



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

AMANDA LETÍCIA PIT NUNES

**QUALIDADE ESTRUTURAL DO SOLO SOB DIFERENTES
USOS E MANEJOS E RELAÇÃO COM ATRIBUTOS
MICROBIOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS**

AMANDA LETÍCIA PIT NUNES

**QUALIDADE ESTRUTURAL DO SOLO SOB DIFERENTES
USOS E MANEJOS E RELAÇÃO COM ATRIBUTOS
MICROBIOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Nogueira
Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Ralisch

Londrina
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

P685 Pit Nunes, Amanda Letícia.
Qualidade estrutural do solo sob diferentes usos e manejos e relação com atributos microbiológicos e bioquímicos / Amanda Letícia Pit Nunes. - Londrina, 2019.
89 f. : il.

Orientador: Marco Antonio Nogueira.
Coorientador: Ricardo Ralisch.
Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2019.
Inclui bibliografia.

1. Qualidade do solo - Tese. 2. Estrutura do solo - Tese. 3. Microbiologia do solo - Tese. 4. Agricultura conservacionista - Tese. I. Nogueira, Marco Antonio. II. Ralisch, Ricardo. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU 63

AMANDA LETÍCIA PIT NUNES

**QUALIDADE ESTRUTURAL DO SOLO SOB DIFERENTES USOS E
MANEJOS E RELAÇÃO COM ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS E
BIOQUÍMICOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Nogueira
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Dra. Adriana Pereira da Silva
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Dr. Alvadi Antonio Balbinot Junior
Embrapa Soja

Dr. Henrique Debiasi
Embrapa Soja

Dra. Mariangela Hungria
Embrapa Soja

Londrina, 16 de dezembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Londrina, pela minha formação como Engenheira Agrônoma, por ter expandido meu interesse pela agricultura e a importância da sustentabilidade dos sistemas produtivos. Ao programa de Pós-graduação em Agronomia da UEL, pela oportunidade de obtenção de meu título de mestre e doutora em Agronomia. Agradeço também à Embrapa Soja por toda infraestrutura e suporte no desenvolvimento do projeto.

Agradeço ao meu orientador, Marco Antonio Nogueira, pela orientação neste trabalho, mas principalmente pelo exemplo na profissão, como agrônomo, professor e pesquisador, por sua afeição e dedicação pela ciência, e serenidade e retidão em tudo que faz.

Agradeço ao meu coorientador, Ricardo Ralisch, pelo suporte, amizade e por confiar no meu trabalho, desde a orientação à minha dupla diplomação durante a graduação, orientação no TCC, no mestrado e coorientação no doutorado. Obrigada por ter apoiado e direcionado meu retorno à vida acadêmica (o que resultou em satisfação e realização pessoal e profissional), e que posso considerar membro da família.

À professora Maria de Fátima Guimarães, pelas orientações durante a pós-graduação, mas acima de tudo, pelo exemplo na ciência e no amor pelo ensino, por ser uma pessoa admirável e digna de toda amizade e carinho.

Aos doutores Mariangela Hungria, Alvadi Antonio Balbinot Junior e Henrique Debiasi, pelo suporte na condução dos experimentos, amostragens e análises, e por motivar o exercício da ciência e seu benefício na sustentabilidade da agricultura, sempre visando a aplicabilidade da pesquisa. Além disso, são profissionais exemplares, seja como engenheiros agrônomos ou como pesquisadores.

Ao meu marido, Evandro Rosa, pelo amor, pela compreensão e pelo apoio. Por me incentivar na carreira acadêmica, científica e docente, por suportar as horas de ausências, as flutuações de humor (longas horas de mau humor), e também por me ajudar em algumas atividades ao longo do doutorado. Meu companheiro nas horas boas e ruins, obrigada por permanecer sentado comigo durante as noites e finais de semana, me olhando trabalhar. A excelente profissional que você tanto fala que eu sou, ainda está em fase de construção (graças à sua paciência)! Te amo infinito!

Às amigas que a graduação e a pós-graduação me deram, pela amizade, confiança e compreensão (somente quem vive uma pós-graduação entende): Geovanna Cristina Zaro, Gabriela Machineski, Flavia Werner, Gabriela Inocente e Karla Bianca Lopes. Todas essas mulheres de garra são excelentes profissionais da pós atual, o que tem sido cada vez mais raro. Voem meninas, segundo o seu potencial, o mundo é pequeno para nós! Tenho certeza que nossa rede de pesquisa um dia ainda fará diferença na agricultura e na vida de muitas pessoas!

Gostaria de agradecer também a algumas pessoas que contribuíram para a realização desse trabalho (durante o período da amostragem, nos ensinamentos de laboratório ou em análises laboratoriais), colegas da pós-graduação, estagiários da Embrapa Soja e técnicos de campo e de laboratório, sem eles esse trabalho não seria possível: Adriana Pereira da Silva, Ana Carolina Polinarski Coqueiro, Agostinho Aparecido da Silva, Antônio Aparecido Jacobino, Antonio Eduardo Coelho, Artur Berbel Lírio Rondina, Brenda Cristye Tonon Debiasi, Caroline Honorato Rocha, Donizete Aparecido Loni, Everson Balbino, Flavia Werner, Jhenifer Passos, João Machado, Joviano Jacson Kleinert, Lucas Mateus Hass, Luiz Gustavo Garbelini, Marcio Praxedes, Mariluci da Silva Pires e Rafael Soriani.

Aos colegas de laboratório pelo suporte e compreensão, pelas conversas, risadas, dicas e cafés. Pertencendo a dois laboratórios, fica fácil ter uma equipe de apoio: obrigada Laboratório de Solos da UEL e Laboratório de Biotecnologia do Solo da Embrapa Soja!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de doutorado - Código de Financiamento 001, sem a qual esse projeto não teria sido possível.

“Conhecimento não é aquilo que você sabe, mas o que você faz com aquilo que você sabe.” – Aldous Huxley

PIT NUNES, Amanda Letícia. **Qualidade estrutural do solo sob diferentes usos e manejos e relação com atributos microbiológicos e bioquímicos**. 2019. 89 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

RESUMO

O monitoramento e a promoção da qualidade do solo (QS) são fundamentais para a sustentabilidade da produção agropecuária, frente à crescente população mundial que pressiona a intensificação do uso do solo. Atributos físicos, químicos, microbiológicos e bioquímicos são usados para avaliar a QS, sendo que os microbiológicos e bioquímicos apresentam rápidas respostas às alterações impostas pelo manejo. A elucidação da relação entre atributos físicos e biológicos é importante para delinear estratégias de manejo que incrementem a QS. O objetivo da tese foi identificar e qualificar a estrutura de solos cultivados sob diferentes usos e sistemas de manejo e correlacioná-la com indicadores microbiológicos e bioquímicos da QS. Um ensaio foi desenvolvido em solo muito argiloso na Embrapa Soja, Londrina – PR, para avaliar o efeito do Sistema Plantio Direto (SPD) e da degradação estrutura do solo induzida pela compactação por tráfego de trator e escarificação. Em condição de solo arenoso, foram realizadas avaliações em áreas agrícolas comerciais no município de Jardim Olinda – PR sob diferentes usos do solo: Integração Lavoura Pecuária (ILP) na fase soja, ILP na fase pastagem, Cana-de-açúcar, Pastagem degradada e Mata Nativa, usada como referência. Os atributos físicos e químicos avaliados foram: qualidade estrutural pelo Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES), granulometria, densidade do solo, porosidade, pH, carbono orgânico, nitrogênio total e, macro e micronutrientes, usados para definir as diferenças físico-químicas entre as áreas avaliadas. Quanto aos atributos microbiológicos e bioquímicos foram avaliados: C e N da biomassa microbiana, respiração basal, quocientes metabólico e microbiano, e atividade das enzimas arilsulfatase, β -glucosidade, celulase, fosfatase, L-glutaminase e urease. Em ambas condições de solo, a melhoria da qualidade estrutural foi relacionada com a melhoria da qualidade microbiológica e bioquímica. O DRES se revelou metodologia integrativa, permitindo a avaliação e monitoramento da qualidade estrutural, relacionada com a qualidade microbiológica e bioquímica nos solos de classes texturais contrastantes. Os atributos microbiológicos e bioquímicos se mostraram eficazes no monitoramento de modificações nos agroecossistemas resultantes do uso e manejo do solo, sendo também concordantes com o DRES. Os sistemas conservacionistas (SPD e ILP) resultaram em melhor QS, refletida em maior índice de qualidade estrutural e em melhor qualidade microbiológica e bioquímica. Entretanto, os solos submetidos ao revolvimento e/ou ao monocultivo indicaram condições estressantes à comunidade microbiana. Destaca-se que a verificação de diferentes qualidades estruturais do solo permitiu inferir sobre atributos microbiológicos e bioquímicos. Metodologias, como o DRES, de baixo custo e fácil aplicação, devem ser difundidas, para que técnicos e produtores possam diagnosticar as condições dos sistemas produtivos e priorizar manejos do solo que promovam a sustentabilidade agrícola.

Palavras-chave: Qualidade do solo. Indicadores de qualidade do solo. Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo. Atividade enzimática do solo.

PIT NUNES, Amanda Letícia. **Structural quality of soils under different uses and management and relationship with microbiological and biochemical attributes.** 2019. 89 p. Thesis (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

ABSTRACT

Monitoring and promoting the soil quality (SQ) are fundamental for the sustainability of cropping systems, facing the ever growing world population that lead to the intensification soil use. Physical, chemical, microbiological and biochemical attributes are used to evaluate the SQ, where the microbiological and biochemicals are more sensitive in identifying changes imposed by management. The elucidation of the relationship between physical and biological attributes is important for outlining management strategies that increase SQ. The aim was to identify and to qualify the structure of soils cropped under different uses and management systems and to correlate it with microbiological and biochemical indicators of SQ. A trial was carried out in a very clayey soil at Embrapa Soja, Londrina - PR, to evaluate the effect of No-Till System (NTS) and the soil structure degradation induced by compaction by tractor traffic and chiseling. In a sandy soil, assessments were performed in commercial agricultural areas at Jardim Olinda - PR, under different soil uses: Integrated Crop Livestock (ICL) with soybean, ICL with pasture, Sugarcane, Degraded pasture and Native Forest, used as reference. The assessed physical and chemical attributes were: structural quality by the Rapid Soil Structure Diagnosis (DRES, from Portuguese), granulometric fractions, soil bulk density, porosity, pH, total organic carbon and nitrogen, macro and micronutrients, used to define the physicochemical differences among the assessed areas. The following microbiological and biochemical attributes were assessed: C and N microbial biomass, basal respiration, metabolic and microbial quotients, and activity of the following enzymes arylsulfatase, β -glucosidase, cellulase, phosphatase, L-glutaminase and urease. In both soils, the improvement of soil structural quality correlated with the improvement of the microbiological and biochemical quality. The DRES method proved to be an integrative methodology in monitoring the structural quality, related to microbiological and biochemical qualities in soils of contrasting textural classes. The microbiological and biochemical attributes were effective in monitoring changes in the agroecosystems resulting from soil use and management, and were also in agreement with DRES methodology. Conservation agricultural systems (NTS and ICL) resulted in better SQ, as a result of higher structural quality index and better microbiological and biochemical quality. However, soils under tillage and / or monocrop showed stressful conditions to the microbial community. It is noteworthy that the verification of different soil structural qualities allowed us to infer about microbiological and biochemical attributes. Low-cost and easy-to-apply methodologies such as DRES should be disseminated so that all technicians and farmers could diagnose the conditions of cropping systems and prioritize soil managements that promotes agricultural sustainability.

Key words: Soil quality. Soil quality indicators. Rapid Soil Structure Diagnosis. Soil enzymes.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1	QUALIDADE DO SOLO (QS).....	11
2.2	INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO.....	12
2.3	ESTRUTURA COMO INDICADOR FÍSICO DA QUALIDADE DO SOLO.....	13
2.3.1	Avaliação visual da estrutura do solo	13
2.4	INDICADORES MICROBIOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS DA QUALIDADE DO SOLO	17
2.4.1	Biomassa Microbiana (BM)	17
2.4.2	Respiração Basal (RB).....	19
2.4.3	Atividade Enzimática	20
2.5	RELAÇÃO ESTRUTURA DO SOLO E ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS	23
2.6	SISTEMAS DE MANEJO E INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO.....	25
3	REFERÊNCIAS	27
4	ARTIGO A - QUALIDADE ESTRUTURAL E ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO MUITO ARGILOSO SOB ESCARIFICAÇÃO E COMPACTAÇÃO INDUZIDA POR TRÁFEGO DE TRATOR	39
5	ARTIGO B – RELAÇÕES ENTRE QUALIDADE ESTRUTURAL E ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO ARENOSO SOB DIFERENTES USOS	62
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87

1 INTRODUÇÃO

O solo e sua conservação são fundamentais para a vida na Terra e, para isso, o monitoramento e a estabilidade da qualidade do solo (QS) são indispensáveis para a sustentabilidade dos agroecossistemas. Os sistemas conservacionistas, como o Sistema Plantio Direto (SPD) e a Integração Lavoura-Pecuária (ILP), quando conduzidos de forma adequada, favorecem a recuperação e a manutenção da QS, contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas de produção e, por isso, devem ser estimulados.

Diversos atributos físicos, químicos, microbiológicos e bioquímicos têm sido usados na avaliação da QS. Entretanto, é fundamental a identificação de atributos de fácil avaliação, bem como de variáveis capazes de responder rapidamente às alterações da QS resultantes do seu uso, detectando manejos mais favoráveis à melhoria do ambiente de produção que promovam a produtividade agrícola.

Dentre os indicadores físicos, a estrutura do solo se destaca como característica fundamental de sua fertilidade, sendo diretamente alterada pelo manejo. A existência de uma estrutura adequada, com um *continuum* de poros, possibilita a permanência e a movimentação de água e de ar no solo, permitindo o desenvolvimento adequado das raízes e favorecendo os ciclos biogeoquímicos. Portanto, a QS e seu manejo podem ser avaliados e monitorados por sua qualidade estrutural e por seu efeito no desenvolvimento das plantas. Preza-se por metodologias de fácil aplicação e repetibilidade para avaliar a estrutura do solo, e, para responder essa demanda, o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) (RALISCH et al., 2017) foi desenvolvido.

Ainda em relação aos indicadores da QS, os atributos microbiológicos e bioquímicos possuem vantagens quando comparados aos físicos e químicos, pois respondem mais prontamente às alterações impostas ao ambiente, e por se correlacionarem com diversos processos biológicos fundamentais para a fertilidade do solo e o desenvolvimento das culturas. Por isso, os indicadores microbiológicos e bioquímicos são promissores na avaliação e monitoramento da QS.

Os diversos indicadores interagem de forma complexa entre si, sendo que um solo com boa qualidade estrutural pode favorecer, por meio de sistema poroso adequado, o desenvolvimento e a manutenção de sua microbiota. Por sua vez, a

comunidade microbiana, além de atuar na dinâmica da matéria orgânica, que promove a estabilidade de agregados, também pode promover a qualidade estrutural por meio de exopolissacarídeos e por hifas de fungos filamentosos.

