com rotação de culturas, cultivando-se soja e milho no verão e aveia, nabo e trigo no outono/inverno; 3. Integração lavoura-pecuária (ILP) sistema rotacionado com ciclos de dois anos, utilizando-se *Urochloa brizantha* cv. Piatã como pastagem (dois anos) e soja em semeadura direta (dois anos), constituindo dois subsistemas ILPa (fase lavoura) e ILPb (fase pastagem) 4. Pastagem Permanente (PP) com *Urochloa brizantha* cv. Piatã e 5. Cerrado nativo (Salton et al., 2015).

Vinte anos após o início do experimento, os teores de MO (determinados com o método Walkley; Black), na camada 0-10cm, não diferiram entre as áreas com cultivos de grãos e o cerrado nativo. Os tratamentos, sob cultivo de soja (SPC, SPD e ILPa), apresentaram reduções significativas nos teores de CBM em relação à vegetação nativa, fato amplamente relatado na literatura e associado, principalmente, ao rompimento do equilíbrio do solo, quando da remoção dessa vegetação, com conseqüente preparo do solo para cultivo (Matsuoka et al., 2003; Mendes et al., 2003; Kaschuk et al., 2009).

Por influenciar não só a produção (quantidade), mas também a qualidade dos resíduos vegetais que são retornados ao solo, a diversidade florística das áreas nativas também deixa impressões digitais (ou assinaturas biológicas) no funcionamento bioquímico do solo, conforme verificado nos níveis de atividade das três enzimas avaliadas (Tabela 1). A comparação da área nativa de Cerrado com os tratamentos sob SPD e ILP (fases lavoura e pastagem) mostra reduções nos níveis de atividade da fosfatase ácida e aumentos nos níveis de β -glicosidase, nas áreas sob SPD e ILP. As reduções na atividade da fosfatase ácida decorrem do efeito inibidor dos adubos fosfatados utilizados nas áreas cultivadas sobre a atividade dessa enzima (Mendes et al., 2003; Carneiro et al., 2004; Lopes et al., 2013). Por outro lado, os aumentos na β -glicosidase nas áreas cultivadas (apesar dos menores valores de CBM) denotam uma peculiaridade do funcionamento biológico dos solos de Cerrado (Mendes et al., 2003, 2012; Lopes et al., 2013) que, se não forem bem compreendidas, podem levar a interpretações errôneas dos indicadores biológicos.

Conforme verificado em estudos anteriores (Mendes et al., 2003; Peixoto et al., 2010; Lopes et al., 2013), embora a área sob vegetação nativa apresente teores de MO semelhantes aos das áreas cultivadas, os níveis de atividades de β -glicosidase são consistentemente menores nas áreas nativas. Esta observação, que até já foi considerada por autores internacionais uma anomalia (Stott et al., 2010), apresenta uma estreita relação com a quantidade e qualidade dos resíduos vegetais aportados ao solo, que são mais

complexos e lignificados nas áreas nativas de Cerrado do que nas áreas agrícolas (Figura 5). Como a β -glicosidase atua na etapa final de decomposição da celulose (convertendo a celobiose em moléculas de glicose), sua atividade é, portanto, menor nas áreas nativas.

No exemplo apresentado na Tabela 1, a impressão digital deixada no solo pelo SPD refletiu-se na atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase cujos níveis de atividade foram maiores, apesar dos teores semelhantes de MO observados nos tratamentos SPD e SPC. Ainda na Tabela 1 também pode ser observada a assinatura biológica deixada no solo em função da integração da pastagem com *Urochloa brizantha* cv. Piatã nos sistemas de cultivo de grãos sob ILP no Cerrado. Os tratamentos sob ILP (fases lavoura e pecuária) apresentaram maiores atividades da fosfatase ácida e da arilsulfatase em relação aos tratamentos sob SPD e SPC. Conforme discutido anteriormente, os benefícios incrementais advindos da presença da braquiária nos sistemas agrícolas decorrem, principalmente, do aumento da entrada de resíduos vegetais e exsudatos radiculares, além da proteção do solo durante a estação seca, favorecendo um ambiente edáfico biologicamente mais ativo.

Tratamentos ^a	MO g kg ⁻¹	pH (H ₂ O)	CBM ^b mg kg ⁻¹	Fosfatase Ácida ----- μ g de p-nitrofenol g ⁻¹ de solo h ⁻¹ -----	β -Glicosidase g ⁻¹ de solo h ⁻¹	Arilsulfatase
SPC	19,1 a*	5,7a	323 b	419 c	88 b	31 c
SPD	19,5 a	5,4a	370 b	467 c	138 a	75 b
ILP soja	21,6 a	5,2a	318 b	739 a	130 a	126 a
ILP pasto	22,4 a	5,7a	530 a	616 b	147 a	134 a
PP	23,8 \pm 2,2	5,9	631 \pm 42	675 \pm 34	170 \pm 7	232 \pm 27
Cerrado	20,7 \pm 2,4	5,0	634 \pm 53	1011 \pm 47	101 \pm 8	107 \pm 14

Tabela 1. Matéria orgânica (MO), pH e atributos biológicos de um LVd de Cerrado, textura argilosa (0-10 cm), sob diferentes sistemas de cultivo em Dourados-MS. Dados gerados no âmbito do Projeto Solo Vivo (MP 02.12.12.004) em experimento sob responsabilidade dos Drs. Júlio Salton e Michely Tomazzi, da Embrapa Agropecuária Oeste

^aSPC: sistema convencional, SPD: plantio direto, ILP soja: integração lavoura-pecuária, fase lavoura; ILP pasto: integração lavoura-pecuária, fase pastagem, PP: pastagem permanente.

* Valores seguidos pela mesma letra em colunas, não diferem estatisticamente pelo Teste Duncan a 5 %. A pastagem permanente e o cerrado nativo não foram incluídos na análise estatística. ^bCBM= Carbono da biomassa microbiana, método fumigação extração com combustão em alta temperatura (Souza et al., 2015). Enzimas: Tabatabai (1994).



Áreas nativas > complexidade

↓ Atividade β -glicosidase

Áreas cultivadas < complexidade

↑ Atividade β -glicosidase

Figura 5. Imagens demonstram maior complexidade (diversidade de compostos) dos resíduos vegetais na área sob vegetação de cerrado (esquerda) com menores níveis de atividade da β -glicosidase, em comparação à área cultivada (direita), com menor complexidade de resíduos e maior atividade da enzima. Fonte: elaborado pelos autores.

A arilsulfatase foi o bioindicador mais sensível entre os quatro avaliados neste estudo. Seus níveis de atividade aumentaram na seguinte ordem: SPC < SPD < ILPsoja = ILPpasto < PP. Nas áreas sob cultivo de grãos, as diferenças entre os tratamentos com menor (SPC) e maior (ILPsoja e ILPpasto) atividade foram de 4,3 vezes. Os aumentos na atividade da arilsulfatase ocorreram independentemente dos teores de CBM e da MO. Esse desacoplamento da atividade da arilsulfatase, em relação ao CBM, é um indício de que, ao longo dos 24 anos de condução desse experimento, houve nos tratamentos sob SPD, ILPa e ILPb condições que favoreceram a preservação abiônica dessa enzima no solo (atividade não associada à porção viva da biomassa microbiana). Tendo em vista que a atividade da arilsulfatase aumentou, à medida que se intensificou a presença de gramíneas do gênero *Urochloa* nos sistemas agrícolas avaliados, outra hipótese é a de que esse aumento também possa estar relacionado à atividade enzimática oriunda de tecido vegetal. De qualquer forma, foi evidente a habilidade da arilsulfatase para identificar as alterações no funcionamento biológico do solo (foi o bioindicador mais sensível), o que ressalta a importância dos estudos de seleção dos bioindicadores para acessar adequadamente a memória do solo, em função dos sistemas de manejo.

Os dados das Tabelas 2 e 3 (adaptados de Mendes et al., 2015b, 2019) são oriundos de um experimento localizado no Centro Tecnológico da Cooperativa (Comigo), em Rio Verde (GO), e também mostram os efeitos benéficos da inserção da braquiária em sistemas agrícolas. O experimento foi iniciado em 2007 e tem como um de seus objetivos avaliar sistemas de produção de grãos, em plantio direto, com e sem a presença de gramíneas do gênero *Urochloa* (braquiária). Em dezembro de 2014, oito anos após o início do experimento, foi realizada uma coleta de solo, na fase de floração da soja, na profundidade

de 0-10cm, em que foram determinados as propriedades químicas e os teores de MOS (Tabela 2). Além desses atributos que fazem parte da análise tradicional de solo, também foram avaliadas as atividades das enzimas β -glicosidase, arilsulfatase e o CBM (Tabela 3).

Verifica-se na Tabela 2 que os atributos químicos do solo, incluindo os teores de MOS, não permitiram diferenciar os tratamentos com e sem braquiária. Os teores do CBM também não permitiram fazer essa diferenciação (Tabela 3). Entretanto, os tratamentos com presença de braquiária apresentaram aumentos nos níveis de atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase (Tabela 3). Em relação ao tratamento soja/milho, nos tratamentos com braquiária, esses aumentos foram, em média, de 53% para a β -glicosidase e arilsulfatase. Isto é, embora os três tratamentos apresentassem características químicas similares, os maiores níveis de β -glicosidase e arilsulfatase nos tratamentos com braquiária demonstraram que o funcionamento biológico do solo era distinto. Não por acaso, estudos anteriores realizados nesse mesmo experimento reportaram um aumento de produtividade da soja nos tratamentos com braquiária da ordem de 572 kg ha⁻¹ (Benites et al., 2014).