A comunidade microbiana do solo atua ativamente nos ciclos biogeoquímicos, favorecendo a decomposição e a mineralização da matéria orgânica, bem como a disponibilização de nutrientes para as plantas, resultando em benefícios aos sistemas produtivos. Entretanto, as interações entre os atributos do solo e sua relação com a QS ainda precisam ser melhor compreendidas, sendo necessários mais estudos a fim de permitir a aplicação descomplicada de indicadores da QS em áreas agrícolas sob diferentes usos do solo. Esse conhecimento pode indicar variáveis chave para caracterizar a QS, facilitando a compreensão rápida dos efeitos das práticas de manejo sobre a QS, e fundamentando mudanças nas estratégias de manejo a curto prazo.

O melhor entendimento da relação entre atributos físicos, microbiológicos e bioquímicos é importante para delinear estratégias de manejo que favoreçam a QS. Sendo assim, o desenvolvimento de pesquisa científica que desvende e transfira informações complexas ao usuário final, nesse caso o produtor rural, é fundamental para a evolução social. Além disso, essa transferência de conhecimento pode resultar em recomendações práticas e acessíveis que tenham como resultado o incremento da produtividade e redução da pressão sobre os sistemas de produção, e divulgando a ciência.

A partir desse contexto complexo e instigador, o objetivo desse estudo foi identificar diferentes classes de qualidade estrutural, por meio da ferramenta DRES em solos de diferentes classes texturais cultivados sob distintos usos e sistemas de manejo e correlacioná-lo com indicadores microbiológicos e bioquímicos da QS, visando melhor embasar recomendações de uso e manejo que favoreçam a QS em sistemas agrícolas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 QUALIDADE DO SOLO (QS)

A sustentabilidade agrícola é fundamentada na manutenção da capacidade de suporte dos sistemas produtivos ao longo do tempo com a manutenção das funções exercidas pelo solo no ambiente (GOMES; DE MELLO; MANGABEIRA, 2009). Essas funções são regidas pelo conjunto de propriedades físicas, químicas e biológicas que ocorrem no solo e atuam no ciclo hidrológico, ciclos biogeoquímicos, degradação de xenobiontes, entre outros. O diagnóstico dessas funções, bem como as consequências de sua alteração, natural ou antrópica, é fundamental para inferir sobre a sustentabilidade de um sistema de produção (FAO; ITPS, 2015). O uso do solo deve ser econômica e ambientalmente sustentável, o que pode ser alcançado com a manutenção ou recuperação de sua qualidade, também referida por alguns autores como saúde do solo (CARDOSO et al., 2013).

Vários atributos físicos, químicos ou biológicos, podem servir de indicadores de sustentabilidade ambiental (PAZ-FERREIRO; FU, 2016). Os impactos nos atributos do solo causados pela exploração agrícola incluem os resultantes da mudança do uso da terra e aqueles resultantes da intensificação de uso das áreas já incorporadas ao sistema produtivo, pela pressão para o aumento de produtividade, com o uso intensivo de irrigação, fertilizantes, produtos fitossanitários e intensificação da mecanização (FOLEY et al., 2011).

A agricultura sustentável visa atender às necessidades atuais sem comprometer o potencial produtivo para as próximas gerações. O uso de práticas agrícolas racionais permite a produção econômica e ambientalmente sustentável, que somente pode ser alcançada com a manutenção ou a recuperação da QS. A fim de compreender e usar a QS como ferramenta para a sustentabilidade, atributos físicos, químicos e biológicos devem ser monitorados ao longo do tempo para verificar sua possível alteração em resposta ao manejo (CARDOSO et al., 2013). Além disso, para a compreensão do funcionamento da ciclagem de carbono e nutrientes e da resiliência do solo às perturbações, é importante entender a interação entre seus três tipos de atributos (AON et al., 2001).

A qualidade do solo (QS) representa sua capacidade de funcionar dentro dos limites de um ecossistema, promovendo a manutenção da produtividade

agrícola, da qualidade do ambiente e da saúde das plantas e dos animais (DORAN; PARKIN, 1994). Ao englobar atributos físicos, químicos e biológicos, a QS se relaciona com a fertilidade e a saúde do solo (MARTINEZ-SALGADO et al., 2010).

A QS pode ser inferida por atributos e processos sensíveis ao manejo, denominados indicadores de QS (CARDOSO et al., 2013). Sua avaliação é importante para mensurar a extensão da degradação ou recuperação dos solos, bem como para a identificação de práticas para seu uso sustentável (DEXTER, 2004).

O uso sustentável do solo é tema de crescente relevância frente à intensificação das atividades antrópicas. A avaliação da QS é uma ferramenta de monitoramento da sustentabilidade dos sistemas de produção, pois além de caracterizar o cenário atual, pode auxiliar a prever situações e riscos futuros. Com base no monitoramento, é possível avaliar os efeitos do manejo realizado e sugerir a adoção de práticas conservacionistas quando for necessário (CÂNDIDO et al., 2015).

2.2 INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO

As alterações da QS podem ser verificadas pela comparação do estado atual de atributos do solo em relação às áreas naturais, sem intervenção antrópica, ou pela comparação com valores considerados ideais. Para isso, é fundamental a determinação de um conjunto mínimo de indicadores que apresentem facilidade de avaliação, aplicabilidade em escalas distintas, uso abrangente e sensibilidade à variações de uso e manejo (CHAVES et al., 2012; DA SILVA et al., 2015; DORAN; PARKIN, 1994; NIERO et al., 2010).

Atributos do solo que respondam rapidamente às ações naturais ou antrópicas são considerados bons indicadores da QS. Como indicadores físicos do solo, têm-se utilizado a agregação, umidade, porosidade, densidade do solo e estrutura. A QS está diretamente relacionada com sua estrutura, e a maior parte do dano ambiental encontrado em áreas cultivadas, como a erosão, desertificação e compactação, originam-se da degradação de sua estrutura (PAGLIAI; VIGNOZZI; PELLEGRINI, 2004).

Teores de carbono, disponibilidade de nutrientes, matéria orgânica do solo (MOS), pH e capacidade de troca catiônica (CTC) são alguns dos atributos usados como indicadores químicos da QS. Entretanto, a maioria desses indicadores apresenta resposta lenta em relação aos atributos biológicos, como carbono e

nitrogênio da biomassa microbiana, biodiversidade, atividade enzimática, respiração basal, macro e mesofauna (CARDOSO et al., 2013).

A MOS é amplamente usada para avaliar a QS (BENDING et al., 2004), pois se relaciona diretamente com a manutenção da estrutura, atividade e diversidade microbiana, estoque de C e disponibilidade de nutrientes (MARTINEZ-SALGADO et al., 2010), bem como com a atividade enzimática do solo (BŁOŃSKA; LASOTA; ZWYDAK, 2017). Componente fundamental da fertilidade, a MOS interage com os demais indicadores de QS, sejam atributos químicos, físicos ou biológicos (KASCHUK; ALBERTON; HUNGRIA, 2010). Por essa razão, a MOS é considerada um indicador chave da QS.

Mudanças no uso da terra que levem à diminuição nos teores de MOS geralmente são observadas apenas a longo prazo. Por isso, outros atributos considerados mais sensíveis têm sido usados para monitorar mudanças resultantes da ação antrópica. Diversos estudos demonstraram que a avaliação microbiológica e bioquímica do solo permite identificar alterações na QS antes que modificações nos atributos físicos e químicos sejam perceptíveis (BABUJIA et al., 2010; HUNGRIA et al., 2009; KASCHUK; ALBERTON; HUNGRIA, 2010). Nesse sentido, a biomassa microbiana (BM) é um indicador promissor da QS por sua resposta rápida às alterações do uso e manejo do solo (NOGUEIRA et al., 2006), bem como às espécies usadas na rotação de culturas (SILVA et al., 2010). Da mesma forma, a atividade enzimática, envolvida nos ciclos biogeoquímicos do solo, é um dos principais indicadores de QS devido à sua maior sensibilidade às alterações do ambiente (BŁOŃSKA; LASOTA; ZWYDAK, 2017; MENDES et al., 2019).

A QS precisa ser monitorada nos diferentes sistemas de produção para prevenir a sua degradação e, apesar de alguns atributos usados estarem bem estabelecidos, é necessário o desenvolvimento de uma metodologia confiável e de baixo custo de avaliação, principalmente uma abordagem que explique as complexas relações entre as propriedades do solo (GONZAGA et al., 2016).

2.3 ESTRUTURA COMO INDICADOR FÍSICO DA QUALIDADE DO SOLO

2.3.1 Avaliação visual da estrutura do solo

O tamanho, a forma, o arranjo entre partículas e vazios e a

continuidade de poros constituem a estrutura do solo e influencia na sua capacidade de reter e transmitir substâncias, fluidos e gases. A organização das partículas do solo também influencia o crescimento e o desenvolvimento das raízes e exerce efeitos nas condições edáficas e no ambiente (BRONICK; LAL, 2005). Agronomicamente, a estrutura é produto da organização dos agregados e dos espaços contidos entre eles, fundamentais para a fertilidade do solo. A estrutura é afetada pela MOS, alterando, conseqüentemente, a porosidade, densidade, aeração, infiltração e capacidade de retenção de água (CASTRO et al., 2015).

A necessidade de diagnóstico rápido e confiável direcionou estudos fundamentados na avaliação visual de atributos capazes de verificar a QS (NIERO et al., 2010). Métodos de avaliação da estrutura a campo têm sido usados para monitorar alterações em diferentes sistemas de manejo (BOIZARD et al., 2017; SILVA et al., 2014; TAVARES FILHO et al., 1999; ZEBALOS et al., 2018). As avaliações visuais englobam diversas características e processos de degradação, podem ser realizadas no campo, não demandam treinamento prolongado ou equipamentos específicos, e os resultados são rápidos e prontamente disponíveis (JOHANNES et al., 2017).

Os atributos visuais de estrutura, cor, porosidade e presença de camada compactada se correlacionam com os atributos avaliados analiticamente: agregação, porosidade total, densidade e MOS. Assim, a avaliação visual do solo se mostra ferramenta prática e sensível para a verificação de alterações resultantes do manejo (NIERO et al., 2010).

Diversos métodos de avaliação visual da estrutura foram propostos. O Perfil Cultural (HÉNIN et al., 1960; HÉNIN; GRAS; MONNIER, 1969) foi proposto para avaliar e analisar o efeito de máquinas e implementos agrícolas e, então, como ferramenta pedagógica, permitiu a análise qualitativa do perfil de uma trincheira, pela observação da organização e da morfologia das estruturas. A metodologia foi adaptada por Gautronneau e Manichon (1987), a fim de avaliar a interação clima, solo e planta e foi, mais tarde, adaptada para condições tropicais por Tavares Filho et al. (1999). Em 2017 foram estabelecidos critérios para avaliação da atividade biológica da macro e mesofauna, fundamentados na avaliação visual dos agregados (BOIZARD et al., 2017). Fica claro que a metodologia vem sendo adaptada ao longo dos anos e incorporando cada vez mais informações relativas à QS.

O Perfil Cultural permite a identificação de volumes homogêneos de solo alterados pelo manejo, pelo uso de implementos agrícolas e pelo comportamento

das raízes das plantas, associados à ação dos fatores naturais sobre a estrutura. Alguns dos critérios usados no Perfil Cultural na identificação de distintos volumes antropizados e avaliação da qualidade estrutural são: forma, tamanho e distribuição dos elementos estruturais; presença ou ausência de poros visíveis a olho nu e sua continuidade; forma e dureza de agregados, assim como a porosidade resultante da atividade biológica (BOIZARD et al., 2017; TAVARES FILHO et al., 1999).

Metodologias mais rápidas e em menor escala também foram propostas e difundidas, como o VESS - *Visual Evaluation of Soil Structure* (BALL; BATEY; MUNKHOLM, 2007), o VSA - *Visual Soil Assessment* (SHEPERD, 2009) e o DRES – Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (RALISCH et al., 2017), permitindo avaliações seguras, objetivas e de baixo custo para inferir sobre a QS, podendo ser utilizadas por agricultores e outros profissionais do setor agrícola. As metodologias consistem na retirada de um monólito de, aproximadamente, 0,15 m de largura, 0,25 m de profundidade e 0,10 m de espessura, com uma pá de corte, a partir de uma mini trincheira. Os agregados resultantes da manipulação da amostra são comparados com a sequência de figuras disponíveis em Guimarães; Ball e Tormena (2011), para o VESS, e com as metodologias descritas por Sheperd (2009), no caso do VSA, e com Ralisch et al. (2017), para o DRES, atribuindo-se a nota da qualidade estrutural correspondente à amostra. A partir da determinação do escore da amostra é possível identificar, para cada condição de uso do solo, a necessidade de interferência no manejo (PENNING et al., 2015; RALISCH et al., 2017).

As metodologias VESS e VSA consideram que a presença de agregados maiores é pior para o desenvolvimento das plantas, resultante da redução da porosidade (GUIMARÃES; BALL; TORMENA, 2011; SHEPERD, 2009). Entretanto, a porosidade visível a olho nu dentro dos agregados também pode ser usada como um critério adicional para avaliar a qualidade da estrutura (ROGER-ESTRADE et al., 2004). Sendo assim, por também considerar a desagregação como uma forma de degradação do solo, o DRES consiste em uma metodologia adaptada às condições tropicais que permite rápida e fácil identificação dos efeitos do uso e manejo na qualidade estrutural do solo. A ferramenta facilita a tomada de decisão quanto à necessidade de correção ou melhoria da qualidade do manejo de áreas agrícolas, principalmente sob SPD (RALISCH et al., 2017).

O DRES propõe procedimento metodológico semelhante ao VESS e VSA, porém, emprega critérios de avaliação das estruturas do Perfil Cultural proposto

por Tavares Filho et al. (1999) e aprimorado por Boizard et al. (2017). A qualificação da estrutura é realizada na camada superficial do solo, fundamentada em características detectadas visualmente entre 0-0,25 m de profundidade, que é a camada mais influenciada pela ação antrópica nos cultivos anuais. São observados tamanho e formato dos agregados, presença ou não de feições de compactação e outros indícios de degradação do solo, forma e orientação das fissuras, rugosidade das faces de ruptura, resistência à ruptura, distribuição e aspecto das raízes, bem como evidências de atividade biológica. A ferramenta permite a identificação de áreas que devem ser estudadas mais detalhadamente (RALISCH et al., 2017). Zebalos et al. (2018) afirmaram que a avaliação da qualidade estrutural pelo DRES contribui para que os agricultores monitorem suas áreas a fim de usar as melhores técnicas para uso e manejo do solo.

A metodologia resulta na pontuação de cada camada identificada na amostra. As notas atribuídas à qualidade estrutural de cada camada (Qec) detectada na amostra permitirão o cálculo do índice de qualidade estrutural da amostra (IQEA) e da gleba como um todo (IQES). As Qec são atribuídas de acordo com dois critérios: 1) evidências de degradação ou conservação/recuperação do solo; e 2) proporção visual da ocorrência (em volume) dos diferentes tamanhos de agregados após a manipulação da amostra, segundo a chave de atribuição das notas (RALISCH et al., 2017). O IQEA é calculado pela ponderação dos Qec e espessura das respectivas camadas, e o IQES pela média aritmética dos IQEA da gleba. A partir da definição do IQES é possível recomendar melhorias relativas ao manejo, de acordo com tabela descrita na metodologia (Tabela 1).

A avaliação visual da QS possibilita uma interpretação direta, mas que sozinha pode não conseguir diagnosticar as condições dos serviços ecossistêmicos resultantes de processos biológicos e químicos (BALL et al., 2017), sendo promissora a combinação dessa análise com análises laboratoriais (PULIDO MONCADA; GABRIELS; CORNELIS, 2014).

Tabela 1. Índice de Qualidade Estrutural do Solo (IQES), interpretações e recomendações.

IQES	Qualidade estrutural	Recomendação de melhorias
6.0 – 5.0	Muito boa	Manter o sistema de manejo utilizado, atentando para a possibilidade de adoção de novas tecnologias conservacionistas.

4.0 – 4.9	Boa	Intensificar o uso de sistemas diversificados de produção com alta capacidade de aporte de fitomassa aérea e raízes (ex. gramíneas). Verificar se não há necessidade de interferir na estratégia de rotação e consorciação de culturas adotada no sistema de produção.
3.0 – 3.9	Regular	Aprimorar o sistema de produção ampliando a diversificação de culturas, incluindo espécies vegetais com alta capacidade de aporte de fitomassa aérea e raízes (ex. gramíneas), e evitar/eliminar operações mecanizadas no preparo do solo. Gerenciar as operações mecanizadas visando redução de tráfego.
2.0 – 2.9	Ruim	Realizar um diagnóstico da área, incluindo as condições químicas e físicas no perfil, revisando as práticas conservacionistas do solo (ex. terraceamento, alocação de estradas e operações em nível). Rever e aprimorar o sistema de produção utilizado, aumentando a diversidade de espécies vegetais e priorizando culturas com alta capacidade de aporte de fitomassa aérea e raízes (ex. gramíneas). Na recuperação do solo, preferir o uso de plantas recuperadoras, em relação ao emprego de práticas mecânicas. Evitar operações de preparo de solo, mesmo as realizadas esporadicamente. Racionalizar o tráfego de máquinas agrícolas.
1.0 – 1.9	Muito ruim	Realizar um diagnóstico aprofundado da área, incluindo as condições químicas e físicas no perfil; adotar e/ou readequar as práticas conservacionistas mecânicas (ex. terraceamento, alocação de estradas, operações em nível) e vegetativas (cultivo em nível, faixas de retenção, consorciação e rotação de culturas) do solo. Repensar o sistema de produção utilizado. Adotar estratégias integradas de recuperação que envolvam sistemas diversificados de produção com alta capacidade de aporte de fitomassa aérea e raízes, podendo requerer intervenções mecânicas de recuperação física do solo, desde que adotadas criteriosamente, considerando a umidade do solo, as condições do equipamento e a velocidade adequada, entre outras. Inclusão de gramíneas no sistema, de preferência com pastejo, com correto manejo da pastagem e ajuste de lotação, visando intensificar a recuperação da estrutura do solo. Uso de adubação orgânica de forma criteriosa pode ajudar.

Fonte: Ralisch et al. (2017), p.57.

2.4 INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DA QUALIDADE DO SOLO

2.4.1 Biomassa microbiana (BM)

Os microrganismos são constituintes vivos da fração orgânica solo, denominada BM. A BM compreende todos os organismos com menos de $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$,

que funciona como reservatório de nutrientes potencialmente disponíveis para as plantas e atua nos ciclos biogeoquímicos. Por ser viva, a BM é capaz de responder mais rapidamente às alterações das condições de uso e manejo (BROOKES, 2002). A mensuração das mudanças na BM pode, portanto, refletir alterações no solo muito antes da constatação de alterações nos teores de MOS (BROOKES, 2002; CARDOSO et al., 2013).

A comunidade microbiana tem papel fundamental nos ecossistemas, na síntese e mineralização da MOS, bem como na ciclagem de nutrientes, com efeitos nos atributos químicos e físicos, com consequências diretas na fertilidade e sustentabilidade (CARDOSO et al., 2013). Além disso, a BM age na degradação de xenobiontes e na estabilização da estrutura do solo (KASCHUK; ALBERTON; HUNGRIA, 2010; USDA, 2015). Por sua rápida resposta às alterações do manejo e outros distúrbios, a BM é considerada indicadora da QS, principalmente por desempenhar processos ecológicos (CARDOSO et al., 2013).

O manejo adequado dos resíduos vegetais, fertilizantes e corretivos é fundamental para a qualidade dos solos tropicais, uma vez que a fertilidade desses ecossistemas, sejam naturais ou agrícolas, depende da eficiência da ciclagem de nutrientes entre plantas, microrganismos e MOS, de forma que as perdas de nutrientes do agroecossistema sejam minimizadas (BROOKES, 2002). O incremento da BM aumenta as imobilizações temporárias de C e nutrientes que poderão ser liberados lentamente, de acordo com as necessidades das plantas (FRANCHINI et al., 2007). Assim, a BM é um dos principais determinantes da dinâmica do C no solo (THAKUR et al., 2015), de forma que atua no equilíbrio entre as formas de C, na sua mineralização e nas formas estáveis na MOS (LANGE et al., 2015). Alterações nesse balanço podem indicar saldo negativo ou positivo de C no solo.

O quociente microbiano (q_{Mic}) é a relação entre o C da BM (CBM) e o carbono orgânico total do solo (COT), e retrata quanto do COT está imobilizado na BM. O q_{Mic} , ao demonstrar a participação dos microrganismos na fração orgânica do solo, é empregado como indicador da qualidade da MOS. Os valores de q_{Mic} têm tendência inversamente proporcional à intensidade do manejo. Baixos valores sugerem provável condição estressante para a microbiota (SILVA et al., 2010). Por outro lado, q_{Mic} altos indicam maior participação microbiana na MOS, com maior capacidade de armazenar temporariamente e mineralizar nutrientes às plantas (DADALTO et al., 2015). Anderson e Domsch (1989) e Colozzi Filho, Balota e Andrade

(1999) reportaram valores de q_{Mic} de 2,3 para monoculturas e de 4,4 para rotação de culturas, indicando que ambientes sob manejo conservacionista apresentam maiores índices.

2.4.2 Respiração Basal (RB)

A RB é representada pela produção de CO_2 pelos microrganismos aeróbios durante a oxidação da MOS e tem papel fundamental no ciclo do C. A avaliação da RB é uma das metodologias mais usadas para estimar a atividade microbiana, correlacionando-se positivamente com o teor de MOS e com a BM (ALEF, 1995).

Os diferentes manejos dos sistemas de produção influenciam nos teores de MOS, água, agregação e pH do solo, influenciando também na RB. Os resíduos culturais com baixa relação C:N, como os das leguminosas, se decompõem mais rapidamente e resultam em maiores taxas de desprendimento de CO_2 em comparação a resíduos com alta relação C:N, como a palha de trigo (USDA, 2009). O aporte contínuo de resíduos promove o aumento da BM e de sua atividade, resultando em maior RB (KUZUYAKOV, 2010).

A RB tem sido amplamente utilizada como indicador da QS em sistemas florestais ou agrícolas (BASTIDA et al., 2008). Hungria et al. (2009) relatam a RB como parâmetro que mais prontamente respondeu a distúrbios impostos ao solo. Entretanto, a interpretação da RB deve ser cautelosa, pois uma maior atividade pode ser resultante tanto da alta produtividade de um ecossistema, quanto do estresse decorrente de alterações ambientais (SILVA; AZEVEDO; DE-POLLI, 2007).

O quociente metabólico (q_{CO_2}) exprime a relação entre a RB e o CBM, sendo considerado indicador da eficiência metabólica da comunidade microbiana (BASTIDA et al., 2008). Menores valores de q_{CO_2} geralmente ocorrem em sistemas mais estáveis, sugerindo uso mais eficiente de C pelos microrganismos do solo, realidade observada em sistemas conservacionistas (ANDERSON; DOMSCH, 2010). Sistemas de manejo com menor perturbação proporcionam maior estabilidade e sustentabilidade da atividade agrícola, refletida em menores valores de RB, maior CBM e, conseqüentemente, menores valores de q_{CO_2} (FERREIRA; STONE; MARTIN-DIDONET, 2017).

Assim como a RB, a interpretação dos valores de q_{CO_2} também deve

ser cuidadosa, pois valores maiores podem ser atribuídos a aportes de C orgânico facilmente degradável, promovendo a atividade microbiana, e não somente ao estresse sofrido por ela (BABUJIA et al., 2010; DINESH et al., 2003). Nesse caso, análises complementares como a atividade de algumas enzimas relacionadas ao metabolismo microbiano podem auxiliar na interpretação dos resultados.

2.4.3 Atividade Enzimática

A atividade de enzimas do solo, também conhecidas como enzimas abiômicas ou exoenzimas, se correlaciona com a comunidade microbiana, quantidade e qualidade da MOS e a granulometria do solo (PAZ-FERREIRO; FU, 2016). Os microrganismos são considerados fonte primária das enzimas, logo, a atividade de várias enzimas é correlacionada com a atividade microbiana (KLOSE; TABATABAI, 2000). Além disso, a atividade enzimática integra informações do estado microbiológico, físico e químico do solo (AON et al., 2001).

A maioria das enzimas do solo é produzida por microrganismos, embora também sejam produzidas por plantas e animais. Essas enzimas são sintetizadas continuamente, podendo ser acumuladas, inativadas e/ou degradadas, impactando a ciclagem de carbono e nutrientes (DICK, 1997; TABATABAI, 1994). A atividade enzimática pode indicar a intensidade de alguns processos bioquímicos, podendo ser usada como um indicador biológico integrador (DICK, 1994).

A atividade enzimática tem sido relatada como indicador da QS devido à sua relação com a biologia e com os processos do solo. Sua avaliação é operacionalmente fácil, prática, sensível, integradora, e descrita como *fingerprints* biológicos do manejo realizado (UTOBO; TEWARI, 2014). Catalisadoras da decomposição dos resíduos, as enzimas participam das transformações da MOS, ciclagem de nutrientes, disponibilização de nutrientes para as culturas e têm relação com a agregação do solo (DICK, 1994; TABATABAI, 1994).

A estrutura das enzimas e sua afinidade pelo substrato podem ser alteradas pelos extremos de temperatura, reduzindo sua atividade quando em temperaturas superiores ou inferiores ao valor ótimo, assim como o pH. A atividade de diversas enzimas também pode ser influenciada pelo teor de água, sendo que em solos secos a atividade enzimática é menor. Outro fator que influencia a atividade enzimática é o teor de argila. Maiores teores de argila se correlacionam positivamente

com a atividade enzimática, pois solos mais argilosos apresentam maiores teores de matéria orgânica, promotora da atividade microbiana, além de oferecer maior proteção física às enzimas contra a degradação por proteases (USDA, 2010).

As atividades da fosfatase e da arilsulfatase estão envolvidas nos ciclos do P e do S, respectivamente, sendo mais fortemente correlacionadas às variações do pH e MOS. O termo fosfatase é usado para um abrangente grupo de enzimas que catalisam a hidrólise de ésteres e anidridos em H_2PO_4^- . As fosfatases ácidas têm sido amplamente estudadas por sua atividade ótima em condições de acidez e sua importância na mineralização do P orgânico e disponibilização às plantas (DICK, 1997; TABATABAI, 1994), particularmente nas regiões tropicais.

A arilsulfatase é uma enzima encontrada em plantas, animais, microrganismos e no solo, que atua no processo de mineralização dos ésteres-sulfato (TABATABAI, 1994). A maioria das arilsulfatases é indutiva e sua síntese é controlada pelos teores de C e S do sistema (DICK, 1997; TABATABAI, 1994). Por isso, sua atividade depende dos teores de MOS, de S e de outros nutrientes. A deficiência de S estimula a atividade da arilsulfatase para que o nutriente possa ser mobilizado a partir de fontes orgânicas (BALOTA; CHAVES, 2010).

A β -glucosidase é amplamente distribuída no ambiente, sendo predominante no solo (TABATABAI, 1994), mas sua atividade também é detectada nos fungos e nas plantas. Essa enzima é usada como indicador da QS, devido a sua ação na degradação da celulose, liberando glicose como fonte de C e energia para a manutenção da atividade microbiana (DICK, 1997). Também atua na dinâmica da MOS, apresentando baixa variabilidade sazonal (KNIGHT; DICK, 2004), bem como relação com a atividade biológica, sendo usada para detectar o efeito do manejo nos sistemas de produção (MENDES et al., 2019; LOPES et al., 2018; BANDICK; DICK, 1999).

A celulase é responsável pela hidrólise da celulose em D-glicose (CARDOSO et al., 2013; HUSSAIN et al., 2009). A atividade das celulasas nos solos agrícolas é afetada por fatores como: temperatura, pH, teor de água e oxigênio, estrutura química, qualidade e localização da MOS no perfil, e presença de fungicidas (DENG; TABATABAI, 1994). A atividade das celulasas pode indicar preliminarmente alterações em atributos físicos e químicos, podendo ser ferramenta para monitorar o efeito do manejo nos sistemas de produção (MAKOI; NDAKIDEMI, 2008).

A enzima L-glutaminase catalisa a hidrólise da L-glutamina,

resultando em amônia e ácido L-glutâmico, importante no fornecimento de N para as plantas (FRANKENBERGER; TABATABAI, 1991). Indicadora promissora dos efeitos do manejo no ciclo do N (BINI et al., 2014), também é influenciada pela adição de resíduos orgânicos ao solo (SUN et al., 2018).

A urease, outra enzima atuante no ciclo do N, catalisa a hidrólise da ureia a CO_2 e NH_3 , processo fundamental para a disponibilidade de N via fertilizantes à base de ureia. A redução da atividade dessa enzima afeta negativamente o desenvolvimento das plantas e sua produtividade (BALOTA; CHAVES, 2010). A capacidade do solo mineralizar o N orgânico pode ser verificada pela atividade da urease (LANNA et al., 2010). Usada como indicador biológico da QS, é influenciada por fatores como histórico de manejo e das culturas, teor de MOS, presença de metais pesados, temperatura e pH (SILVA; AZEVEDO; DE-POLLI, 2007; YANG et al., 2006).

Além de serem muito sensíveis às mudanças ambientais, as enzimas são bioindicadores promissores. Diversos trabalhos demonstram o potencial das análises enzimáticas como indicadores sensíveis dos efeitos dos sistemas de manejo agrícolas (BINI et al., 2014; CARDOSO et al., 2013; LANGE et al., 2015; MENDES et al., 2019).

Existe certa dificuldade em interpretar os resultados das análises biológicas, devido à ausência de valores de referência nas avaliações da QS. Por isso, a maioria dos estudos sobre a biologia do solo exigem a comparação com uma área de referência (MENDES et al., 2019). Entretanto, valores vêm sendo estabelecidos para as condições agrícolas brasileiras, com o advento e estabelecimento da bioanálise do solo (MENDES et al., 2018). A bioanálise do solo determina alguns indicadores ligados ao seu funcionamento biológico, sendo que estão disponíveis tabelas de interpretação para a atividade das enzimas β -glucosidase e arilsulfatase para Latossolos Vermelhos argilosos do cerrado, sendo que mais tabelas de interpretação estão sendo finalizadas para outras regiões, possibilitando uma ferramenta a mais para a interpretação da QS (MENDES et al., 2018).