Tratamentos	pH	Al	Ca	Mg	K	P	MO
	(H ₂ O)		cmol _c /dm ³		mg/dm ³		g/kg
Soja pousio	5,90	0,04	4,5	1,70	121	15	23,0
Soja/Milho	5,87	0,04	4,2	1,39	114	13	22,0
Soja/Milho + <i>U. ruziziensis</i>	5,89	0,03	4,5	1,96	108	10	24,7
Soja/ <i>U. brizantha</i>	6,06	0,04	4,6	1,55	142	14	24,1
CV(%)	3(ns)	24(ns)	12 (ns)	18 (ns)	14 (ns)	23 (ns)	9(ns)

Tabela 2. Atributos químicos e matéria orgânica (MO) de um LV de Cerrado, sob SPD, em sistemas agrícolas com e sem braquiária (0-10 cm), no Sudoeste Goiano. Dados gerados no âmbito do Projeto Solo Vivo (MP 02.12.12.004) em experimento sob responsabilidade do Dr. Vinicius Benites (Embrapa Solos)

Al, Ca, Mg (KCl 1 mol/L); P e K (Mehlich-1); MO – matéria orgânica do solo (Walkley e Black).

Na Figura 6, são apresentados dados de atividade da arilsulfatase em três experimentos de longa duração de ILP da Embrapa, localizados em Planaltina (DF), Naviraí e Ponta Porã (MS). Assim como observado nos experimentos de Dourados e Rio Verde, em todos eles o mesmo padrão de memória do solo se repete: um aumento na atividade da arilsulfatase à medida que se intensifica o sistema de manejo, com a integração da pastagem nas áreas de lavoura.

Tratamentos	β -Glicosidase	Sulfatase	CBM
	$\mu\text{g de p-nitrofenol g}^{-1}$ de solo h^{-1}		mg kg^{-1} solo
Soja pousio	114c	91b	339
Soja/Milho	108 c	89 b	311
Soja/Milho + <i>U. ruziziensis</i>	151 b	132 a	320
Soja/ <i>U. brizantha</i>	179 a	140 a	270
CV(%)	12	12	21(ns)

Tabela 3. Indicadores microbiológicos de um LE de Cerrado, sob SPD, em sistemas agrícolas com e sem braquiária (0-10cm), no Sudoeste Goiano. Dados gerados no âmbito do Projeto Solo Vivo (MP2 02.12.12.004) em experimento sob responsabilidade do Dr. Vinicius Benites (Embrapa Solos)

CBM = Carbono da biomassa microbiana, método fumigação extração com combustão em alta temperatura (Souza *et al.*, 2015). Enzimas: Tabatabai (1994). Valores seguidos pela mesma letra em colunas não diferem estatisticamente pelo Teste Duncan a 5%.

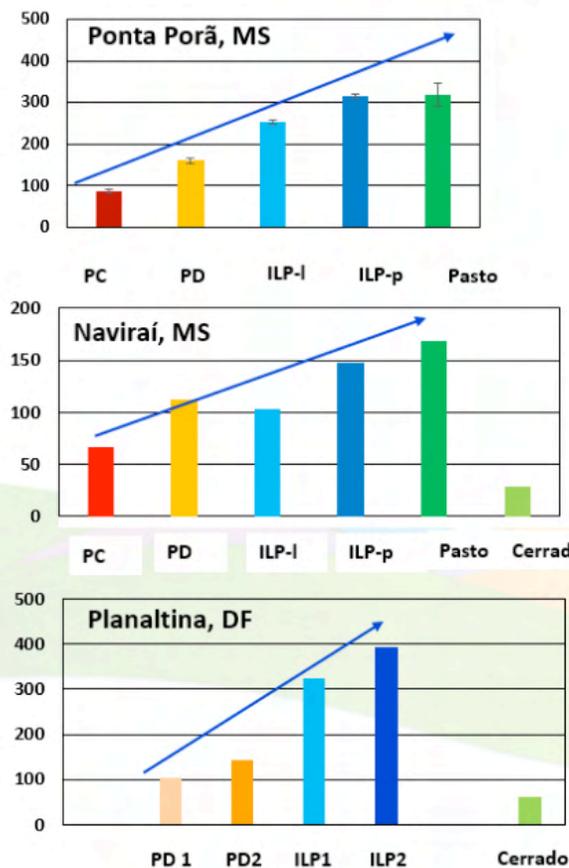


Figura 6. Atividade da arilsulfatase nos experimentos de ILP da Embrapa Cerrados (Planaltina, DF; responsável: Dr. Lourival Vilela) e Embrapa Agropecuária Oeste (Naviraí e Ponta Porã, MS; responsáveis: Dr. Júlio C. Salton e Dr.^a Michely Tomazi).

Da mesma forma que os solos argilosos, os solos arenosos também guardam a memória do manejo do solo. A Figura 7 apresenta dados de atividade enzimática obtidos em um Neossolo Quartzarênico, na Fazenda Xanxerê, localizada no Oeste do estado da Bahia. Embora os diferentes talhões da propriedade apresentassem teores semelhantes de MOS (em média 6 g kg⁻¹), o talhão onde o milho era consorciado com a braquiária em SPD apresentou o dobro de atividade da β-glicosidase que aquele sob SPC. Todos os talhões sob SPD também apresentaram, em média, o dobro de atividade da arilsulfatase que o talhão sob SPC.

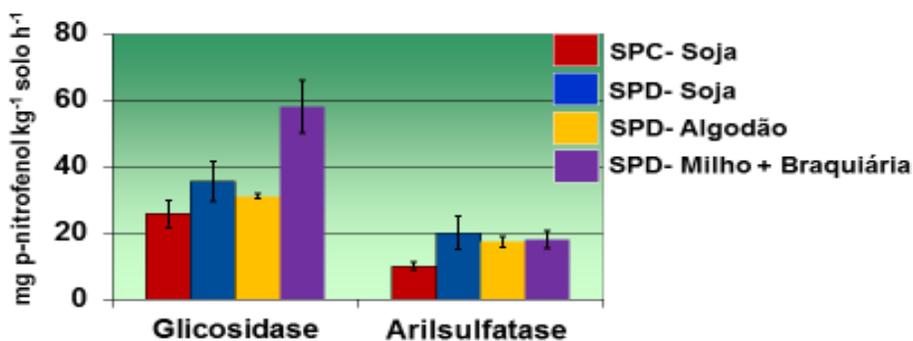


Figura 7. Atividade enzimática (mg de *p*-nitrofenol kg de solo⁻¹ h⁻¹) de um Neossolo Quartzarênico (0-10 cm) sob diferentes sistemas de manejo na Fazenda Xanxerê (Correntina, BA). Teores médios de MOS de 6 g kg⁻¹.

Os valores de atividade da arilsulfatase em Naviraí (Figura 6) e na Fazenda Xanxerê (Figura 7) evidenciam os baixos níveis de atividade enzimática dos solos de textura média (Naviraí) e arenosos (Fazenda Xanxerê), consequência direta de baixos teores de MOS e de argila. Conforme discutido anteriormente, a capacidade de um determinado solo estabilizar e proteger enzimas do componente abiótico está relacionada à sua textura e à sua capacidade de armazenar e estabilizar a MOS. Quanto menores os teores de argila e MOS, mais reduzida é a atividade biológica do solo.

2.3 Braquiária: um excelente biocondicionador de solo

Em todos os exemplos apresentados anteriormente ficou claro o potencial das braquiárias inseridas nos sistemas ILP como plantas bioativadoras da maquinaria biológica do solo, conforme verificado por meio do aumento das atividades enzimáticas. O vasto sistema radicular dessas plantas (Figura 8) constitui-se numa fonte primordial de exsudatos radiculares para os microrganismos, principalmente, quando a braquiária é utilizada como planta viva na época da seca, onde existe uma grande limitação de fontes de alimento para as comunidades microbianas. Além disso, a presença da braquiária, nesse período, resulta em significativas reduções na temperatura do solo e na manutenção de um ambiente mais

úmido.



Figura 8. Aspecto das raízes de braquiária no final da estação seca, numa fazenda localizada no Oeste Baiano. Fonte: fotos do Dr. Lourival Vilela.

Além do aspecto biológico, a braquiária também é um excelente condicionador das propriedades químicas e físicas do solo. Com relação aos efeitos nas propriedades físicas do solo, um exemplo foi demonstrado em um experimento de Rotação de Culturas na Soja (RCS) conduzido desde 2008 pela Fundação MT na estação experimental Cachoeira, município de Itiquira, MT. Nesse experimento, são avaliados oito sistemas de cultivos/produção incluindo o monocultivo, sucessão e rotação de culturas, os quais estão detalhados na Tabela 4. Verifica-se que vários tratamentos envolvem rotação/sucessão com braquiárias, simulando uma situação de ILP, embora sem pastejo de animais.

Até a safra 2013/2014, as diferenças nas produtividades da soja entre os vários tratamentos não foram acentuadas. A produtividade média do tratamento monocultivo de soja sob SPC foi de 61 sc/ha e não diferiu significativamente dos demais tratamentos (Mendes et al., 2017). No entanto, no sétimo cultivo (2014/2015), com o uso de uma cultivar superprecoce (TMG 7262 RR cujo ciclo foi de 98 dias), a ocorrência de um veranico em janeiro de 2015 possibilitou evidenciar, pela primeira vez, o início do declínio dos tratamentos com monocultivo de soja. A Figura 8 ilustra o aspecto geral da soja no tratamento 1 (soja/pousio) e no tratamento 3, em que a cultura é inserida num esquema de sucessão com a braquiária (*U. ruziziensis*), durante o veranico, em 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, diferença de 30 sc/ha entre os dois tratamentos. Neste exemplo, fica claro que a estabilidade produtiva do sistema de sucessão de culturas foi mantida pelo aporte de palhada por meio do uso da braquiária e seus benefícios ao longo do tempo, enquanto, sob monocultivo, foi perceptível a ausência de palha em superfície, culminando em visível perda de vigor da soja. Entretanto, apesar da diferença significativa na produtividade de grãos, as características químicas dos solos (0-10cm) desses tratamentos foram semelhantes (Tabela 5), inclusive com relação aos teores de MOS.