De fato, a atividade enzimática vem sendo amplamente usada como indicador de QS, possuindo correlação positiva com o teor de MOS em áreas agrícolas (BŁOŃSKA; LASOTA; ZWYDAK, 2017; WALLENIUS et al., 2011) e negativa com o revolvimento do solo (BŁOŃSKA; LASOTA; ZWYDAK, 2017; CASTRO LOPES et al., 2018). Em áreas sob SPD, as atividades das enzimas como amilase, celulase, arilsulfatase, sulfatase (BALOTA et al., 2004) e β -glucosidase (CASTRO LOPES et

al., 2018) são geralmente mais elevadas, devido ao favorecimento da estrutura do solo pelo sistema conservacionista (BEARE et al., 1994) e também ao aporte e conservação da MOS.

Maior atividade microbiana do solo favorece também a atividade enzimática, refletidas na maior dinâmica na ciclagem de C e nutrientes pela maior ativação dos ciclos biogeoquímicos (ACOSTA-MARTÍNEZ et al., 2007; DICK, 1997). A atividade das enzimas do solo também é favorecida pela diversidade de espécies vegetais. O solo de áreas sob manejo conservacionista é mais favorável à microbiota, pelo aporte de resíduos vegetais e maior volume de raízes (LEHMANN; ZHENG; RILLIG, 2017), favorecendo a atividade das enzimas, seja de origem microbiana, seja de origem vegetal (UTOBO; TEWARI, 2014).

2.5 RELAÇÃO ESTRUTURA DO SOLO E ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS

Diversos fatores interferem na agregação do solo, sendo os principais: tipo e teor de argila, metais polivalentes, carbonato de cálcio, óxidos e hidróxidos de ferro, alumínio e manganês, teor e qualidade da matéria orgânica, exsudatos de plantas e substâncias orgânicas provenientes da atividade da microbiota (BASTOS et al., 2005).

A comunidade microbiana pode atuar direta ou indiretamente na estrutura do solo. Atua indiretamente por ser responsável pelas transformações dos substratos orgânicos que levam à formação da MOS. Diretamente, atua pela produção de exopolissacarídeos e peptídeos, gomas bacterianas com ação cimentante das partículas do solo, além de proteínas como a glomalina e as hifas de fungos filamentosos que auxiliam a manter as partículas coesas, atuando na formação da microestrutura (LEHMANN; ZHENG; RILLIG, 2017; RILLIG et al., 2003). Quando na superfície dos agregados, os polissacarídeos produzidos pelos microrganismos reduzem a infiltração de água nos microporos e a destruição das ligações entre os coloides e, conseqüentemente, o rompimento dos agregados (HÉNIN; GRAS; MONNIER, 1976).

Por sua vez, a agregação do solo também interfere na microbiota. Os agregados não apenas podem estabilizar componentes da comunidade microbiana, mas também melhorar suas interações, além de alterar a função e as características das comunidades microbianas pelo confinamento espacial (WILPISZESKI et al.,

2019). Sendo assim, a relação entre a estrutura e a atividade microbiana é recíproca, de forma que a melhoria da qualidade estrutural tem correlação positiva com a atividade microbiana, enquanto que a comunidade microbiana ativa contribui para a qualidade estrutural (CUI; HOLDEN, 2015). Portanto, a qualidade da estrutura do solo influencia e é influenciada pela comunidade microbiana (LEHMANN; ZHENG; RILLIG, 2017; RALISCH et al., 2017). Mudanças na estrutura afetam diretamente o habitat dos microrganismos, considerados componentes críticos dos ecossistemas naturais e antropogênicos, por regularem a ciclagem dos resíduos orgânicos e os ciclos biogeoquímicos, com efeito direto na fertilidade do solo (CUI; HOLDEN, 2015; SILVA et al., 2014).

A maioria dos poros do solo abriga numerosos processos biológicos e químicos interativos, sendo que a maior parte da biogeoquímica dentro dos agregados é influenciada pela rede complexa de poros interconectados (SMUCKER et al., 2007). A estrutura de poros não só determina um espaço físico adequado para a microbiota, mas também modera a predação por micro e mesofauna (GUPTA; YEATES, 1997). Em contrapartida, a comunidade microbiana exerce papel fundamental na sua formação (MELLONI; MELLONI; VIEIRA, 2013), mas principalmente na estabilidade dos agregados (MELLONI; MELLONI; VIEIRA, 2013; OADES, 1993), sendo identificada como principal agente agregador em solos sob SPD em estudo no estado de São Paulo (DUFRANC et al., 2004).

Após vários anos de cultivo agrícola, Gupta e Germida (2015) verificaram a redução da biomassa microbiana, respiração basal e atividade enzimática, bem como a redução da proporção de macroagregados : microagregados, resultando na perda de suas propriedades biológicas e físicas. Os microagregados em áreas agrícolas contêm menor teor de C orgânico e CBM, menor atividade microbiana e de enzimas como a arilsulfatase e a fosfatase ácida, em comparação aos macroagregados. As mudanças mais drásticas ocorreram, no entanto, nos macroagregados, em que as hifas fúngicas rompidas são mineralizadas e suas propriedades de ligação de partículas são destruídas, reduzindo a estabilidade dos agregados.

Maior estabilidade de agregados resulta em microporos estáveis intra-agregados, favorecendo a retenção de água. Entretanto, os macroporos aceleram o transporte da água, a aeração, o desenvolvimento de raízes e diminuem a erodibilidade e a compactação em comparação a um solo menos agregado. Além

disso, a agregação do solo influencia a ciclagem do C, expondo em maior ou menor grau o C prontamente disponível à degradação microbiota. Sendo assim, a agregação pode ser usada como indicador integrativo da QS (BÜKS et al., 2016).

2.6 SISTEMAS DE MANEJO E INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO

Diferentes usos e manejos do solo e das culturas afetam a QS, sendo que existe grande interesse em práticas de manejo que reduzam a degradação do solo e aumentem a sustentabilidade agrícola. Em regiões tropicais, sistemas de cultivo convencionais, com revolvimento do solo e predomínio de monocultivos, reduzem a MOS e favorecem os processos erosivos, resultando em modificações deletérias nos atributos do solo (CARDOSO et al., 2013).

A rotação de culturas e o uso de plantas de cobertura contribuem positivamente com o manejo físico e estrutural (REIS; DE LIMA; BAMBERG, 2016), favorecendo a formação e estabilidade da estrutura, o que reflete positivamente na QS e na sua manutenção (TORMENA et al., 2008). A redução de distúrbios é importante para a manutenção dos teores de MOS e da atividade microbiana. Por sua vez, a correção do pH do solo e consequente diminuição da toxicidade do alumínio é importante para promover a atividade microbiana (BALOTA et al., 2015).

Uma das premissas do uso sustentável dos solos agrícolas nos ambientes tropicais é o aumento dos teores de MOS. O SPD é uma dessas práticas conservacionistas, que consiste no mínimo revolvimento do solo (BALOTA et al., 2015), manutenção de cobertura permanente e rotação de culturas (BOLLIGER et al., 2006; CASÃO JUNIOR; ARAÚJO; LLANILLO, 2012). A ILP também é um sistema conservacionista que, pela diversificação de espécies vegetais e alternância com a produção animal, promove o aumento e a diversificação de renda do produtor, a sustentabilidade agrícola e a melhoria da QS em SPD (BALBINOT JUNIOR et al., 2009; FRANCHINI et al., 2015).

O aporte de MOS e a adoção de sistemas conservacionistas tendem a aumentar a atividade enzimática do solo. As raízes das plantas também estimulam essa atividade, principalmente pela produção de exsudatos ricos em substratos para as enzimas (BALOTA; CHAVES, 2010; BOWLES et al., 2014).

Práticas agrícolas intensivas, com maior revolvimento do solo, afetam a dinâmica da MOS, acelerando o processo de oxidação e reduzindo a matéria

orgânica estável e, como consequência, a atividade biológica. Sendo assim, práticas conservacionistas têm sido usadas para atenuar o impacto negativo do cultivo convencional (CARDOSO et al., 2013; DE MORAES et al., 2014), com melhorias dos atributos associados à QS (CARDOSO et al., 2013).

A melhoria dos indicadores da QS revela um ambiente mais favorável à microbiota, refletida em sua atividade, bem como pela quantificação da BM, da RB e pelo cálculo dos coeficientes microbiano e metabólico (CUI; HOLDEN, 2015; SILVA et al., 2014). Um solo saudável, também sinônimo de um solo de qualidade (CARDOSO et al., 2013), desempenha não apenas funções de interesse agrícola como o suporte físico e químico para o crescimento e desenvolvimento de plantas, mas também atua na ciclagem de nutrientes e depuração de contaminantes, favorece ao ciclo hidrológico, atua como dreno de C da atmosfera, abriga a biodiversidade, dentre outros, com benefícios ao ecossistema (DORAN; PARKIN, 1994; DROBNIK et al., 2018).

As recomendações de manejo devem favorecer o desenvolvimento e a manutenção da comunidade microbiana do solo, responsável pelas grandes transformações físicas e químicas, que permitem ao solo cumprir seu papel no agroecossistema (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

3 REFERÊNCIAS

- ACOSTA-MARTÍNEZ, V. et al. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. **Applied Soil Ecology**, v. 35, n. 1, p. 35–45, 2007.
- ADETUNJI, A. T. et al. The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: A review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 3, p. 794–807, 2017.
- ALEF, K. Soil Respiration. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (Eds.). **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. Academic Press, 1995. p. 214–218.
- ANDERSON, T.; DOMSCH, K. H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 21, p. 471–479, 1989.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, n. 3, p. 393–395, 1993.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 12, p. 2039–2043, 2010.
- AON, M. A. et al. (Micro)biological, chemical and physical properties of soils subjected to conventional or no-till management: An assessment of their quality status. **Soil and Tillage Research**, v. 60, n. 3–4, p. 173–186, 2001a.
- AON, M. A. et al. I. Spatio-temporal patterns of soil microbial and enzymatic activities in an agricultural soil. **Applied Soil Ecology**, v. 18, n. 3, p. 239–254, 2001b.
- ARTHUR, E. et al. Amending a loamy sand with three compost types: Impact on soil quality. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 116–123, 2011.
- BABUJIA, L. C. et al. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 12, p. 2174–2181, 2010.
- BABUJIA, L. C. et al. Microbial diversity in an Oxisol under no-tillage and conventional tillage in southern Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5, p. 863–870, 2014.
- BALBINOT JUNIOR, A. A. et al. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, v. 39, n. 6, p. 1925–1933, 2009.
- BALL, B. C. et al. The numeric visual evaluation of subsoil structure (SubVESS) under agricultural production. **Soil and Tillage Research**, v. 148, p. 85–96, 2015.
- BALL, B. C. et al. Visual soil evaluation: A summary of some applications and potential developments for agriculture. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 114–124, 2017.

- BALL, B. C.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. J. Field assessment of soil structural quality - A development of the Peerkamp test. **Soil Use and Management**, v. 23, n. 4, p. 329–337, 2007.
- BALOTA, E. L. et al. Soil enzyme activities under long-term tillage and crop rotation systems in subtropical agro-ecosystems. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 35, n. 4, p. 300–306, 2004.
- BALOTA, E. L. et al. Qualidade do solo em razão da conversão de mata nativa em culturas anual e perene no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1003–1014, 2015.
- BALOTA, E. L.; CHAVES, J. C. D. Enzymatic activity and mineralization of carbon and nitrogen in soil cultivated with coffee and green manures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1573–1583, 2010.
- BANDICK, A. K.; DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, p. 1471–1479, 1999.
- BARETTA, D. et al. Efeito do monocultivo de Pinus e da queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no Planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 715–724, 2005.
- BARTH NETO, A. et al. Italian ryegrass establishment by self-seeding in integrated crop-livestock systems: Effects of grazing management and crop rotation strategies. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 77–83, 2014.
- BASTIDA, F. et al. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. **Geoderma**, v. 147, n. 3–4, p. 159–171, 2008.
- BASTOS, R. S. et al. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 1, p. 21–31, 2005.
- BEARE, M. H. et al. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 3, p. 787–795, 1994.
- BEHRENDTS KRAEMER, F. et al. Morpho-structural evaluation of various soils subjected to different use intensity under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 169, p. 124–137, 2017.
- BENDING, G. D. et al. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 11, p. 1785–1792, 2004.
- BINI, D. et al. Effects of land use on soil organic carbon and microbial processes associated with soil health in southern Brazil. **European Journal of Soil Biology**, v. 55, p. 117–123, 2013.
- BINI, D. et al. Identifying indicators of C and N cycling in a clayey Ultisol under

different tillage and uses in winter. **Applied Soil Ecology**, v. 76, p. 95–101, 2014.

BŁOŃSKA, E.; LASOTA, J.; ZWYDAK, M. The relationship between soil properties, enzyme activity and land use. **Forest Research Papers**, v. 78, n. 1, p. 39–44, 2017.

BOIZARD, H. et al. Developments in the “profil cultural” method for an improved assessment of soil structure under no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 92–103, 2017.

BOLLIGER, A. et al. Taking stock of the Brazilian “zero-till revolution”: a review of landmark research and farmers’ practice. **Advances in Agronomy**, v. 91, n. 06, p. 47–110, 2006.

BOWLES, T. M. et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 68, p. 252–262, 2014.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, v. 124, n. 1–2, p. 3–22, 2005.

BROOKES, P. The Soil Microbial Biomass: Concept, Measurement and Applications in Soil Ecosystem Research. **Microbes and Environments**, v. 16, n. 3, p. 131–140, 2002.

BÜKS, F. et al. Relation of aggregate stability and microbial diversity in an incubated sandy soil. **SOIL Discussions**, p. 1–29, 2016.

CÂNDIDO, B. M. et al. Métodos de indexação de indicadores na avaliação da qualidade do solo em relação à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 589–597, 2015.

CARDOSO, E. J. B. N. et al. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **Scientia Agricola**, v. 70, n. 4, p. 274–289, 2013.

CARRIZO, M. E. et al. Aggregation agents and structural stability in soils with different texture and organic carbon contents. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 1, p. 75–82, 2015.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G.; LLANILLO, R. F. **Plantio Direto no Sul do Brasil - Fatores que facilitaram a evolução do sistema e o desenvolvimento da mecanização conservacionista**. Londrina: IAPAR, 2012.

CASTIONI, G. A. et al. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 301–309, 2018.

CASTRO, G. S. A. et al. Management impacts on soil organic matter of tropical soils. **Vadose Zone Journal**, v. 14, n. 1, 2015.

CASTRO LOPES, A. A. et al. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 12, p. 72–82,

2018.

CHAVES, A. A. A. et al. Indicadores de qualidade de Latossolo Vermelho sob diferentes usos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 4, p. 446–454, 2012.

COLOZZI FILHO, A.; BALOTA, E. L.; ANDRADE, D. S. Microrganismos e processos biológicos no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J. O. et al. (Eds.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. UFLA/DCS, 1999. p. 487–508.

CUI, J.; HOLDEN, N. M. The relationship between soil microbial activity and microbial biomass, soil structure and grassland management. **Soil and Tillage Research**, v. 146, p. 32–38, 2015.

DA SILVA, G. F. et al. Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso na mesorregião do agreste paraibano. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 3, p. 25–35, 2015.

DADALTO, J. P. et al. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 3, p. 506–513, 2015.

DE MORAES, A. et al. Research on integrated croplivestock systems in Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5, p. 1024–1031, 2014.

DE MORAIS, E. R. C. et al. Indices of chemical quality of soil in areas cultivated with irrigated papaya. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 6, p. 587–591, 2015.

DENG, S. P.; TABATABAI, M. A. Cellulase activity of soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 26, n. 10, p. 1347–1354, 1994.

DEXTER, A. R. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Geoderma**, v. 120, p. 201–214, 2004a.

DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, p. 201–214, 2004b.

DICK, R. P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 107–124.

DICK, R. P. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health. In: PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. (Eds.). **Biological indicators of soil health**. Wallingford: CAB International, 1997. p. 121–156.

DICK, R. P.; BREACKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: SSSA, 1996. p. 247–271.

DINESH, R. et al. Changes in soil microbial indices and their relationships following

deforestation and cultivation in wet tropical forests. **Applied Soil Ecology**, v. 24, n. 1, p. 17–26, 2003.

DONAGEMMA, G. K. et al. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003–1020, 2016.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA, 1994. p. 1–20.

DROBNIK, T. et al. Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. **Ecological Indicators**, v. 94, p. 151–169, 2018.

DUFRANC, G. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois Latossolos em plantio direto no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 505–517, 2004.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601–606, 1988.

FAGOTTI, D. S. L. et al. Gradients in N-cycling attributes along forestry and agricultural land-use systems are indicative of soil capacity for N supply. **Soil Use and Management**, v. 28, n. 3, p. 292–298, 2012.

FAO; ITPS. **Status of the World's Soil Resources (SWSR) - main report** Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy: FAO, 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/documents/card/en/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/>>. Acesso em: 9 maio. 2019.

FERREIRA, E. P. DE B.; STONE, L. F.; MARTIN-DIDONET, C. C. G. Population and microbial activity of the soil under an agro-ecological production system. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 48, n. 1, p. 22–31, 2017.

FIGUEIREDO, A. et al. Determinação de estoques totais de carbono e nitrogênio e suas frações em sistemas agrícolas implantados em argissolo vrbmbelho-marelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 2091–2100, 2008.

FOLEY, J. A. et al. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v. 478, n. 7369, p. 337–342, 2011.

FRANCHINI, J. C. et al. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 92, n. 1–2, p. 18–29, 2007.

FRANCHINI, J. C. et al. Desempenho da soja em consequência de manejo de pastagem, época de dessecação e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 12, p. 1131–1138, 2015.

FRANKENBERGER, W. T.; TABATABAI, M. A. L-glutaminase activity of soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 23, n. 9, p. 869–874, 1991.

- GAUTRONNEAU, Y.; MANICHON, H. **Guide méthodique du profil cultural**. Lyon: CEREF-GEARA, 1987.
- GOMES, E. G.; DE MELLO, J. C. C. B. S.; MANGABEIRA, J. A. DE C. Estudo da sustentabilidade agrícola em um município amazônico com análise envoltória de dados. **Pesquisa Operacional**, v. 29, n. 1, p. 23–42, 2009.
- GONZAGA, M. I. S. et al. Atlantic forest soil as reference in the soil quality evaluation of coconut orchards (*Cocos nucifera* L) under different management. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 6, p. 3847–3858, 2016.
- GUIMARÃES, R. M. L. et al. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p. 92–99, 2013.
- GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 3, p. 395–403, 2011.
- GUPTA, V. V. S. R.; GERMIDA, J. J. Soil aggregation: Influence on microbial biomass and implications for biological processes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 80, p. A3–A9, 2015.
- GUPTA, V. V. S. R.; YEATES, G. W. Soil microfauna as indicator of soil health. In: PANKHURST, C. E.; DOUBE, B.; GUPTA, V. V. S. R. (Eds.). **Biological indicators of soil health**. Oxon, UK: CAB International, 1997. p. 201–233.
- HÉNIN, S. et al. **Le profil cultural: Principes de physique du sol**. Paris: Masson, 1960.
- HÉNIN, S.; GRAS, R.; MONNIER, G. **Le profil cultural: L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques**. 2ed. Paris: Masson, 1969.
- HÉNIN, S.; GRAS, R.; MONNIER, G. **Os solos agrícolas**. São Paulo: Forense Universitária, 1976.
- HUNGRIA, M. et al. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, v. 42, n. 3, p. 288–296, 2009.
- HUSSAIN, S. et al. Impact of pesticides on soil microbial diversity, enzymes, and biochemical reactions. **Advances in Agronomy**, v. 102, n. 1, p. 159–200, 2009.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 79, n. 1, p. 9–16, 2000.
- IUSS, Working Group WRB. **World reference base for soil resources 2014**. Rome: FAO, 2014.
- JIAO, X. et al. Effects of slow-release urea fertilizers on urease activity, microbial biomass, and nematode communities in an aquatic brown soil. **Science in China**

Series C: Life Sciences, v. 48, n. S1, p. 26–32, 2005.

JOHANNES, A. et al. To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure? **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 24–32, 2017.

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 Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 1, p. 1–13, 2010.

KLOSE, S.; TABATABAI, M. A. Urease activity of microbial biomass in soils as affected by cropping systems. **Biology and Fertility of Soils**, v. 31, n. 3–4, p. 191–199, 2000.

KNIGHT, T. R.; DICK, R. P. Differentiating microbial and stabilized β -glucosidase activity relative to soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 12, p. 2089–2096, 2004.

KUZYAKOV, Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 9, p. 1363–1371, 2010.

LANGE, M. et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. **Nature Communications**, v. 6, n. 6707, p. 1–8, 2015.

LANNA, A. C. et al. Atividade de urease no solo com feijoeiro influenciada pela cobertura vegetal e sistemas de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1933–1939, 2010.

LAROCA, J. V. DOS S. et al. Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 11, p. 1248–1258, 2018.

LEHMAN, R. M. et al. Understanding and enhancing soil biological health: The solution for reversing soil degradation. **Sustainability (Switzerland)**, v. 7, n. 1, p. 988–1027, 2015.

LEHMANN, A.; ZHENG, W.; RILLIG, M. C. Soil biota contributions to soil aggregation. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, n. 12, p. 1828–1835, 2017.

LOPES, A. A. D. C. et al. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon in Cerrado Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 2, p. 461–472, 2013.

MAIA, S. M. F. et al. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 71, n. 2, p. 127–138, 2007.

MAKOI, J. H. J. H. J. R. R.; NDAKIDEMI, P. A. Selected soil enzymes: examples of their potential roles in the ecosystem. **African Journal of Biotechnology**, v. 7, n. 3, p. 191–191, 2008.

MANN, C. et al. Relationships between field management, soil health, and microbial

community composition. **Applied Soil Ecology**, v. 144, p. 12–21, 2019.

MARTINEZ-SALGADO, M. M. et al. Biological soil quality indicators: a review. **Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology**, p. 319–328, 2010.

MCCARTY, G. W.; SHOGREN, D. R.; BREMNER, J. M. Regulation of urease production in soil by microbial assimilation of nitrogen. **Biology and Fertility of Soils**, v. 12, n. 4, p. 261–264, 1992.

MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; VIEIRA, L. L. Uso da terra e a qualidade microbiana de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1678–1688, 2013.

MENDES, I. C. et al. **Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo**. Circular técnica 38. Embrapa Cerrados, 2018.

MENDES, I. C. et al. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, v. 139, p. 85–93, 2019.

MENEZES-BLACKBURN, D. et al. Organic Acids Regulation of Chemical-Microbial Phosphorus Transformations in Soils. **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 21, p. 11521–11531, 2016.

MOREIRA, E. D. S. et al. Production efficiency and agronomic attributes of corn in an integrated crop-livestock-forestry system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 4, p. 419–426, 2018.

NANNIPIERI, P.; TRASAR-CEPEDA, C.; DICK, R. P. Soil enzyme activity: a brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis. **Biology and Fertility of Soils**, v. 54, n. 1, p. 11–19, 2018.

NASCIMENTO, D. M. DO et al. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 292–299, 2019.

NIERO, L. A. C. et al. Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um Latossolo Vermelho Distroférrico com usos e manejos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1271–1282, 2010.

NOGUEIRA, M. A. et al. Promising indicators for assessment of agroecosystems alteration among natural, reforested and agricultural land use in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 115, n. 1–4, p. 237–247, 2006.

OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, v. 56, p. 377–400, 1993.

OBADE, V. D. P. Integrating management information with soil quality dynamics to monitor agricultural productivity. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 2036–2043, 2019.

- PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 2 SPEC.ISS., p. 131–143, 2004.
- PAZ-FERREIRO, J.; FU, S. Biological indices for soil quality evaluation: perspectives and limitations. **Land Degradation and Development**, v. 27, n. 1, p. 14–25, 2016.
- PENNING, L. H. et al. **Avaliação visual para o monitoramento da qualidade estrutural do solo: VESS e VSA**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2015.
- PULIDO MONCADA, M.; GABRIELS, D.; CORNELIS, W. M. Data-driven analysis of soil quality indicators using limited data. **Geoderma**, v. 235–236, p. 271–278, 2014.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R Foundation for Statistical Computing**. Vienna: Austria, 2014.
- RABOT, E. et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122–137, 2018.
- RAIESI, F.; BEHESHTI, A. Microbiological indicators of soil quality and degradation following conversion of native forests to continuous croplands. **Ecological Indicators**, v. 50, p. 173–185, 2015.
- RALISCH, R. et al. Morphostructural characterization of soil conventionally tilled with mechanized and animal traction with and without cover crop. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1795–1802, 2010.
- RALISCH, R. et al. **Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo - DRES**. Documento 390. Londrina: Embrapa Soja, 2017.
- REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009.
- REIS, D. A.; DE LIMA, C. L. R.; BAMBERG, A. L. Qualidade física e frações da matéria orgânica de um Planossolo sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1623–1632, 2016.
- RILLIG, M. C. et al. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change. **Plant and Soil**, v. 253, n. 2, p. 293–299, 2003.
- ROGER-ESTRADE, J. et al. Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: From a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 1, p. 33–49, 2004.
- SALTON, J. C. et al. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 70–79, 2014.
- SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SCHINNER, F.; VON MERSI, W. Xylanase-, CM-cellulase- and invertase activity in soil: An improved method. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 22, n. 4, p. 511–515, 1990.

SHEPERD, T. G. **Visual soil assessment: volume 1. Field guide for pastoral grazing and cropping on flat to rolling country**. 2ed. Palmerston North: Horizons Regional Council, 2009.

SHER, Y. et al. Microbial extracellular polysaccharide production and aggregate stability controlled by Switchgrass (*Panicum virgatum*) root biomass and soil water potential. **bioRxiv**, p. 724195, 2019.

SILVA, A. P. et al. Microbial biomass under various soil- and crop-management systems in short- and long-term experiments in Brazil. **Field Crops Research**, v. 119, n. 1, p. 20–26, 2010.

SILVA, A. P. DA et al. Soil structure and its influence on microbial biomass in different soil and crop management systems. **Soil and Tillage Research**, v. 142, p. 42–53, 2014.

SILVA, E. E. DA; AZEVEDO, P. H. S. DE; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO²)**. Comunicado técnico 99, EMBRAPA. 2007.

SMUCKER, A. J. M. et al. **Soil micropore development and contributions to soluble carbon transport within macroaggregates**. *Vadose Zone Journal*. **Anais...** maio 2007. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.2136/vzj2007.0031>>. Acesso em: 18 jan. 2020

SOIL SURVEY STAFF. **Soil Taxonomy - a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys**. 2 nd. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, 1999.

STIEVEN, A. C. et al. Impacts of integrated crop-livestock-forest on microbiological indicators of soil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 1, p. 53–58, 2014.

STIRZAKER, R. J.; PASSIOURA, J. B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. **Plant and Soil**, v. 185, n. 1, p. 151–162, 1996.

SUN, Z. et al. Does soil amendment alter reactive soil N dynamics following chloropicrin fumigation? **Chemosphere**, v. 212, p. 563–571, 2018.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. (Eds.). **Methods of Soil Analysis, Part 2. Microbiological and Biochemical Properties**. ASA and SSSA, 1994. p. 903–943.

TABATABAI, M. A. A.; BREMNER, J. M. M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 1, n. 4, p. 301–307, 1969.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. . Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science**

Society of America, Proceedings, v. 34, p. 225–229, 1970.

TAVARES FILHO, J. et al. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 393–399, 1999.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análises de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

THAKUR, M. P. et al. Plant diversity drives soil microbial biomass carbon in grasslands irrespective of global environmental change factors. **Global Change Biology**, v. 21, n. 11, p. 4076–4085, 2015.

TORMENA, C. A. et al. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 943–952, 2008.

TOTSCHKE, K. U. et al. Microaggregates in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 181, n. 1, p. 104–136, 2018.

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, 2008.

TUCHTENHAGEN, I. K. et al. Visual evaluation of the soil structure under different management systems in lowlands in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, n. e0170270, 2018.

USDA. **Soil respiration - soil quality indicators**. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA_NRCSCconsumption/download?cid=nrcs142p2_052801&ext=pdf>. Acesso em: 20 de janeiro de 2019.

USDA. **Soil quality indicators - soil enzymes**. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA_NRCSCconsumption/download?cid=nrcs142p2_053139&ext=pdf>. Acesso em: 20 de janeiro de 2019.

USDA. Soil quality indicators - biological indicators and soil functions soil. February, p. 1–4, 2015.

UTOBO, E. B.; TEWARI, L. Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 13, n. 1, p. 147–169, 2014.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703–707, 1987.

WALLENLIUS, K. et al. Effects of land use on the level, variation and spatial structure of soil enzyme activities and bacterial communities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 7, p. 1464–1473, 2011.

WILLIAMS, A. et al. A regionally-adapted implementation of conservation agriculture delivers rapid improvements to soil properties associated with crop yield stability.

Scientific Reports, v. 8, n. 1, 2018.

WILPISZESKI, R. L. et al. Soil aggregate microbial communities: towards understanding microbiome interactions at biologically relevant scales. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 85, n. 14, p. 1–18, 2019.

YANG, Z. X. et al. Effects of cadmium, zinc and lead on soil enzyme activities. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 18, n. 6, p. 1135–1141, 2006.

ZEBALOS, C. H. et al. Soil structural quality in pasturelands in the city of Burity (RO), Brazil. **Revista Científica FAEMA**, v. 9, n. 1, p. 245, 2018.

ZHAO, A.; ZHANG, M.; HE, Z. Characteristics of soil water-soluble organic C and N under different land uses in Alaska. **Soil Science**, v. 177, n. 12, p. 683–694, 2012.