T	----- Ano 1 -----	----- Ano 2 -----	----- Ano 3 -----	Manejo do solo
1	soja / pousio	soja / pousio	soja / pousio	PD
2	soja / milho	soja / milho	soja / milho	PD
3	soja / braquiária	soja / braquiária	soja / braquiária	PD
4	soja / milho	soja / crotalária	milho + braquiária	PD
5	soja / crotalária	milho + braquiária	soja / crotalária	PD
6	soja / crotalária	soja / milho + braquiária	braquiária	PD
7	soja / milho safrinha	soja / milho safrinha	soja / milho safrinha	PD
8	soja / pousio	soja / pousio	soja / pousio	PC

Tabela 4. Tratamentos utilizados para a avaliação de sistemas de produção de grãos em Itiquira-MT¹

¹Projeto conduzido com apoio financeiro do Instituto Mato-grossense do Algodão (IMArnt) nas três primeiras safras; T – tratamento; PD – plantio direto; PC – preparo convencional (revolvimento anual do solo com grade aradora na entressafra). Milheto (cv. ADR-300), *Crotalaria ochroleuca* e *Brachiaria ruziziensis* (= *Urochloa ruziziensis*).

Fonte: Fundação MT (n.p.).

T1 – soja/pousio: 29 sc/ha

T3 – soja/braquiária: 59 sc/ha



Figura 9. 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. Experimento de rotação de culturas na soja (RCS), em Itiquira-MT. Fotos: Fundação MT.

Tratamento	MOS ¹	pH	Al	H+Al	Ca	Mg	P	K
	g.kg ⁻¹	H ₂ O	----- cmol _c .dm ⁻³ -----			----- mg.dm ⁻³ -----		
Soja/pousio	33,1±0,4	6,3±0,1	0,0	2,5±0,4	3,4±0,6	2,2±0,4	15±2,6	258±42
Soja/braquiária	29,6±0,8	6,4±1,6	0,0	3,6±1,1	3,8±0,9	3,1±0,6	16±4,0	188±64

Tabela 5. Atributos químicos do solo, na camada de 0-10cm, nos tratamentos com soja/pousio e soja/braquiária do experimento de rotação de culturas na soja, em Itiquira-MT (safra 2015/2016)

¹MOS – matéria orgânica do solo (Walkley & Black); H+Al (acetato de cálcio a pH 7,0); Ca, Mg e Al (KCl 1 mol/L); P e K (Mehlich-1). Análises realizadas no Laboratório de Química de Solo da Embrapa Cerrados em dezembro de 2015.

Na Tabela 6, são apresentados, para os dois tratamentos mencionados anteriormente (soja/pousio e soja/braquiária, ambos em SPD), os valores de atividade das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase determinados na safra 2015/2016. As amostras de solo (0-10cm) foram coletadas na fase de florescimento da soja (dezembro de 2015). Em relação ao tratamento com monocultivo de soja em SPD, o tratamento soja/braquiária apresentou 3,6, e 8 vezes mais atividade da β -glicosidase e arilsulfatase, respectivamente.

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. Conforme destacado na Figura 4, esses resultados confirmam também que, na escalada 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.

Na Figura 10, tem-se o aspecto visual do solo (amostra superficial da camada do solo coletada com pá de corte) nos tratamentos sob monocultivo, sucessão e rotação de culturas, todos em SPD, na oitava safra do experimento. É visualmente perceptível as melhorias no solo sob o sistema soja/milho, predominante no Mato Grosso, por exemplo, em relação ao monocultivo. Sob rotação de culturas, onde a braquiária fornece grande quantidade de massa, os efeitos nas melhorias do solo se tornam ainda mais evidentes (para maiores informações veja Anghinoni et al., 2021).

Atributos microbiológicos ¹	Soja/pousio	Soja/braquiária	Diferença
β -Glicosidase	64b	233a	3,6 vezes
Arilsulfatase	28b	223a	8,0 vezes

Tabela 6. Bioanálise do solo na camada de 0-10cm nos tratamentos com soja/pousio e soja/braquiária sob SPD do experimento de Rotação de Culturas na Soja (RCS), em Itiquira-MT (safra 2015/2016). Dados gerados no âmbito do Projeto Bioindicadores de Qualidade de Solo (MP 02.14.01.026) em experimento sob responsabilidade dos Dr. Leandro Zancanaro e Dr. Fabio Ono, da Fundação MT

β -glicosidase e arilsulfatase (Tabatabai, 1994): $\mu\text{g de p-nitrofenol g}^{-1}\text{de solo}^{-1}\text{h}^{-1}$, * Valores seguidos pela mesma letra nas linhas, não diferem estatisticamente pelo Teste Duncan a 5 %.

Além de ilustrar o poderoso efeito da resiliência de um solo saudável, o exemplo do experimento RCS da Fundação MT, ilustra dois aspectos muito importantes. O primeiro é o conceito de bioindicador, um parâmetro biológico que indica o estado geral de saúde do solo. Conforme verificado no aspecto visual do solo, a maior tolerância a seca nos tratamentos nos quais a braquiária é um dos componentes da rotação, não se deve aos maiores níveis de atividade da arilsulfatase e β -glicosidase *per se*. No entanto, devido a sua relação direta com os aspectos de melhoria da estrutura do solo, os níveis de atividade dessas enzimas indicam que o solo sob braquiária é mais saudável que o solo sob monocultivo. O segundo aspecto é o uso da profundidade 0-10cm como camada diagnóstica para avaliar a saúde do solo, corroborando outros estudos na literatura (Lupwayi et al., 2015; Vasu et al., 2016; Mei et al., 2019). Do ponto de vista prático, esse ponto é muito importante pois, embora a performance das plantas seja influenciada por fatores relacionados a superfície e a sub-superfície do solo, avaliações nas camadas mais superficiais são capazes de fornecer importantes indicações sobre o funcionamento do solo com um todo, tornando menos oneroso os processos de diagnóstico da saúde do solo.

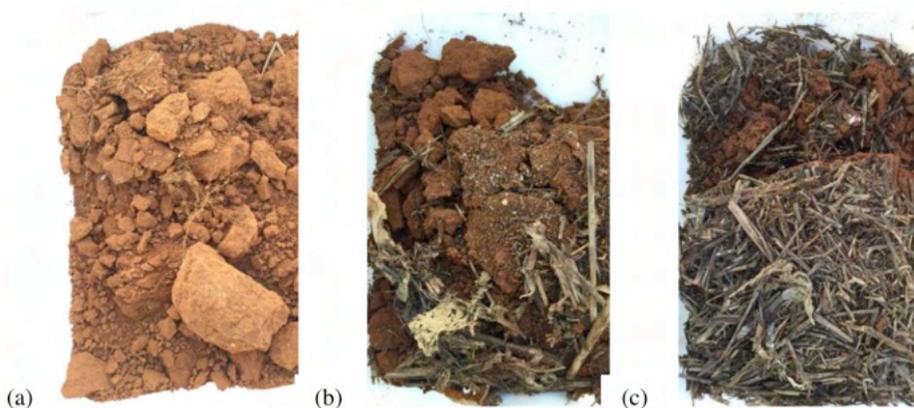


Figura 10. Aspecto visual do solo nos tratamentos soja/pousio, em SPD (a), soja/milho, em SPD (b) e soja/crotalária – soja/milho+braquiária – braquiária, em SPD (c) na oitava safra do experimento de sistemas de produção, em Itiquira-MT. Fotos: Fundação MT (safra 2015/2016).

2.4 Saúde do solo em sistemas ILP: mais resiliência, mais biorremediação, mais ciclagem e menos emissões.

Da mesma forma que uma pessoa saudável tolera melhor uma situação de adversidade, um solo saudável também reage melhor as 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 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 9). Com base nos sete primeiros anos de condução desse experimento, nos quais não houve diferença de rendimento de grãos entre os tratamentos soja/pousio e soja/braquiária (Figura 11), fica claro que nem todo solo produtivo é saudável (vide também Mendes et al. 2021).

Ainda com relação ao experimento RCS da Fundação MT, também se verifica na Figura 11, que após a ocorrência do veranico no sétimo 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 monocultivo e soja/braquiária totalizou 119 sc/ha. Ou seja, o solo do tratamento soja pousio cuja saúde está comprometida, ainda não conseguiu recuperar-se totalmente, seis anos após a ocorrência do veranico.

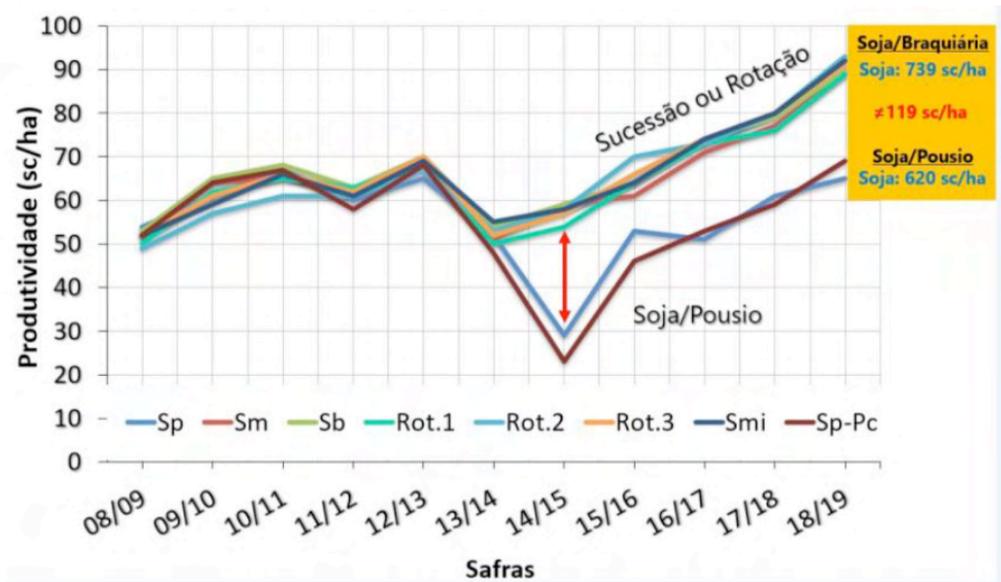


Figura 11. Produtividade da soja no experimento RCS (rotação de culturas na soja) em Itiquira-MT, conduzido sob responsabilidade dos Dr. Leandro Zancanaro e Dr. Fábio Ono, da Fundação MT.

Para reforçar o fato de que a saúde do solo envolve aspectos que transcendem a questão de produtividade das culturas, a Tabela 7 apresenta outra vantagem da manutenção de solos saudáveis e biologicamente ativos. Este estudo (Portilho et al., 2015) foi realizado em condições controladas em laboratório, com solo coletado na profundidade de 0-10cm, no experimento de longa duração de ILP, da Embrapa Agropecuária Oeste. 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 7). Dessa forma, fica evidente uma outra grande vantagem da manutenção de solos biologicamente mais ativos (como os solos sob ILP) e que normalmente 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 o desenvolvimento de técnicas de remediação *in situ* de poluentes de solo com enzimas estabilizadas em fase sólida (Gianfreda e Bollag, 2002).

Sistema de Manejo*	β-Glicosidase	Fosfatase Ácida	Bifentrina	Permetrina
	$\mu\text{g } p\text{-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$		----- TD 50 (dias) -----	
ILP-soja	356 ± 4,1	1206 ± 6,8	14	9
ILP-pasto	282 ± 15,3	649 ± 4,1	25	21
SPD	188 ± 2,8	612 ± 13,6	25	22
SPC	99 ± 7,8	291 ± 14,5	44	47

Tabela 7. Atividade das enzimas β-glicosidase e fosfatase ácida (média ± erro padrão), na profundidade de 0-10cm e meia-vida no solo (TD₅₀) de dois inseticidas, sob diferentes sistemas de manejo em Dourados (MS)

* ILPsoja: integração lavoura-pecuária fase lavoura; ILP b: integração lavoura pecuária fase pastagem; SPD: plantio direto; SPC: plantio convencional.

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

Além de auxiliar o condicionamento biológico e físico do solo, sistemas de manejo conservacionistas como a ILP também promovem aumentos na MOS e na eficiência do uso de nutrientes. Para ilustrar esses efeitos, na Figura 10 são apresentados dados de um experimento de longa duração (22 anos), conduzido pela Embrapa Cerrados, pelo Dr. Djalma Sousa, no qual foram avaliados o manejo da adubação fosfatada (fontes, doses e modos de aplicação) para culturas anuais e pastagem de *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 dois anos,

pastagem por 9 anos e soja por 2 anos, sendo os cultivos de soja em SPC), os teores de MOS na camada de 0-20cm foram de 28,4 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 12). 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.

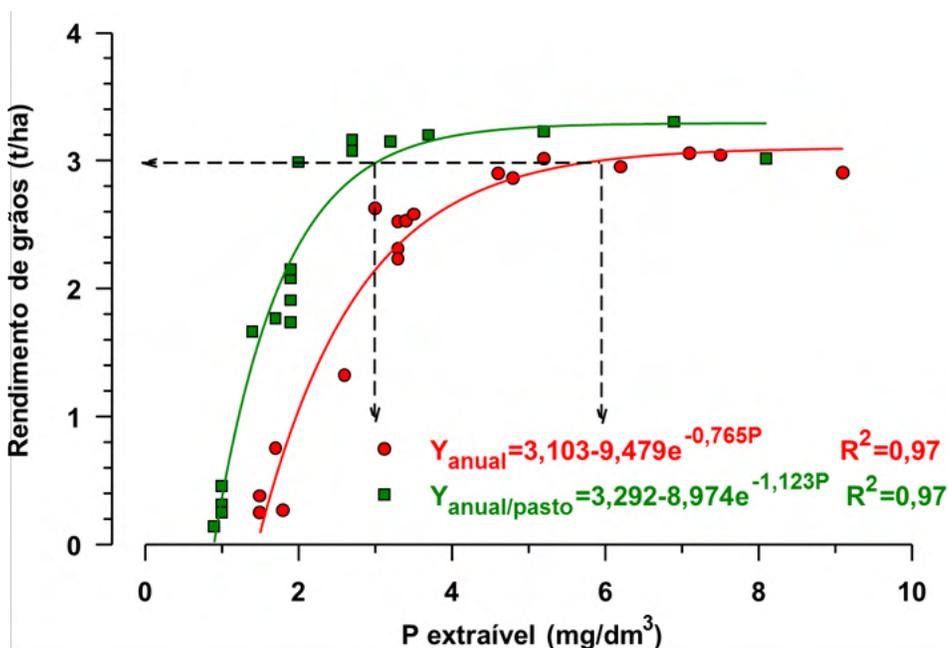


Figura 12. Efeito de sistemas de cultivo com (verde) e sem (vermelho) braquiária na relação entre o fósforo extraível por Mehlich-1 na camada de 0-20cm de profundidade e a produtividade da soja no 13º cultivo. Fonte: Sousa et al. (1997).

Outro benefício que merece destaque, reside no fato de que sistemas ILP emitem menos óxido nitroso (N₂O), um importante Gás de Efeito Estufa (GEE), quando comparados a lavouras em sistema de plantio convencional. Isso vem sendo demonstrado em estudos conduzidos na Embrapa Cerrados (DF) onde resultados de pesquisa revelaram que o uso de gramíneas forrageiras, que aportam matéria orgânica e aprofundam raízes no perfil do solo, promovem a redução das emissões de GEE, assim como a presença de

maiores volumes de agregados do solo com maiores diâmetros (Sato et al., 2019). Entre as explicações para esse resultado, observou-se que as braquiárias, forrageiras plantadas para alimentar o gado, depositam matéria orgânica mais difícil de ser degradada e, além disso, a ILP proporciona solos com agregados maiores. Com mais carbono e nitrogênio acumulados nessas partículas, a matéria orgânica presente é protegida da decomposição feita pela microbiota.

Pesquisas anteriores já haviam demonstrado que as emissões de N_2O nos sistemas agrícolas são influenciadas por condições edafoclimáticas (solo, clima, vegetação, entre outras), e que a disponibilidade de MOS é um fator chave no processo. O estudo avança na compreensão de como se dá o acúmulo de frações de MOS estáveis e lábeis (menos estáveis) nos solos sob ILP e as possíveis relações com as emissões de N_2O . As avaliações foram realizadas em 2015, na área do experimento de longa duração em ILP, iniciado em 1991 na Embrapa Cerrados – o mais antigo do Brasil – sob solo argiloso. Foram quantificadas as emissões cumulativas de N_2O por 146 dias ao longo do ciclo da cultura do sorgo (Figura 13). Uma área remanescente de Cerrado também foi avaliada como referência. As emissões acumuladas foram maiores no início do ciclo da cultura, em função da fertilização nitrogenada associada à ocorrência de chuvas, com precipitações diárias superiores a 40mm. As maiores emissões acumuladas ao fim dos 146 dias foram observadas na área com lavoura em plantio convencional, com 1,8 kg/ha de N_2O , enquanto as emissões da lavoura contínua sob plantio direto representaram metade dessa emissão (0,9 kg/ha). Entre as áreas cultivadas, o sistema ILP foi o que apresentou as menores emissões acumuladas de N_2O , com 0,79 kg/ha. Na área de Cerrado, considerada a referência positiva do estudo e onde as emissões diárias estão sempre próximas de zero, a emissão acumulada do período representou apenas 11% da emissão da lavoura em plantio convencional foi considerada como uma referência negativa.

Da mesma forma que os solos argilosos, os solos arenosos também guardam a memória do manejo do solo. A Figura 7 apresenta dados de atividade enzimática obtidos em um Neossolo Quartzarênico, na Fazenda Xanxerê, localizada no Oeste do estado da Bahia. Embora os diferentes talhões da propriedade apresentassem teores semelhantes de MOS (em média 6 g kg^{-1}), o talhão onde o milho era consorciado com a braquiária em SPD apresentou o dobro de atividade da β -glicosidase que aquele sob SPC. Todos os talhões sob SPD também apresentaram, em média, o dobro de atividade da arilsulfatase que o talhão sob SPC.

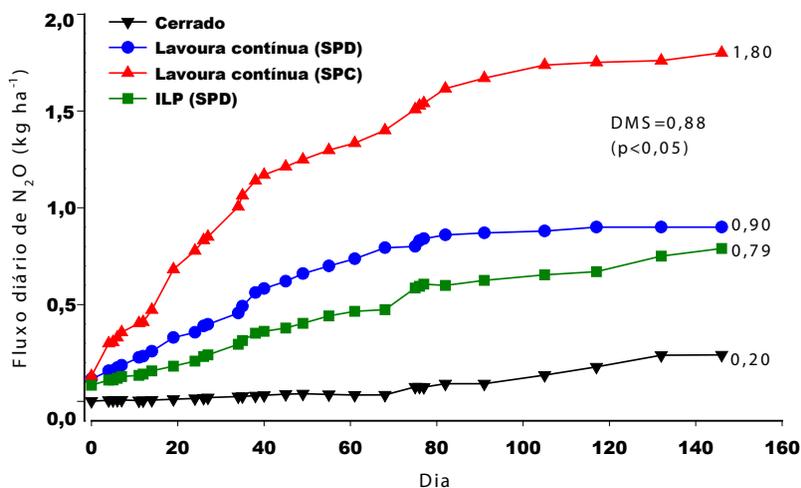


Figura 13. Fluxo diário de óxido nitroso quantificado durante o ciclo do sorgo safrinha em sucessão à soja em experimento de longa duração na Embrapa Cerrados, Planaltina-DF.

2.5 Bioanálise de solo (BioAS): Uma nova aliada para avaliar a saúde dos solos tropicais

A bioanálise do solo (BioAS) é uma tecnologia desenvolvida pela Embrapa que visa preencher a lacuna causada pela ausência do componente biológico nas análises de rotina de solos (Mendes et al., 2018 e Mendes et al., 2019, 2021). A BioAS consiste de dois bioindicadores selecionados (enzimas arilsulfatase e β -glicosidase, associadas aos ciclos do S e do C, respectivamente.), com níveis críticos definidos em tabelas de interpretação, que permitem ao agricultor monitorar a “saúde” do solo sabendo exatamente: o que avaliar, como avaliar, quando avaliar e, como interpretar o que foi avaliado. Conforme estudos realizados em Latossolos de Cerrado, em experimentos de longa duração de produção de grãos, essas duas enzimas se mostraram consistentemente relacionadas ao potencial produtivo (rendimento de grãos) e aos teores de MOS (principal componente da sustentabilidade do uso do solo) (Lopes et al., 2013, 2018; Mendes et al., 2019). Em seu estágio atual, safra 2019/2020, a tecnologia está validada para cultivos anuais em todos os solos do bioma Cerrado.