4 ARTIGO A - QUALIDADE ESTRUTURAL E ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO MUITO ARGILOSO SOB ESCARIFICAÇÃO E COMPACTAÇÃO INDUZIDA POR TRÁFEGO DE TRATOR

Resumo

O monitoramento de modificações resultantes dos diferentes sistemas de manejo é importante para prevenir a degradação do solo e prever a sustentabilidade dos agroecossistemas. O objetivo do estudo foi avaliar a qualidade estrutural do solo, de 0 a 0,25 m, pelo Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) e sua relação com atributos físicos, químicos, microbiológicos e bioquímicos. Os sistemas de manejo avaliados em Latossolo Vermelho distroférico muito argiloso foram: Sistema Plantio Direto (SPD), SPD com compactação induzida pelo tráfego de trator (PDC), escarificado (Esc), escarificado com compactação induzida pelo tráfego de trator (EC), e SPD em Integração Lavoura Pecuária (ILP). Foram avaliados: densidade do solo, porosidade, carbono orgânico total (COT), N total (Nt), pH, fósforo e capacidade de troca catiônica, C da biomassa microbiana (CBM), respiração basal, quociente metabólico (relação entre CBM e respiração basal, qCO_2), quociente microbiano (relação entre CBM e COT, $qMic$) e as atividades da arilsulfatase, celulase e urease. Os diferentes manejos e as diferentes classes de qualidade estrutural, definidas pelo DRES, foram comparados quanto aos atributos do solo. Os manejos conservacionistas (ILP e SPD) proporcionaram melhor qualidade estrutural e favoreceram os processos microbiológicos, como indicado por menor qCO_2 e maior $qMic$. Os índices de qualidade estrutural baseados no DRES discriminaram os diferentes manejos de solo, assim como os atributos microbiológicos, e se correlacionaram com o Nt e com as atividades enzimáticas, demonstrando ser uma ferramenta integrativa no monitoramento da qualidade do solo sob diferentes manejos.

Palavras-chave: Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo, atividade enzimática, Integração Lavoura Pecuária, Sistema Plantio Direto, qualidade do solo.

Abstract

Monitoring changes caused by different strategies of management is useful to prevent soil degradation and predict the sustainability of agricultural ecosystems. This study assessed the soil structural quality, at 0-0.25 m depth, based on the Rapid Soil

Structure Diagnosis (DRES, from Portuguese) method and its correlation with physical, chemical, microbiological and biochemical attributes. The management systems of a very clayey Rhodic Eutrudox were: No-Till System (NTS), NT submitted to compaction with tractor traffic (NT-C), chiseling (Chi), chiseling submitted to compaction with tractor traffic (Chi-C), and NTS under Crop-Livestock Integration (CLI). Assessments comprised: soil bulk density, porosity, total organic C (TOC), total N, pH, phosphorus and cation exchange capacity, microbial biomass C (MBC), basal respiration, metabolic quotient (ratio between MBC to basal respiration, qCO_2), microbial quotient (ratio between MBC and TOC, $qMiC$), and the activities of arylsulphatase, cellulase, and urease. The different soil managements and the different classes of structural quality defined by DRES were compared for the soil attributes. The conservation agricultural systems (NTS and CLI) provided better structural quality and favored the soil microbiological processes as showed the lower qCO_2 and higher $qMic$. The indexes of structural quality based on DRES discriminated the different soil managements as did the microbiological attributes, and correlated with total N and soil enzyme activities, showing to be an integrative tool for monitoring the soil quality under different managements.

Keywords: Rapid Soil Structure Diagnosis, soil enzymes, Crop-Livestock Integration, No-Till System, soil quality.

Introdução

A estrutura do solo integra e reflete diversas de suas propriedades e processos, como a fertilidade, biodiversidade e capacidade de ciclagem de C e nutrientes (RABOT et al., 2018). A qualidade estrutural pode ser mensurada por avaliações visuais ou por meio da verificação de atributos físicos (JOHANNES et al., 2017). As metodologias aplicáveis a campo, como os métodos visuais, proporcionam uma avaliação rápida e eficiente das condições estruturais (TUCHTENHAGEN et al., 2018). O Perfil Cultural (BOIZARD et al., 2017; HÉNIN et al., 1960; TAVARES FILHO et al., 1999), o Visual Evaluation of Soil Structure (VESS) (BALL; BATEY; MUNKHOLM, 2007) e o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) (RALISCH et al., 2017) são exemplos de metodologias visuais de avaliação da estrutura. Nesse sentido, o DRES emprega os critérios do Perfil Cultural adaptados às regiões tropicais,

reconhecendo não somente feições típicas de compactação, mas também a desagregação das partículas como indício da degradação física.

A qualidade do solo (QS) resulta da interação de seus atributos físicos, químicos e biológicos, e reflete sua capacidade em atender as necessidades humanas, das plantas e dos animais, mantendo ou melhorando seu papel na sustentabilidade ambiental (DORAN; PARKIN, 1994). Indicadores de QS são sensíveis ao uso e manejo do solo e permitem identificar problemas nos agroecossistemas, e com isso, prever a capacidade do solo em dar suporte à produção agropecuária (AON et al., 2001).

Os indicadores microbiológicos e bioquímicos da QS têm se mostrado sensíveis ao identificar alterações promovidas pela ação antrópica, além de se correlacionarem com a qualidade da estrutura (CUI; HOLDEN, 2015; SILVA et al., 2014) e com as formas de uso e manejo do solo (GUIMARÃES et al., 2013; MANN et al., 2019). Embora diferentes sistemas de manejo possam aumentar a produtividade das culturas no curto prazo, podem afetar a QS a longo prazo, comprometendo a sustentabilidade da produção agrícola (TUCHTENHAGEN et al., 2018).

Atributos físicos, químicos e biológicos usados como indicadores da QS interagem entre si, de modo que a qualidade estrutural pode estar relacionada com a qualidade microbiológica. A partir da modificação estrutural de um Latossolo Vermelho de textura muito argilosa induzida pelo tráfego de trator e escarificação mecânica, o objetivo do estudo foi verificar a relação entre a qualidade estrutural avaliada pelo método DRES e atributos físicos, químicos, microbiológicos e bioquímicos comumente empregados na avaliação da QS.

Material e métodos

Área experimental e tratamentos

O estudo foi desenvolvido na estação experimental da Embrapa Soja, localizada no município de Londrina, Paraná, 23°11'37"S e 51°11'03"O, e altitude de 630 m. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distroférico pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (SANTOS et al., 2018), equivalente a Rhodic Eutrudox (SOIL SURVEY STAFF, 1999) e a Rhodic Ferralsol (IUSS, 2014). O clima da região é Cfa, subtropical úmido com verões quentes, de acordo com a classificação de Köppen. A composição granulométrica do solo, na camada de 0 a 0,25 m, é: 786 g kg⁻¹ de argila, 150 g kg⁻¹ de areia e 64 g kg⁻¹ de silte.

Os sistemas de manejo avaliados foram: Sistema Plantio Direto (SPD), SPD com compactação induzida pelo tráfego de trator (PDC), escarificado (Esc), escarificado com compactação induzida pelo tráfego de trator (EC), e SPD em Integração Lavoura Pecuária (ILP), como referência de qualidade estrutural. A área de ILP foi manejada em SPD por 20 anos, envolvendo soja/milho no verão e a rotação trigo/aveia no inverno. No verão de 2016/17, a área foi ocupada pelo consórcio milho + *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã. A partir de março de 2016, até julho de 2017, a área foi então pastejada por bovinos, em lotação variável de forma a manter altura constante do resíduo da pastagem, equivalente a 0,30 m. Após dessecação com o herbicida glifosato, a cultura da soja foi semeada em novembro de 2017, permanecendo na área até março/2018, quando a amostragem foi então realizada. As demais parcelas experimentais eram cultivadas sob SPD desde 2009, com soja (*Glycine max*) no verão e milho (*Zea mays*), trigo (*Triticum* sp.) ou aveia preta (*Avena strigosa*) no outono/inverno. Antes do ensaio, essas áreas foram cultivadas com soja no verão (2016/2017) e aveia no inverno (2017). A escarificação foi realizada em novembro de 2017 por meio de escarificador montado equipado com rolo destorroador, com cinco hastes distanciadas 0,40 m e ponteiras de 0,08 m, atingindo uma profundidade média de trabalho de 0,30 m. A indução da compactação também foi realizada em novembro de 2017, pelo tráfego de um trator 4x2 TDA equipado com uma concha na dianteira e contendo contrapesos, com massa total de 8,5 Mg, pneus traseiros 18.4-34R e pneus dianteiros 11.00-22R. Foram realizados 10 tráfegos com o trator, sobre o mesmo rastro de pneu, com velocidade média de 5 km h⁻¹. No momento dos tráfegos, o solo apresentava conteúdo gravimétrico de água próximo à capacidade de campo na camada de 0 – 0,6 m, com valores entre 0,31 g g⁻¹ a 0,37 g g⁻¹ para SPD, e entre 0,29 g g⁻¹ a 0,37 g g⁻¹ para o manejo escarificado. Em janeiro de 2018, semeou-se braquiária ruzizensis (*Urochloa ruziziensis*) em todas as parcelas, constituindo-se na cultura presente na área no momento da amostragem.

Foram avaliadas quatro repetições por tratamento, em parcelas de 15 m x 5 m. As características químicas do solo da área experimental em cada sistema de manejo são apresentadas na Tabela 1.

Amostragem e análises de solo

A amostragem foi realizada em março de 2018, quatro meses após a escarificação e indução da compactação nos tratamentos correspondentes. A

qualidade estrutural foi avaliada pelo método do DRES (RALISCH et al., 2017), em duplicata por parcela. Quando evidenciadas camadas distintas (camada diagnóstico) nos 0,25 m de profundidade da amostra, cada uma recebeu um escore de acordo com a metodologia, sendo usadas na obtenção do escore final ponderado pela espessura de cada camada, correspondente ao IQES (índice de qualidade estrutural do solo). Em cada camada diagnóstico foram retiradas amostras para a determinação da umidade gravimétrica e dos atributos químicos, microbiológicos e bioquímicos. Amostras com estrutura preservada foram coletadas na parede da mini trincheira usada para retirada do monólito para avaliação da estrutura, na mesma profundidade das camadas diagnóstico, para determinação da densidade do solo (Ds), densidade de partícula (Dp) e microporosidade por mesa de tensão (TEIXEIRA et al., 2017), sendo obtidos três anéis volumétricos por profundidade e por repetição. A porosidade total e a macroporosidade foram calculadas a partir dos valores de Ds, Dp e microporosidade.

Tabela 1. Características químicas do solo da área experimental sob diferentes manejos: Sistema Plantio Direto (SPD), SPD com compactação induzida por tráfego de trator (PDC), escarificado (Esc), escarificado com compactação induzida por tráfego de trator (EC), e SPD em Integração Lavoura Pecuária (ILP). Londrina, PR, março de 2018.

Sistema de manejo	COT	N-t	P	pH	H+Al	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	SB	CTC	V	SO ₄ ⁻²
	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³	em CaCl ₂	cmol _c dm ⁻³								%
SPD	20.2	2.1	19.5	5.1	4.7	0.1	3.8	1.8	0.5	6.1	10.8	56.0	8.2
PDC	18.7	1.9	17.1	4.8	5.2	0.2	3.3	1.6	0.5	5.4	10.6	50.8	17.4
Esc	19.1	1.8	18.5	4.9	4.8	0.1	3.6	1.7	0.5	5.8	10.6	54.8	9.0
EC	19.3	1.9	14.9	5.3	4.2	0.1	4.3	2.1	0.5	6.8	11.0	61.4	13.0
ILP	20.6	2.2	10.7	5.2	4.2	0.0	3.6	2.0	0.6	6.3	10.5	59.7	3.8

Extratores: P, K⁺, B, Cu, Fe, Mn, Zn (Mehlich-1); Ca⁺², Mg⁺², Al⁺³ (KCl 1 M); H + Al (SMP); COT: Carbono orgânico total; N-t: Nitrogênio Total (determinados em analisador de combustão seca modelo TOC); S-SO₄⁻² (extração com solução de fosfato de cálcio, análise por ICP óptico). SB: Soma de Bases; CTC: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases.

Os atributos químicos foram determinados segundo Teixeira et al. (2017), sendo o carbono orgânico total (COT) e o N total (N-t) quantificados por combustão seca em analisador elementar de C e N, modelo Flash 2000 – *Organic Elemental Analyzer*, Thermo Scientific. O carbono da biomassa microbiana (CBM) foi

extraído pelo método de fumigação-extração (VANCE; BROOKES; JENKINSON, 1987) e determinado por combustão em analisador modelo TOC, Vario Cube - Elementar. Após a obtenção da respiração basal (RB) (ALEF, 1995), foram calculados os quocientes microbiano (razão entre o CBM e o COT, q_{Mic}) (ANDERSON; DOMSCH, 1989) e metabólico (razão entre a RB e o CBM, q_{CO_2}) (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

Os atributos bioquímicos avaliados compreenderam as atividades das enzimas arilsulfatase (TABATABAI; BREMNER, 1970), celulase (SCHINNER; VON MERSI, 1990) e urease (DICK; BREACKWELL; TURCO, 1996).

Análises estatísticas

A partir da espessura das camadas diagnóstico observadas nas amostras do DRES, os valores dos atributos físicos, microbiológicos e bioquímicos obtidos nas diferentes profundidades foram ponderados, permitindo uma comparação adequada entre os diferentes tratamentos e o DRES, por repetição. As parcelas sob os diferentes manejos também foram agrupadas de acordo com a classe de interpretação do índice de qualidade estrutural de acordo com a metodologia DRES (RALISCH et al., 2017). Realizou-se a verificação dos pressupostos de normalidade, homogeneidade da variância dos resíduos e homocedasticidade previamente à análise de variância (ANAVA). Quando atendidos os pressupostos, tanto para os diferentes manejos do solo, quanto para as diferentes classes de qualidade estrutural, as médias foram comparadas pelo Teste de Scott-Knott a 5 % de probabilidade.

Realizou-se também a análise multivariada dos dados por meio da análise discriminante canônica considerando os atributos físicos, microbiológicos e bioquímicos como *drivers* das diferentes classes da qualidade estrutural do solo. Todas as análises foram realizadas com o software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014).

Resultados

Os atributos físicos variaram com o manejo do solo (Tabela 2). O índice de qualidade estrutural do solo (IQES) foi maior nas áreas de manejo conservacionista, especialmente na área sob ILP, seguida por SPD, o que também pode ser verificado na Figura 1. As amostras da área sob ILP apresentaram maior volume de sistema radicular, bem como maior proporção de agregados favoráveis,

entre 1 e 4 cm, com porosidade visível e de formato arredondado. As parcelas sob SPD apresentaram agregados com formato e tamanho favoráveis, bem como porosidade visível, ao contrário das parcelas compactadas (PDC e EC), em que foi possível verificar a presença de feições de degradação, como agregados de dimensões superiores a 7 cm, formato angular e baixa porosidade visível. Da mesma forma, as parcelas escarificadas (Esc e EC) apresentaram feições de degradação, nesse caso pela presença de terra solta e agregados muito pequenos resultantes da desagregação, com alta suscetibilidade à erosão hídrica.