O uso da BioAS 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 em função da adoção de manejos conservacionistas como o Sistema Plantio Direto (SPD), a Integração Lavoura Pecuária (ILP) e a Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF). Conforme apresentado nesse capítulo, vários dados de pesquisa demonstram que, muitas vezes, áreas com características químicas semelhantes, possuem componente biológico completamente distintos. Dessa forma, a maior vantagem dos bioindicadores é que eles são mais sensíveis que indicadores químicos e físicos, detectando com maior

antecedência alterações que ocorrem no solo, em função do seu uso e manejo.

Nos 20 anos de estudos da Embrapa com bioindicadores para avaliação de saúde solo na região do Cerrado, em todos os experimentos/fazendas avaliados, as enzimas arilsulfatase e β -glicosidase, nessa ordem, 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, 2021). Além de sua alta sensibilidade para detectar alterações no solo, em função do sistema de manejo, outras vantagens da utilização dessas duas enzimas são: precisão, coerência, sensibilidade e simples determinação analítica, com o uso de reagentes fora da lista de controle do Exército. A arilsulfatase e a β -glicosidase possuem uma estreita relação com a MOS e o rendimento de grãos (Lopes et al. 2013, 2018; Mendes et al. 2019a) são relacionadas à ciclagem da MOS, não são influenciadas pela aplicação de adubos e se adequam ao conceito FERTBIO de amostragem de solo (coleta de solo realizada após a colheita das culturas e com os mesmos procedimentos adotados no pré-tratamento das amostras de solo para as análises de fertilidade, i.e. com secagem ao ar e peneiramento em malha de 2 mm). Essas duas enzimas também são correlacionadas com vários outros atributos microbiológicos (C da biomassa microbiana, respiração basal, fosfatase ácida, desidrogenase), o que permitiu a seleção de apenas dois indicadores para expressar o funcionamento da maquinaria biológica dos solos. A título de comparação, o programa CASH (Comprehensive Assessment of Soil Health) de monitoramento da saúde de solo, da Universidade 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 de interpretabilidade foram definidos com base em distribuições estatísticas (Moebius-Clune et al., 2016). Na Holanda, foram utilizados 12 indicadores biológicos, os quais foram interpretados com base nos valores obtidos em áreas de referência (Rutgers et al., 2012).

Conforme detalhado 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 abiômicas (enzimas que se acumulam no solo por meio de sua adsorção em partículas de argila e na MO). Isso confere às determinações das atividades das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase outras duas enormes vantagens: 1) são parâmetros INTEGRADORES relacionados a todos os componentes biológicos do solo (plantas, animais e microrganismos) e, 2) funcionam como verdadeiras impressões digitais dos sistemas de manejo aos quais o solo foi submetido permitindo, dessa forma, acessar à “memória do solo”.

Visando auxiliar na interpretação dos valores individuais dessas enzimas, foi elaborada em 2013 uma proposta baseada na utilização dos princípios dos ensaios

de calibração de nutrientes, relacionando os níveis de atividade enzimática do solo à produção de grãos e aos teores de MOS (Lopes et al., 2013). A partir dessas relações, foi determinado o nível crítico (NC) para cada enzima, que é definido como sendo o nível de atividade enzimática no solo, acima da qual pouco ou nenhum aumento na produção ou nos níveis de MOS são esperados. Ao estabelecer valores de referência para a arilsulfatase e β -glicosidase, o objetivo foi o de auxiliar na tomada de decisões sobre diferentes sistemas de manejo e/ou práticas de uso da terra e de seus possíveis impactos na saúde do solo. Assim, um valor de teste “baixo” para a atividade enzimática do solo pode ser um indício de que práticas de manejo inadequadas estejam sendo utilizadas. Para cada enzima, esses limites críticos também podem ser entendidos como os valores desejáveis que devem ser alcançados ou superados para o funcionamento normal do solo.

A BioAS pode ser comparada a um exame de sangue, no qual, através da determinação de vários parâmetros, pode-se avaliar como está nosso estado de saúde. Dessa forma, a BioAS serve como instrumento de alerta à agricultores que utilizam sistemas de manejo que eventualmente podem estar conduzindo à redução da saúde do solo, despertando o interesse de mudança em direção à adoção de práticas conservacionistas. Esse alerta é reforçado sensivelmente quando se demonstra que solos com baixa atividade de arilsulfatase e β -glicosidase são mais sensíveis à distúrbios e, cedo ou tarde, podem resultar em expressivas perdas de produtividade. Ao contrário, níveis adequados de atividade enzimática definidos pela BioAS indicam áreas manejadas adequadamente e com solos que tendem a acumular mais MOS e serem mais produtivos. Desse modo, para agricultores que já adotam sistemas de manejo conservacionistas, a BioAS pode servir como um incentivo à manutenção dessas práticas, mesmo se aumentos de MOS não tenham sido observados no curto/médio prazos.

Com o advento do conceito FERTBIO (Mendes et al., 2019), os procedimentos para a amostragem de solo, visando a BioAS são semelhantes aos adotados quando o solo é coletado para análises químicas. Para os Latossolos argilosos do bioma Cerrado, a coleta de solo para a BioAS pode ser efetuada no fim do período chuvoso, após a colheita das culturas coincidindo com a amostragem para a química de solo (quando o solo ainda apresenta alguma umidade, o que facilita a amostragem).

Um aspecto muito importante é que a camada diagnóstica para a BioAS é a profundidade de 0-10cm, por ser uma alternativa que atende bem aos objetivos das análises de fertilidade química e microbiológica do solo. No SPC, devido ao intenso revolvimento da camada arável do solo (0-20cm), os valores e teores dos indicadores da fertilidade química na camada de 0-10cm, 0-20cm e 10-20cm são muito semelhantes (Nicolodi et al., 2004). O uso da camada de 0-10 cm, como camada diagnóstica, principalmente em áreas sob SPD e/ou com mínimo preparo de solo também maximiza a sensibilidade da BioAS, ao acessar uma camada de transformações mais dinâmicas do solo (i.e., maior teor de MOS, maior

atividade biológicas e ciclagem de nutrientes) em relação à camada de 0-20cm.

2.6 Índices de qualidade de solo: integrando qualidade biológica e fertilidade do solo em áreas sob sistemas ILP

Apesar do grande interesse no desempenho ambiental da agricultura, 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; o EPA (US Environmental Protection Agency) propôs uma lista de 1800 parâmetros como indicadores de qualidade química do solo (Burns et al., 2006), enquanto que na OCDE (Organização para a Cooperação Econômica e Desenvolvimento) foram definidos 62 indicadores agroambientais (IAAs), abrangendo 11 grandes temas (OECD, 2013).

Como as condições agroecológicas 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 de país, que permitam um profundo conhecimento e embasamento sobre o melhor conjunto mínimo de IAAs, para nortear a atividade agropecuária brasileira, visando o alcance dos melhores resultados ambientais com melhor retorno econômico, possibilitando maior inserção da nossa agricultura na bioeconomia.

O uso da BioAS, como parte de um conjunto de métricas para avaliar a qualidade/saúde do solo, auxiliará na identificação de sistemas agropecuários com diferentes “condições” de sustentabilidade, reforçando o papel da agricultura como importante prestadora de serviços ambientais. Por se tratarem de medidas obtidas em diferentes glebas da propriedade agrícola (“dentro da porteira”), a BioAS visa também contribuir para difundir a importância estratégica da sustentabilidade nas cadeias produtivas associadas (carne, grãos e silvicultura), fomentando o uso de sistemas de manejo conservacionistas, que otimizam o uso dos insumos e fatores de produção. Dessa forma, o uso da bioanálise como parte das rotinas de análise de solo, favorecerá a inserção do país na bioeconomia, fornecendo métricas para atestar o crescimento agrícola com sustentabilidade.

Nesse contexto, outra inovação importante atrelada ao uso da BioAS é um índice de qualidade dos solos (IQS) capaz de integrar informações da qualidade biológica do solo, acessada pela análise das enzimas arilsulfatase e β -glicosidase, com informações obtidas nas tradicionais análises de fertilidade química do solo (pH, H+Al, Ca, K, P, Mg e MOS). O

$IQS_{Fertbio}$ pode ser decomposto em dois sub-índices: o índice de qualidade química do solo (IQS_{Fert}) e o índice de qualidade biológica do solo (IQS_{Bio}). A subdivisão do $IQS_{Fertbio}$, nesses dois sub-índices, permite diferenciar, por exemplo, áreas com IQS_{Fert} alto/muito alto, mas que não necessariamente possuem IQS_{Bio} satisfatórios, condição que dificilmente seria identificada apenas com as análises de fertilidade do solo.

O $IQS_{Fertbio}$ é baseado no modelo conceitual proposto por Karlen e Stott (1994), em que funções produtivas e/ou ambientais são atribuídas ao solo (Mendes et al., 2021). Assim, o índice atribui ao solo três funções, sendo elas: F1, relacionada à capacidade do solo de ciclar nutrientes; F2, relacionada à capacidade do solo de armazenar nutrientes e F3, relacionada à capacidade do solo de suprir nutrientes às plantas (Figura 12). A cada função é associado um peso numérico, expresso em porcentagem, que determina o seu peso relativo dentro do modelo. Similarmente, são definidos pesos para cada indicador associado a cada função do solo. Cada indicador do modelo é pontuado em uma escala de 0 a 1 por meio de funções de pontuação padronizada (FPPs e Wymore, 1993). As FPPs podem possuir três formatos básicos: formato sigmoide descendente (tipo “menos é melhor”), quando o aumento do valor do indicador representa piora do desempenho da função do solo (ex., densidade aparente); formato sigmoide ascendente (tipo “mais é melhor”), quando o aumento do valor do indicador representa melhora do desempenho da função (ex., matéria orgânica) e formato de sino (tipo “ótimo”), usada para indicadores que possuem nível ótimo para a função (ex., pH ou níveis de determinados nutrientes).

No caso das atividades das enzimas utilizadas na BioAS, para cada tipo de solo, os valores dos limites inferiores e superiores que determinam a forma das curvas das FPPs foram definidos com base nos trabalhos de calibração que estabeleceram relações entre as enzimas e os rendimentos de grãos e/ou teores de MOS (Lopes et al., 2013; Mendes et al. 2019). Finalmente, o $IQS_{Fertbio}$ é calculado pela soma das pontuações obtidas por cada indicador, ponderada pelos pesos definidos de acordo com o grau de importância atribuído tanto ao indicador, em relação à função do solo ao qual ele foi associado, quanto à própria função, em relação à qualidade global do solo. Os valores do índice variam de 0 a 1, podendo também ser decomposto em suas três funções em subíndices apresentados na mesma escala.

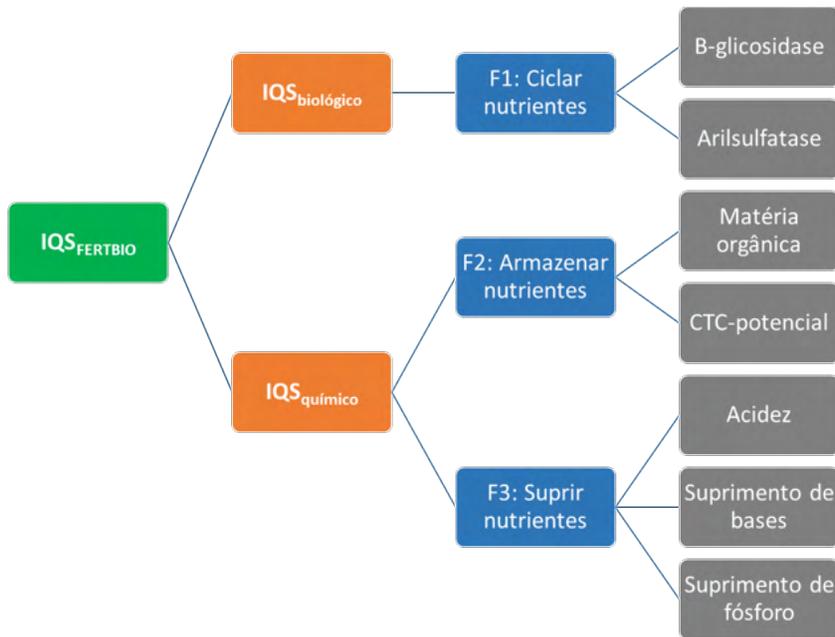


Figura 12. Representação esquemática do modelo utilizado para o cálculo do $IQS_{Fertbio}$ indicando as três funções do solo e seus respectivos indicadores. Fonte: elaborado pelos autores.

Da mesma forma que os valores de referência para a interpretação da atividade enzimática, o objetivo dos valores dos $IQS_{Fertbio}$, IQS_{Fert} e IQS_{Bio} é o de auxiliar nas tomadas de decisões relacionadas aos sistemas de manejo adotados nas propriedades agrícolas. Com relação especificamente aos aspectos avaliados no âmbito da BioAs (qualidade biológica e capacidade de ciclar nutrientes), a Tabela 8 apresenta os limites das categorias do IQS_{Bio} e suas respectivas interpretações.

	0 a 0,2: “Muito Baixo”: sistemas de produção e/ou práticas de manejo inadequadas estão sendo utilizadas.
	0,2 a 0,4: “Baixo”: sistemas de produção e/ou práticas de manejo inadequadas estão sendo utilizadas.
	0,4 a 0,6: “Médio”: provavelmente os sistemas de produção e/ou práticas de manejo precisam ser melhorados. É necessária uma avaliação criteriosa para avaliar se a área se encontra uma fase descendente (saindo do verde e indo para o amarelo), ou numa fase ascendente (saindo do vermelho e indo para o amarelo).
	0,6 a 0,8: “Alto”: sistemas de produção e/ou práticas adequadas de manejo estão sendo utilizadas.
	0,8 a 1,0: “Muito Alto”: sistemas de produção e/ou práticas adequadas de manejo estão sendo utilizadas.

Tabela 8. Categorias do Índice de Qualidade Biológica do Solo (IQS_{Bio}) e suas respectivas interpretações

O esquema semafórico de cores foi adaptado do CASH (Cornell Soil Health Assessment Framework, Moebius-Clune et al., 2016) e do SINDI (Soil Indicators in New Zealand, LandCare Institute, 2000).

Um exemplo da utilização da BioAS em áreas sob ILP é apresentado na Tabela 9. Foram utilizados os dados do experimento de longa duração de ILP localizado em Dourados, MS, apresentados na Tabela 1. A análise química dos cinco tratamentos é apresentada na Tabela 10.

Tratamento	Aril ¹	β -Gluc ¹	IQS _{FERTBIO}	IQS _{Bio}	IQS _{Fert}	F1 Ciclar	F2 Armazenar	F3 Suprir
SPC	31	88	0,57	0,32	0,73	0,32	0,53	0,86
SPD	75	138	0,66	0,57	0,74	0,57	0,56	0,86
ILP soja	126	130	0,68	0,64	0,72	0,64	0,60	0,83
ILP pasto	134	147	0,73	0,68	0,79	0,68	0,60	0,90
PP	232	170	0,72	0,32	0,74	0,81	0,61	0,73

Tabela 9. Atividade enzimática, escores dos Índices de Qualidade de Solo (IQS): Fertbio, químico e biológico e das funções do solo (ciclar, armazenar e suprir nutrientes) nos tratamentos do experimento de ILP de Dourados (Embrapa Agropecuária Oeste). Avaliações realizadas em 2015, 20° ano de condução do experimento, com solo coletado na camada de 0-10 cm

¹ Aril e β -Gluc: arilsulfatase e β -glicosidase. Valores expressos em: $\mu\text{g } p\text{-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$

Os escores do IQS_{Bio} e da função F1 (ciclar nutrientes) são semelhantes.

SPC: sistema convencional, SPD: plantio direto, ILP soja: integração lavoura-pecuária, fase lavoura; ILP pasto: integração lavoura-pecuária, fase pastagem, PP: pastagem permanente

Tratamentos	pH (H ₂ O)	COS g kg ⁻¹	Al ----- cmol _c dm ⁻³ -----	H+Al	Ca	Mg	K	P --- mg kg ⁻¹ ---
SPC	5,71	11,06	0,40	7,07	4,04	1,98	219	24
SPD	5,42	11,28	0,38	7,01	4,72	2,41	265	53
ILP soja	5,25	12,50	0,47	7,34	4,16	2,55	191	22
ILP pasto	5,68	13,03	0,16	5,19	5,25	3,68	73	16
PP	5,86	13,81	0,11	5,02	4,48	3,33	174	3

Tabela 10. Atributos químicos do solo, na camada 0-10cm, do experimento de longa duração de ILP localizado em Dourados, MS (safra 2015/2016). Avaliações realizadas em 2015, 20° ano de condução do experimento

SPC: sistema convencional, SPD: plantio direto, ILP soja: integração lavoura-pecuária, fase lavoura; ILP pasto: integração lavoura-pecuária, fase pastagem, PP: pastagem permanente

Com base nas pontuações calculadas pelo “Módulo de Interpretação da Qualidade de Solo da Rede BioAS” e na classificação cromática apresentados na Tabela 9, verifica-se que entre os 5 tratamentos avaliados, o solo sob SPC apresentou menor desempenho das funções F1 e F2 (pontuação baixa e moderada para as funções ciclagem e suprimento, respectivamente). O solo sob SPD apresentou pontuações moderadas para as funções F1

e F2. Nos solos dos tratamentos, sob ILP e na pastagem permanente, todas as funções e IQS pontuaram nos níveis alto e muito alto. Vale ressaltar que para a função F3 (suprimento de nutrientes), todos os tratamentos, inclusive o SPC, pontuaram nos níveis alto e muito alto, indicando que todas as áreas receberam um manejo adequado de correção da fertilidade do solo. Com base nesses resultados as pontuações do IQS_{Fertbio} aumentaram no sentido $SPC < SPD = ILPa < ILPb < PP$, variando de 0,57 até 0,73. Embora a pontuação do IQS_{Bio} (idêntica à da F1, ciclagem de nutrientes) tenha seguido o mesmo padrão, a amplitude de variação foi maior 0,3 a 0,68, confirmando a capacidade e a sensibilidade dos indicadores biológicos em diferenciar os tratamentos.

Os dados apresentados na Tabela 1, evidenciam que a BioAS inaugura uma nova forma de avaliar e monitorar a qualidade dos solos (e paralelamente dos sistemas de manejo adotados) numa visão sistêmica. As avaliações das atividades das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase permitem vislumbrar aspectos que passariam despercebidos na análise química tradicional (conforme demonstrado pelas pontuações da função F3, suprimento de nutrientes) e, assim, melhorar a performance da agricultura nos solos tropicais, muitas vezes prejudicada por sistemas de manejo que degradam a saúde/qualidade dos mesmos.

Com o desenvolvimento da BioAS, a lacuna deixada pela ausência do componente biológico nas análises de solo finalmente será preenchida. Assim, verifica-se que o uso dessa tecnologia, colocará o Brasil na vanguarda mundial desse assunto. Um grande diferencial na utilização do “Módulo de Interpretação da Qualidade de Solo da Rede BioAS” é que todos os parâmetros foram calibrados em relação ao rendimento de grãos das culturas. No caso das enzimas, além do rendimento de grãos também foi considerado o teor de MOS que, para solos tropicais, tem grande relevância.