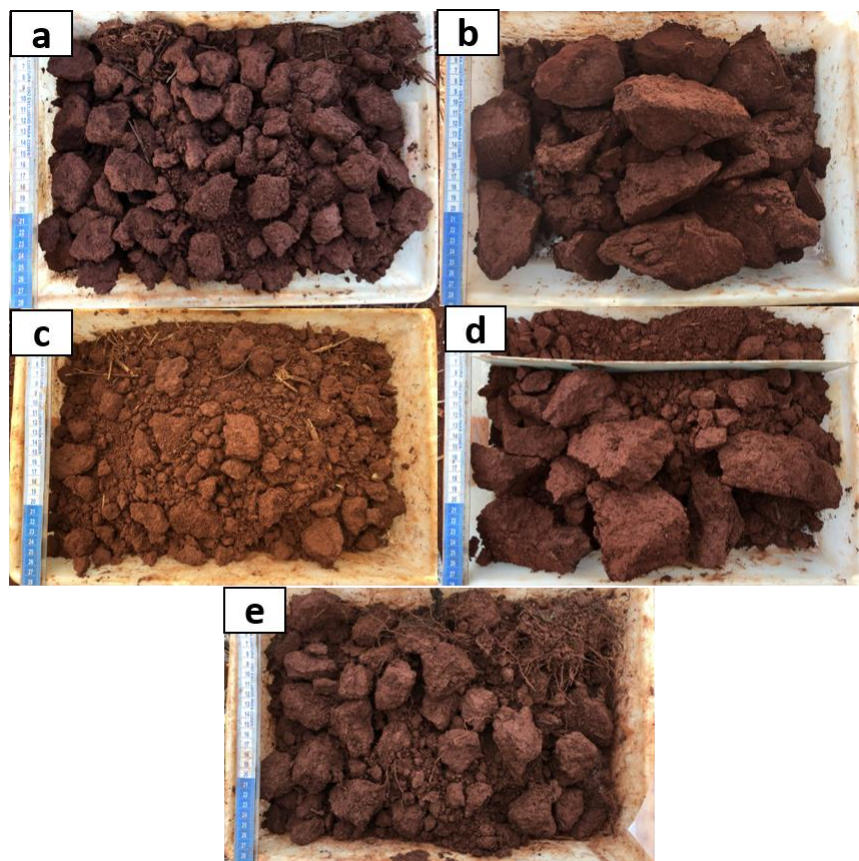


Figura 1. Análise da qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho muito argiloso pelo DRES, a 0-0,25 m de profundidade, em área a) Sistema Plantio Direto, b) Plantio Direto compactado, c) escarificada, d) escarificada e compactada e, e) Integração Lavoura Pecuária. Londrina, PR, março, 2018. Foto: O autor.

A D_s foi maior nas áreas compactadas e menor na área escarificada, sendo intermediária nas áreas sob ILP e SPD. A macroporosidade foi maior na área escarificada, seguida das áreas conservacionistas (ILP e SPD) e menor nas áreas compactadas. Em contrapartida, a microporosidade foi maior nas áreas compactadas

e na área sob ILP, diminuindo em SPD e atingindo o menor valor na área escarificada. A porosidade total foi intermediária nas áreas sob manejo conservacionista (ILP e SPD), sendo maior no tratamento Esc e menor nas duas parcelas compactadas pelo tráfego do trator (PDC e EC).

Em relação aos atributos microbiológicos (Tabela 2), o CBM foi maior nas áreas sob SPD e PDC, enquanto a RB foi maior no SPD e nos tratamentos escarificados, em relação ao PDC e ILP. As parcelas sob SPD, ILP e PDC apresentaram menor qCO_2 que as áreas escarificadas, que por sua vez apresentaram menor $qMic$.

Tabela 2. Atributos físicos, biológicos e químicos a 0 – 0,25 m, ponderados de acordo com as camadas diagnóstico do DRES, em um Latossolo Vermelho muito argiloso, sob diferentes manejos. Londrina, PR, março de 2018.

Sistema de manejo	SPD	PDC	Esc	EC	ILP	p-valor	CV%
----- <i>Atributos físicos</i> -----							
IQES ⁽¹⁾	4,5	1,5	1,1	1,2	4,9	-	14,1
Ds (g cm ⁻³)	1,26 c	1,41 a	1,11 d	1,40 a	1,34 b	<0,001	2,4
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,45 b	0,45 b	0,40 c	0,47 a	0,46 a	<0,001	4,0
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,06 b	0,01 d	0,16 a	0,01 d	0,03 c	<0,001	48,1
Porosidade total (m ³ m ⁻³)	0,51 b	0,46 e	0,56 a	0,48 d	0,49 c	<0,001	4,4
----- <i>Atributos biológicos</i> -----							
CBM (mg kg ⁻¹)	907 a	960 a	574 b	428 b	702 b	<0,001	28,5
$qMic$ (%)	6,39 a	7,21 a	4,05 b	3,05 b	5,35 a	<0,001	28,8
Resp. basal (μg C-CO ₂ g ⁻¹ h ⁻¹)	7,32 a	5,11 b	7,03 a	7,26 a	5,76 b	0,03	25,0
qCO_2 (μg C-CO ₂ mg ⁻¹ CBM h ⁻¹)	3,58 b	2,27 b	6,70 a	8,21 a	3,56 b	<0,001	45,1
Ariilsulfatase (μg p-nitrofenol g ⁻¹ h ⁻¹)	549 ^{ns}	517	531	524	544	0,07	4,6
Celulase (μg glicose g ⁻¹ h ⁻¹)	82 b	59 b	112 a	63 b	64 b	<0,01	35,7
Urease (μg N g ⁻¹ h ⁻¹)	90 b	107 a	91 b	81 b	122 a	0,01	24,5
----- <i>Atributos químicos</i> -----							
COT (g kg ⁻¹)	19,9 ^{ns}	18,3	19,1	19,0	19,6	0,35	8,3
N-t (g kg ⁻¹)	2,06 a	1,86 b	1,85 b	1,94 b	2,15 a	<0,01	8,1
pH	5,1 ^{ns}	4,8	4,9	5,3	5,2	0,07	7,4
P (mg dm ⁻³)	19,8 a	17,1 a	18,5 a	14,5 b	10,5 b	0,01	33,4
CTC (cmol _c dm ⁻³)	10,7 ^{ns}	10,5	10,6	11,0	10,3	0,17	5,0

⁽¹⁾ Índice de qualidade estrutural do solo avaliado pelo DRES, a nota varia entre 1 (qualidade estrutural muito ruim) a 6 (qualidade estrutural muito boa). Legenda: SPD – Sistema Plantio Direto, PDC – Plantio Direto compactado, Esc – área escarificada, EC – área escarificada e compactada, ILP – Integração Lavoura Pecuária. Os escores do DRES não foram comparados estatisticamente. Médias seguidas de diferentes letras na linha diferem pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A enzima arilsulfatase não foi sensível às diferentes condições de manejo a 5% de probabilidade, mantendo atividade estável entre os tratamentos, mas ao se considerar o p-valor de 0,07, houve maiores atividades nas áreas conservacionistas (SPD e ILP). Por outro lado, a atividade da celulase foi maior na área escarificada. A atividade da enzima urease, relacionada ao ciclo do N, foi maior nas áreas sob ILP e PDC em relação às demais. Os diferentes manejos do solo não interferiram no COT, que se manteve estável entre os tratamentos. Entretanto, o N-t foi maior nas áreas de ILP e SPD, em relação aos demais manejos.

Ao se comparar os efeitos das diferentes induções de degradação da estrutura do solo, verifica-se maior efeito negativo nos atributos biológicos pela escarificação, em comparação à compactação. As parcelas escarificadas apresentaram maior respiração basal, qCO_2 e atividade da enzima celulase, demonstrando condições favoráveis à oxidação da matéria orgânica do solo. Além disso, a escarificação rompe as estruturas do solo, reduzindo a microporosidade, importante habitat da microbiota, assim como reduz a retenção de água, mais uma vez interferindo nas condições de desenvolvimento e manutenção dos microrganismos.

Em relação aos atributos químicos, houve efeito apenas sobre as variáveis N total e P disponível. As áreas conservacionistas apresentaram maior teor de N total, apesar de não ter sido verificada diferença no teor de COT. Os teores de P disponível foram inferiores nas áreas ILP e EC.

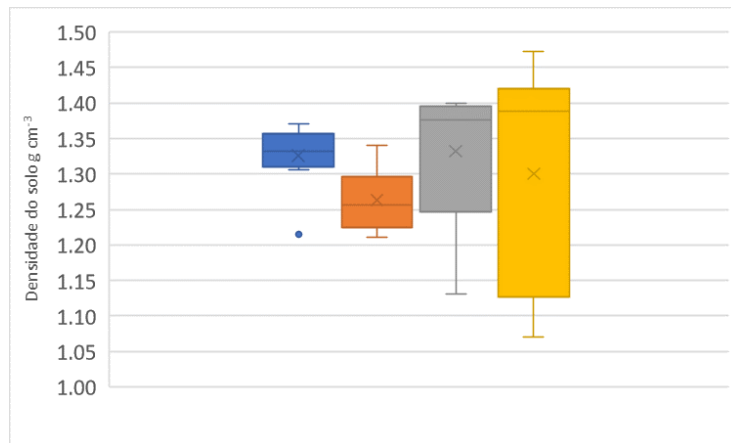
Ao se compararem as variáveis por classe de qualidade estrutural estabelecidas pelo DRES, independentemente do manejo do solo, não houve variação proporcional dos atributos físicos da classe considerada “muito boa” para a classe “muito ruim”. Não houve distribuição normal dos erros e por isso foi apresentada apenas a estatística descritiva dos resultados (Figura 2). Ao avaliar os manejos contrastantes, não foi possível verificar parcelas com qualidade estrutural “regular”, classe intermediária descrita na metodologia do DRES. Assim, as áreas apresentaram quatro classes de qualidade estrutural: boa, muito boa, ruim e muito ruim.

Os atributos biológicos apresentaram distribuição normal dentro das classes estabelecidas e os resultados foram submetidos à análise de variância, sendo que a maioria apresentou variação significativa de acordo com a classe de qualidade estrutural correspondente (Tabela 3). Destaca-se o menor CBM na classe de qualidade estrutural “muito ruim”, a qual também apresentou os maiores valores de

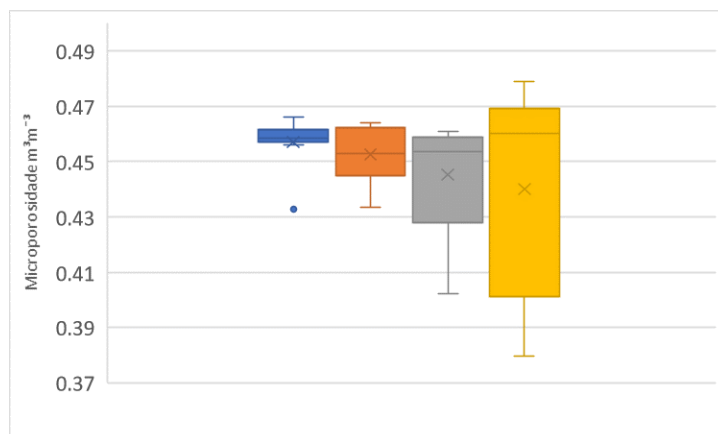
$q\text{CO}_2$, confirmando condição estressante à comunidade microbiana. As áreas com qualidade estrutural “ruim” e “muito ruim” também apresentaram os menores teores de N-t.

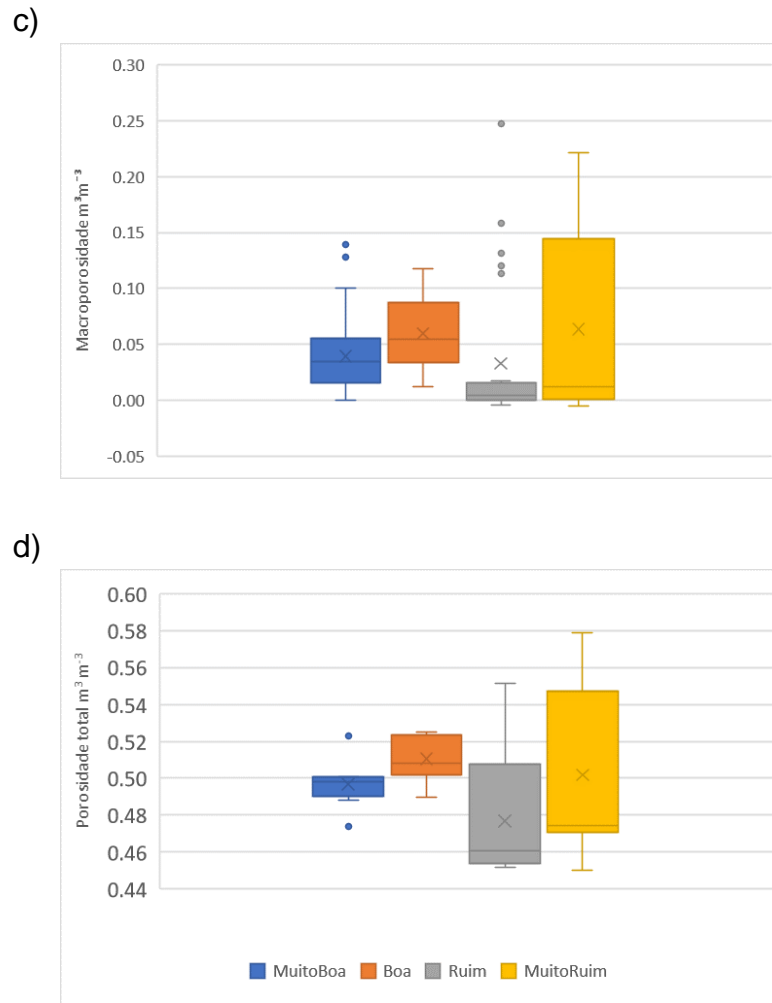
Figura 2. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho muito argiloso, sob diferentes manejos, agrupados por classes de qualidade estrutural (DRES): a) Densidade do solo; b) Microporosidade; c) Macroporosidade e; d) Porosidade total. Classes: MuitoBoa: DRES entre 5 e 6; Boa: DRES entre 4 e 4,9; Ruim: DRES entre 2 e 2,9; MuitoRuim: DRES entre 1 e 1,9. Londrina, PR, março de 2018.

a)



b)





Continuação... **Figura 2.** Atributos físicos de um Latossolo Vermelho muito argiloso, sob diferentes manejos, agrupados por classes de qualidade estrutural (DRES): a) Densidade do solo; b) Microporosidade; c) Macroporosidade e; d) Porosidade total. Classes: MuitoBoa: DRES entre 5 e 6; Boa: DRES entre 4 e 4,9; Ruim: DRES entre 2 e 2,9; MuitoRuim: DRES entre 1 e 1,9. Londrina, PR, março de 2018.

Diferentemente do observado na comparação entre sistemas de manejo, a atividade da enzima arilsulfatase se mostrou sensível à variação das classes de qualidade estrutural, sendo maior nas áreas classificadas como “muito boa” e “boa”. A atividade da urease foi maior nas áreas com qualidade estrutural “muito boa” e “ruim”, não sendo verificada variação na atividade da enzima celulase entre as classes de qualidade estrutural.

Tabela 3. Índice de qualidade estrutural (IQES) e atributos biológicos e químicos de um Latossolo Vermelho muito argiloso, sob diferentes manejos, agrupados por classe de qualidade estrutural segundo o método do diagnóstico rápido da estrutura do solo (DRES) ⁽¹⁾. Londrina, PR, março de 2018.