O modelo de Karlen e Stott foi replicado e adaptado por diversos autores na calibração de sistemas indicadores da qualidade do solo, a exemplo do “Sistema de Monitoramento da Qualidade do Solo – SIMOQS” (Chaer, 2001), do “Soil Management Assessment Framework - SMAF” (Andrews et al., 2004; Wienhold et al., 2004; Zobeck et al., 2008, 2015; Stott et al., 2013; Cherubin et al., 2017) e do CASH (The Cornell Comprehensive Assessment of Soil Health) desenvolvido pela Universidade de Cornell (Moebius-Clune et al., 2016). Entretanto, em todas essas abordagens o ponto chave é o estabelecimento de níveis de referência que facilitem a interpretação dos bioindicadores de QS (Arshad e Martin, 2002; Lopes et al., 2013). No trabalho de Chaer (2001), os valores dos limites superiores para os bioindicadores foram definidos como sendo o valor da maior média entre os tratamentos avaliados. No SMAF, os valores de referência de β -glicosidase utilizados nas FPPs foram obtidos a partir de dados de literatura representando diferentes tipos de solo e condições climáticas (Stott et al., 2010). No CASH os escores das funções de pontuação de cada indicador (químico, físico e biológico) são calculados a partir de dados de distribuição normal acumulada, oriundos do banco de dados de amostras de solo do Laboratório de

Saúde de Solo da Universidade de Cornell. Nesse caso, assume-se que quanto maiores os valores dos indicadores de QS melhores são as condições proporcionadas pelos sistemas de manejo.

Ao possibilitar a inclusão de métricas cuja interpretação foi definida com base no rendimento das lavouras e na MOS, o IQS_{FERTBIO} e sua decomposição nos IQS_{FERT} e IQS_{BIO} são ferramentas importantes para atestar que o crescimento agrícola com sustentabilidade é, de fato, uma grande oportunidade para o nosso país.

3 . CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse capítulo foi escrito durante a pandemia da Covid-19. Apesar de todo o desenvolvimento tecnológico, um vírus fez o mundo parar e refletir. Ainda é cedo para avaliar como será o mundo pós-pandemia. Sejam quais forem os impactos, produzir alimentos saudáveis, em quantidade e de forma saudável, permanecem sendo questões fundamentais. O mantra “solos saudáveis, pessoas, plantas e animais saudáveis” é mais atual do que nunca.

A possibilidade de uma agricultura sustentável e com solos saudáveis baseada no uso de gramíneas tropicais forrageiras, como plantas de cobertura, é uma combinação na qual todos saem ganhando: o agricultor, o meio ambiente e a sociedade como um todo. Assim, a expansão de áreas sob ILP no Brasil, favorece a inserção estratégica e competitiva da nossa agricultura no contexto nacional e mundial da bioeconomia (modelo de produção baseado no uso otimizado dos recursos biológicos, para a promoção de uma economia sustentável). Os trabalhos de monitoramento e quantificação dos impactos da adoção de sistemas ILP na saúde do solo, não precisam, necessariamente, ser uma tarefa onerosa. Conforme verificado neste capítulo, a tecnologia de bioanálise de solo (BioAS) envolve a inclusão de dois bioindicadores robustos e com alta sensibilidade – as enzimas do solo arilsulfatase e β -glicosidase – nas análises de solo e facilita a mensuração das alterações na saúde do solo, em função da adoção dos sistemas de intensificação sustentável (Mendes et al., 2018a; 2019a). A quantificação desses impactos é importante para possibilitar a maximização da contribuição dos fatores biológicos nos agroecossistemas tropicais; para incentivar agricultores que já estão adotando sistemas de manejo conservacionistas e para alertar aqueles que, porventura, estejam usando sistemas de manejo que possam levar à degradação do solo.

Outra inovação atrelada ao uso da BioAS é o cálculo de índices para avaliar a qualidade dos solos (IQS), com base nas determinações dos atributos de fertilidade química e nos atributos microbiológicos, inaugurando uma forma mais abrangente de interpretação da saúde dos nossos solos, que vai além das questões de deficiência/excesso de nutrientes. O uso da BioAS, como métrica para avaliar a qualidade/saúde do solo, auxiliará

na identificação de sistemas agropecuários com diferentes “condições” de sustentabilidade e, nesse sentido, será um importante aliado para reforçar o papel dos sistemas de intensificação sustentável como importantes prestadores de serviços ambientais.

AGRADECIMENTOS

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), pelo apoio aos nossos trabalhos com Bioindicadores e saúde do solo. Aos funcionários atuais (Clodoaldo A. de Sousa, Lucas F.L.S. Rolim) e aposentados (Emílio J. Taveira, Maria das Dores Silva, Odete J. dos Santos e Vilderete Castro Alves) do laboratório de Microbiologia do Solo da Embrapa Cerrados que participaram dessas pesquisas, desde 1998. Aos técnicos-agrícolas Osmar T. Oliveira e Valmir V. de Sousa, a todos os estudantes de graduação e pós-graduação e aos colegas pesquisadores/professores: Cícero Figueiredo (UnB), Claudinei Kappes, Fábio Ono (FMT), Jeander Oliveira Caetano (FESURV), Leandro Zancanaro (FMT), Lourival Vilela (Embrapa Cerrados), Luis Carlos Hernani (Embrapa Solos), Marco Nogueira (Embrapa Soja), Mariangela Hungria (Embrapa Soja), Marilusa Lacerda (UnB). A primeira autora agradece o auxílio de bolsas e financiamento de projetos pela Embrapa (Projeto Bioindicadores - MP2), CNPq (Edital de Redes REPENSA, Processo: 562433/2010-4, Edital Universal Processo 404764/2016-9), FAPDF (Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Distrito Federal processos 193.000.079/2012 e 1355/2016) e MCTI/CNPq/CAPES/FAPS (INCT-MPCPAgro).

REFERÊNCIAS

Andrews SS, Karlen DL, Cambardella CA. The e soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Sci Soc Am J.* 2004; 68: 1945-1962. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>

Anghinoni, G, Anghinoni, F, Tormena, CA, Braccini, AL, Mendes, IC; Zancanaro, L, Lal, R. Conservation agriculture strengthen sustainability of Brazilian grain production and food security. *Land Use Policy.* 2021; 108: 105591.

Arshad MA, Martinb S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agr Ecosyst Environ.* 2002; 88: 153-160. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00252-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00252-3)

Bandick AK, Dick RP. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biol Biochem.* 1999; 31: 1471-1479. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00051-6)

Benites VM, Caetano JO, Ferreira Filho WC, Menezes CCE, Polidoro JC, Oliveira RP, Wiendl T. Influence of brachiaria (*Urochloa brizantha*) as a winter cover crop on potassium use efficiency and soybean yield under no-till in the Brazilian Cerrado. *e-ific.* 2014; 39: 24-35.

Burns RG, Nannipieri P, Benedetti A, Hopkins DW. Defining soil quality. In: Bloem J, Hopkins DW, Benedetti A. (eds). *Microbiological methods for evaluating soil quality*. Cambridge. CABI Publishing. 2006; 23-49.

Carneiro R G, Mendes I C, Lovato P E, Carvalho AM, Vivaldi LJ. Indicadores biológicos associados ao ciclo do fósforo em solos de Cerrado sob plantio direto e plantio convencional. *Pesq Agropec Bras*. 2004; 39(7): 661-669. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000700007>

Chaer GM, Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos. (Dissertação Mestrado) Departamento de Microbiologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 90p. 2001.

Cherubin MR, Tormena CA, Karlen DL. Soil Quality Evaluation Using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with Contrasting Texture. *Rev Bra Ci Solo*. 2017; 41: e0160148. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcsc20160148>

Dick RP, Burns RG. A brief history of soil enzyme research. In: Dick RP, editor. *Methods of soil enzymology*. Madison: Soil Science Society of America. 2011; 1-19. <https://doi.org/10.2136/sssabookser9.c1>

FEBRAPD - Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha – FEBRAPDP. 2017. Área de plantio direto no Brasil. [acesso em 19 de março de 2017]. Disponível em <http://febrapdp.org.br/>.

Gianfreda L, Bollag JM. Isolated enzymes for the transformation and detoxification of organic pollutants. In: Burns RG; Dick RP, editor. *Enzymes in the environment: activity, ecology, and applications*. New York: Marcel Dekker. 2002; 495-538. <https://doi.org/10.1201/9780203904039-19>

Hatfield JL, Sauer TJ, Cruse RM. Soil: The forgotten piece of the water, food, energy nexus. *Adv Agron*. 2017; 143: 1-46. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.02.001>

Kaschuk G, Alberton O, Hungria M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. *Soil Biol Biochem*. 2010; 42: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.08.020>

Karlen DL, Stott DE. 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; 53-72. (Special Publication, 35). <https://doi.org/10.2136/sssaspepub35.c4>

Lehman RM, Cambardella CA, Stott DE, Acosta-Martinez V, Manter DK, Buyer JS, Maul JE, Smith JL, Collins HP, Halvorson JJ, Kremer, RJ, Lundgren JG, Ducey TF, Jin VL, Karlen DL. Understanding and Enhancing Soil Biological Health: The Solution for Reversing Soil Degradation. 2015; 7(1): 988-1027. <https://doi.org/10.3390/su7010988>

Lopes AAC, Sousa DMG, Reis Junior FB, Figueiredo CC, Malaquias JV, Souza LM, Mendes IC. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Reg*. 2018; 12: 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.01.003>

Lopes AAC, Sousa DMG, Chaer GM, Reis Junior FB, Goedert WJ, Mendes IC. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Sci Soc Am J*. 2013; 77: 461 – 472. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0191>

Lupwayi NZ, Harker KN, O'Donovan JT, Turkington TK, Blackshaw RE, Hall LM, Willenborg CJ, Gan Y, Lafond GP, May WE, Grant CA. Relating soil microbial properties to yields of no-till canola on the Canadian prairies. *Eur J Agron*. 2015; 62: 110-19. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.10.004>

Matsuoka M, Mendes IC, Loureiro MF. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). *Rev Bras Cienc Solo*. 2003; 27(3): 425-433. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000300004>

Mei N, Yang B, Tian P. Using a modified soil quality index to evaluate densely tilled soils with different yields in Northeast China. *Environ Sci Pollut Res*. 2019; 26: 13867-13877. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3946-2>

Mendes, IC, Sousa, DMG, Dantas, OD, Lopes, AAC, Reis Junior, FB, Oliveira, MIL, Chaer, GM. Soil quality and grain yield: a win-win combination in clayey tropical Oxisols. *Geoderma*. 2021; 388 (114880).

Mendes IC, Sousa DMG, Reis Junior FB. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. *Cad Ciên Tecnol*. 2015; 32: 191-209. <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2015.v32.23311>

Mendes IC, Sousa DMG, Reis Junior FB, Lopes, AAC. Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2018 (Circular Técnica, 38).

Mendes IC. Indicadores biológicos de qualidade de solo em sistemas de plantio direto no Brasil: estado atual e perspectivas futuras. In: Moreira MS, Kasuya MCM, editores. *Fertilidade e biologia do solo: integração e tecnologia para todos*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2016; 1: 297-322.

Mendes IC, Caetano JO, Hernani LC, Reis-Junior FB, Benites VM. Soil enzymes activities in Cerrados grain-crops farming systems with Brachiaria. In: *World Congress on Integrated Crop-Livestock-Forest Systems*; 2015; Brasília, DF. Brasília, DF: Embrapa; 2015.

Mendes IC, Chaer GM, Reis Junior FB, Sousa DMG, Dantas, OD, Oliveira, MIL, Malaquias, JV. Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo— Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021. 50 p. (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111, ISSN online 2176-5081, 369).

Mendes IC, Fernandes MF, Chaer GM, Reis Junior FB. Biological functioning of brazilian cerrado soils under different vegetation types. *Plant Soil*. 2012; 359: 183-195. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1195-6>

Mendes IC, Kappes C, Ono FB, Sousa DMG, Reis-Junior FB, Lopes AAC, Semler TD, Zancanaro L. Qualidade biológica do solo: por que e como avaliar. Rondonópolis: *Boletim de Pesquisa da Fundação MT*. 2017; 98-105.

Mendes IC, Sousa DMG, Reis Junior FB, Lopes AAC. Indicadores de qualidade biológica para manejo sustentável de solos arenosos. Viçosa, MG: *Boletim Informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*. 2018; 44: 22-27.

Mendes IC, Souza LM, Sousa DMG, Lopes AAC, Reis Júnior FB, Lacerda MPC, Malaquias JV. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: the FERTBIO soil sample concept. *Appl Soil Ecol*. 2019; 139: 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>

Mendes IC, Souza LV, Resck DVS, Gomes AC. Biological properties of aggregates from a Cerrado Oxisol under conventional and no-till management systems. *Rev Bras Cienc Solo*. 2003; 27: 435-443. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000300005>

Mendes IC, Tormena CA, Cherubin MR, Karlen DL. Soil health assessment and maintenance in Central and South-Central Brazil. In: Reicosky D, editor. *Managing soil health for sustainable agriculture: Monitoring and management*. Cambridge: Burleigh Dodds Science publishing; 2018; 2: 379-415. <https://doi.org/10.19103/AS.2017.0033.35>

Moebius-Clune BN, Moebius-Clune DJ, Gugino BK, Idowu OJ, Schindelbeck RR, Ristow AJ, Van Es HM, Thies JE, Shayler HA, McBride M, Wolfe DW, Abawi GS. *Comprehensive assessment of soil health*. Cornell University, Geneva, NY. 2016 [acesso em 03 de maio 2020]. Disponível em: <http://soilhealth.cals.cornell.edu/>.

Nicolodi M, Gianello C, Anghinoni I. Fertilidade: uma propriedade emergente do sistema solo [CD-ROM]. In: V Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo; 2004; Florianópolis. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul; 2004.

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. *Rev Bras Cienc Solo*. 2008; 32: 2735-41. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000700017>

Peixoto RS, Chaer GM, Franco N, Reis Jr FB, Mendes IC, Rosado AS. A decade of land use contributes to changes in the chemistry, biochemistry and bacterial community structures of soils in the Cerrado. *Anton Leeuw*. 2010; 98: 403-413. <https://doi.org/10.1007/s10482-010-9454-0>

Portilho IIR, Scorza Júnior RP, Salton JC, Mendes IM, Mercante FM. Persistência de inseticidas e parâmetros microbiológicos em solo sob sistemas de manejo. *Cienc Rural*. 2015; 45: 22-28. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20131328>

Raij B van. A capacidade de troca catiônica das frações orgânica e mineral e solos. *Bragantia*. 1969; 28: 85-112.

Resck DVS, Pereira J, Silva JE, da. Dinâmica da matéria orgânica dos na região dos Cerrados. Planaltina: EMBRAPA-CPAC. 1991; 22p. (EMBRAPA-CPAC). 1991; Documentos, 36.

Rutgers M Van, Wijnen HJ, Schouten AJ, Mulder C, Kuiten AMP, Brussaard L, Breure AM. A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. *Sci Total Environ*. 2012; 415: 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.041>

Salton JC, Pezarico CR, Tomazi M, Comas CC, Richetti A, Mercante FM, Concenção G. 20 Anos de Experimentação em Integração Lavoura-Pecuária na Embrapa Agropecuária Oeste: relatório. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste. 2015;167 p. (Documentos 130).

Sato, JH; Figueiredo, CC; Marchão, RL ; Oliveira, AD; Vilela, L., Delvico, FMS, Alves, BJR, Carvalho, AM . Understanding the relations between soil organic matter fractions and N O emissions in a long-term integrated crop-livestock system. *Eur J Soil Sci*. 2019; 12819.

Sousa DMG de, Vilela L, Rein, TA, Lobato E. Eficiência da adubação fosfatada em dois sistemas de cultivo em um latossolo de cerrado. In: Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. 1997; Rio de Janeiro, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1997; 57-60.

Souza LM, Sousa DMG, Reis-Júnior FB, Mendes IC. Carbono da biomassa microbiana em Latossolos determinado por oxidação úmida e combustão a temperatura elevada. *Pesq Agropec Bras.* 2015; 50: 1061-1070. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001100009>

Stott DE, Karlen DL, Cambardella CA, Harmel RD. A soil quality and metabolic activity assessment after fifty-seven years of agricultural management. *Soil Sci Soc Am J.* 2013; 77: 903–913. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0355>

OECD. OECD Compendium on Agri-Environmental Indicators, OECD Publishing. 2013. <https://doi.org/10.1787/9789264186217-en>

Stott DE, Andrews SS, Liebzig MA, Wienhold BJ, Karlen DL. Evaluation of β -Glucosidase activity as a soil quality indicator for the soil management assessment framework. *Soil Sci Soc Am J.* 2010; 74: 107-119. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0029>

Tabatabai MA. Soil enzymes. In R.W. Weaver et al. (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties.* SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison. 1994; 778–833. <https://doi.org/10.1002/047126363X.agr354>

Vasu D, Singh SK, Ray SK, Duraisami VP, Tiwary P, Chandran P, Nimkar AM, Anantwar SG. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma.* 2016; 282: 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.010>

Wallenstein MD, Burns RG. Ecology of extracellular enzyme activities and organic matter degradation in soil: a complex community-driven process. In: Dick RP, editor. *Methods of soil enzymology.* Madison: Soil Science Society of America. 2011; 35-56. <https://doi.org/10.2136/sssabookser9.c2>

Wienhold BJ, Andrews SS, Karlen DL. Soil quality: a review of the science and experiences in the USA. *Environ Geochem Health.* 2004; 26(2-3): 89-95. <https://doi.org/10.1023/B:EGAH.0000039571.59640.3c>

Wymore AW. *Model-based systems engineering. An introduction to the mathematical theory of discrete systems and to the tricategory theory of systems design.* CRC, Boca Raton, FL. 1993.

Zobeck TM, Halvorson B, Wienhold BJ, Acosta-Martinez V, Karlen DL. Comparison of two soil quality indexes to evaluate cropping systems in northern Colorado. *J. Soil Water Conserv.* 2008; 63: 329–338. <https://doi.org/10.2489/jswc.63.5.329>

Zobeck TM, Steiner JL, Stott DE, Duke SE, Starks PJ, Moriasi DN, Karlen DL. Soil quality index comparisons using fort cobb, Oklahoma, watershed-scale land management data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2015; 79: 224–238. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.06.0257>

Zuber SM, Villamil MB. Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities. *Soil Biol Biochem.* 2016; 97: 176-87. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.03.001>

Núcleo Regional Leste
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Manejo do solo em sistemas integrados de produção

André Guarçoni Martins | Araújo Hulmann Batista | Beno Wendling
Marcos Gervasio Pereira | Wedisson Oliveira Santos
(Editores)



Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

Gentilmente cedidas pela Dra. Margarida

Goréte Ferreira do Carmo (UFRRJ) – superior –

e Dr. Wanderlei Bieluczyk (CENA-USP) – inferior

(Foto de sistema de integração pecuária-floresta)

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano

Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras

Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Universidade do Estado de Mato Grosso



Manejo do solo em sistemas integrados de produção

Diagramação: Natália Sandrini de Azevedo
Correção: Yaiddy Paola Martinez
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Araína Hulmann Batista
Wedisson Oliveira Santos
Organizadores: André Guarçoni Martins
Araína Hulmann Batista
Beno Wendling
Marcos Gervasio Pereira
Wedisson Oliveira Santos

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M274 Manejo do solo em sistemas integrados de produção / Organizadores André Guarçoni Martins, Araína Hulmann Batista, Beno Wendling, et al. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Outros organizadores
Marcos Gervasio Pereira
Wedisson Oliveira Santos

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-0445-3
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.453222608>

1. Solos - Manejo. 2. Agricultura. I. Martins, André Guarçoni (Organizador). II. Batista, Araína Hulmann (Organizadora). III. Wendling, Beno (Organizador). IV. Título. CDD 631.4

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