Qualidade estrutural	Muito Boa	Boa	Ruim	Muito Ruim	p-valor	CV%
----- <i>Qualidade estrutural</i> -----						
IQES	5,0	4,4	2,0	1,1	-	7,7
----- <i>Atributos biológicos</i> -----						
CBM (mg kg ⁻¹)	727 ab	904 a	938 a	579 b	<0,01	34,6
qMic (%)	5,57 b	6,25 a	6,71 a	4,26 b	0,03	36,8
Respiração basal (µg C-CO ₂ g ⁻¹ h ⁻¹)	6,15 ^{ns}	7,05	5,76	6,66	0,58	27,8
qCO ₂ (µg C-CO ₂ mg ⁻¹ CBM h ⁻¹)	3,56 b	3,60 ab	2,58 b	6,56 a	<0,01	55,0
Arilsulfatase (µg p-nitrofenol g ⁻¹ h ⁻¹)	542 a	552 a	529 b	522 b	0,04	4,6
Celulase (µg glicose g ⁻¹ h ⁻¹)	60,8 ^{ns}	88,0	71,2	79,6	0,36	42,6
Urease (µg N g ⁻¹ h ⁻¹)	115 a	95,0 b	116 a	87,5 b	0,03	25,3
----- <i>Atributos químicos</i> -----						
COT (g kg ⁻¹)	19,0 ^{ns}	20,6	18,8	18,8	0,06	7,9
N-t (g kg ⁻¹)	2,08 ab	2,14 a	1,88 b	1,88 b	<0,01	8,2
pH	5,0 ^{ns}	5,1	5,2	4,9	0,75	8,1
P (mg dm ⁻³)	12,6 ^{ns}	18,5	16,1	16,9	0,22	37,1
CTC (cmol _c dm ⁻³)	10,3 ^{ns}	10,8	10,5	10,7	0,09	4,9

⁽¹⁾ Classes: Muito Boa: DRES entre 5 e 6; Boa: DRES entre 4 e 4,9; Ruim: DRES entre 2 e 2,9; Muito Ruim: DRES entre 1 e 1,9. Os escores do DRES não foram comparados estatisticamente. Médias seguidas de letras diferentes, na linha, diferem pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A análise discriminante canônica considerando todos os atributos avaliados nas áreas sob diferentes sistemas de manejo do solo permitiu a separação das classes de qualidade estrutural avaliada pelo DRES (Tabela 4; Figura 3). As áreas classificadas como “muito boas” se posicionaram no 3º quadrante, correlacionadas com as atividades das enzimas arilsulfatase e urease e com o teor de N-t. As áreas classificadas “boas” quanto à qualidade estrutural ficaram plotadas no 2º quadrante, correlacionando-se com os atributos físicos Ds e microporosidade e com os atributos microbiológicos RB e qCO₂. As variáveis que mais contribuíram para a separação das classes de qualidade estrutural foram: Ds, microporosidade e qCO₂ para o eixo 1 e Ds, CBM e porosidade total para o eixo 2.

Por sua vez, as áreas com qualidade “ruim” e “muito ruim”, indicaram semelhanças entre si e se agruparam na porção positiva do eixo 1 e em contraste com as demais. Essas convergiram com os atributos biológicos CBM e qMic e com a atividade da enzima celulase.

Tabela 4. Coeficientes canônicos padronizados da análise discriminante canônica de acordo com a classe de interpretação da qualidade estrutural (DRES), considerando os atributos físicos, biológicos e químicos de um Latossolo Vermelho muito argiloso, sob diferentes manejos. Londrina, PR, março de 2018.

Atributo	Can1 (77,2%)	Can2 (12,9%)
<i>Atributos físicos</i>		
Densidade do Solo (Ds)	3,334	-7,615
Microporosidade (MicroP)	-3,870	3,405
Porosidade Total (PT)	0,294	-6,299
<i>Atributos biológicos</i>		
Carbono da Biomassa Microbiana (CBM)	2,693	6,955
Quociente microbiano (q_{Mic})	1,063	-6,103
Respiração Basal (RB)	-2,817	0,395
Quociente metabólico (q_{CO_2})	-3,122	0,928
Arilsulfatase (AryI)	-0,830	-0,209
Celulase	0,779	1,324
Urease	-0,436	-0,292
<i>Atributos químicos</i>		
Carbono Orgânico Total (COT)	-0,453	-1,040
Nitrogênio Total (N-t)	-0,154	-0,861
R ²	0,94*	0,73*
Autovalor	15,99	2,68
<i>p-value</i>	<0,0001	<0,0001

Discussão

Ao analisar a qualidade estrutural do solo, além dos agregados, é fundamental a existência de proporções adequadas de espaços porosos. A perspectiva da porosidade permite também a avaliação de processos que acontecem no solo (BOIZARD et al., 2017; RABOT et al., 2018). A boa qualidade estrutural é importante para a melhoria da fertilidade do solo e da qualidade da água, no aumento da produtividade agrícola e na redução da erodibilidade pela maior porosidade, sendo vital na sustentabilidade da produção de alimentos (BRONICK; LAL, 2005).

A qualidade estrutural do solo foi superior nas áreas sob ILP, seguida por SPD, em contraste com as áreas sob compactação (PDC ou EC) ou as escarificadas (Esc ou EC), que prejudicaram esse atributo. O manejo conservacionista proporciona estrutura do solo favorável ao crescimento e desenvolvimento das plantas (SALTON et al., 2014; SILVA et al., 2014; WILLIAMS et al., 2018), principalmente devido ao aporte de resíduos vegetais diversificados, cobertura do solo e por favorecer a formação de bioporos resultantes dos sistemas de raízes das culturas principais ou

as intercalares, como no caso das braquiárias no sistema ILP (CASTIONI et al., 2018; TUCHTENHAGEN et al., 2018).

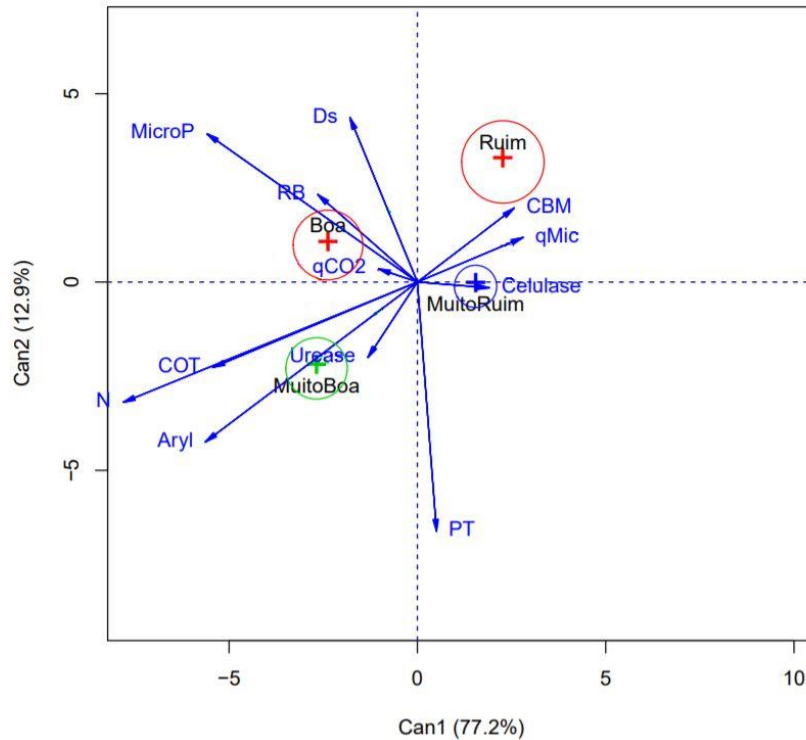


Figura 3. Análise discriminante canônica de acordo com a classe de interpretação da qualidade estrutural do solo com base no método do diagnóstico rápido da estrutura do solo (DRES), considerando atributos físicos, biológicos e químicos de um Latossolo Vermelho muito argiloso, sob diferentes manejos. Classes: MuitoBoa: DRES entre 5 e 6; Boa: DRES entre 4 e 4,9; Ruim: DRES entre 2 e 2,9; MuitoRuim: DRES entre 1 e 1,9. Londrina, PR, março de 2018.

A Ds é um dos principais atributos físicos influenciados pelo manejo e tem relação direta com a resistência à penetração das raízes (REICHERT et al., 2009). A compactação inicialmente reduz a macroporosidade e aumenta a microporosidade, enquanto que a escarificação diminui a microporosidade (DEXTER, 2004). Embora a escarificação e a subsolagem sejam práticas adotadas para a diminuição da Ds, seu efeito tem pouca duração, além de demandar alto dispêndio energético (RALISCH et al., 2010). Por sua vez, a desagregação mecânica do solo pode promover uma diminuição da Ds a ponto de ser negativa ao desenvolvimento das culturas (REICHERT et al., 2009).

Se por um lado a alta densidade do solo dificulta a penetração das raízes, a baixa densidade indica um solo desagregado, com menor capacidade de retenção de água e mais suscetível à erosão. Esses resultados refletem na microporosidade e na porosidade total (DEXTER, 2004). Portanto, valores extremos de densidade do solo ou de porosidade são desfavoráveis ao desenvolvimento das plantas. Em geral, valores intermediários dessas variáveis são mais favoráveis ao desenvolvimento das culturas, visto que resultam em um ambiente mais favorável à penetração das raízes e à retenção de água (STIRZAKER; PASSIOURA; WILMS, 1996).

Apesar de uma aparente divergência entre os atributos físicos e as classes de qualidade estrutural obtidas pelo DRES, destaca-se que, áreas contrastantes (escarificadas e compactadas) se inseriram nos mesmos grupos (“ruim” e “muito ruim”), agrupando valores extremos dos atributos avaliados. Além disso, o uso de plantas com sistema radicular abundante é a forma mais racional de melhorar as propriedades físicas do solo, que além do efeito direto promovido pelo sistema radicular, contribui com maior aporte de material orgânico, favorecendo a estabilidade e a qualidade de agregados, além de melhorar atributos químicos e biológicos (CARRIZO et al., 2015). No presente estudo, as áreas sob manejo conservacionista SPD e ILP apresentaram os melhores índices de qualidade estrutural, bem como de atributos químicos e biológicos.

As áreas sob manejos conservacionistas (ILP e SPD) apresentaram índices de qCO_2 menor e $qMic$ maior que nos demais sistemas de manejo, revelando condições menos estressantes à comunidade microbiana, que foram similares às áreas sob PDC. As áreas escarificadas apresentaram condição menos favorável à biota, corroborando o conceito do Perfil Cultural e do DRES em que a desagregação do solo resulta da degradação da sua estrutura, que por sua vez impacta negativamente os atributos biológicos (CUI; HOLDEN, 2015; SILVA et al., 2014). Práticas de revolvimento do solo como a escarificação contribuem para a degradação da sua estrutura, além de trazer outras consequências desfavoráveis ao sistema de produção. A escarificação aumenta os custos de produção, pelo maior gasto com mão de obra e uso de combustível fóssil, sendo que a ruptura da estrutura pode promover perda de solo por erosão, diminuição da capacidade de retenção de água, perda de nutrientes e oxidação da matéria orgânica (SILVA et al., 2014). Além do mais, tem sido demonstrado que essa operação é ineficaz para a descompactação, pois tem

baixa durabilidade caso não seja complementada com o uso de raízes para a recuperação física (RALISCH et al., 2010). Nesse aspecto, o emprego de raízes na recuperação física do solo tem sido grandemente favorecido nos sistemas ILP com pastagens de gramíneas tropicais como as espécies do gênero *Urochloa* sp. (SALTON et al., 2014).

A atividade de enzimas do solo contribui para o melhor entendimento da ciclagem de C e nutrientes pela sua atuação nos ciclos biogeoquímicos. O estímulo à atividade da celulase na área escarificada pode estar relacionada com o aumento do contato dos resíduos vegetais com o solo, além do favorecimento da aeração promovida pelo revolvimento, o que favorece a ação de microrganismos notadamente celulolíticos (BINI et al., 2013), acelerando a oxidação da matéria orgânica. Essa afirmativa é amparada pelo maior índice qCO_2 nas áreas escarificadas, indicando maior oxidação de C pela comunidade microbiana daquele ambiente. Por sua vez, a atividade da enzima urease, relacionada ao ciclo do N, foi maior nas áreas de ILP e PDC. No caso da área em ILP, a maior atividade está relacionada ao aporte de resíduos vegetais produzidos pela gramínea e está relacionada ao potencial de aporte de N ao solo (ADETUNJI et al., 2017). Na área sob PDC, a maior atividade pode ser consequência da maior biomassa microbiana (KLOSE; TABATABAI, 2000), que também é fonte dessa enzima. O resultado prático da maior atividade ureásica nesses solos é o maior risco de perdas de N por volatilização da amônia ao se empregar ureia como fonte de N, o que exige mais cuidados no manejo da adubação nitrogenada (JIAO et al., 2005; MCCARTY; SHOGREN; BREMNER, 1992).

Ao se agrupar as áreas de acordo com as classes de qualidade estrutural estabelecidas pelo método DRES, os atributos microbiológicos demonstraram coerência com a metodologia de avaliação visual, ao se verificar menor CBM nas áreas com qualidade estrutural “muito ruim”, assim como maior índice qCO_2 , confirmando situação desfavorável à comunidade microbiana (CUI; HOLDEN, 2015; SALTON et al., 2014; SILVA et al., 2014). De forma semelhante, os teores de N-t variaram com as diferentes classes de qualidade estrutural, com menores valores nas áreas das classes “ruim” e “muito ruim”. Maiores valores de N-t representam maiores estoques de N no solo, a maior parte na forma orgânica, que pode ser mineralizada e disponibilizada às plantas (FAGOTTI et al., 2012). A concordância entre qualidade estrutural do solo e os teores de COT e N-t também foi verificada por Salton et al. (2014) e Tuchtenhagen et al. (2018). No caso do presente estudo, entretanto, não foi

verificada relação entre COT e as classes de qualidade estrutural estabelecidas pelo DRES. Isso provavelmente se deveu às condições do experimento, instalado em solo anteriormente bem manejado e avaliado pouco tempo após a implantação dos tratamentos. Efeitos do uso e manejo do solo sobre os estoques de COT requerem maiores prazos, enquanto no presente estudo a variação dos diferentes estados de compactação foram induzidas artificialmente sobre um solo com boas características iniciais, inclusive quanto aos teores de COT. Essa observação enfatiza a importância dos indicadores biológicos no monitoramento da QS, que mesmo no curto prazo já evidenciaram os efeitos das práticas de uso e manejo, enquanto que o efeito sobre o COT e a maioria dos atributos físicos e químicos ainda não eram perceptíveis (BINI et al., 2013; MANN et al., 2019).

A atividade da enzima arilsulfatase variou com a classe de qualidade estrutural, em consonância com a metodologia DRES, e foi concordante com os diferentes manejos, porém no nível de significância de 7%. Essa enzima se mostrou sensível ao diferenciar sistemas de manejo (BALOTA et al., 2004) e se correlacionou com teor de COT do solo e com a produtividade das culturas (LOPES et al., 2013), mostrando-se promissora no monitoramento da QS em solos tropicais (MENDES et al., 2019). Recomenda-se, em concordância com a metodologia da bioanálise do solo (MENDES et al., 2018), o uso dessa enzima no monitoramento da saúde de solos agrícolas.

A atividade da urease também foi maior nas áreas com qualidade estrutural considerada “muito boa” e “ruim”; no caso das áreas “muito boas”, a maior atividade está relacionada com a melhor qualidade estrutural, como a maioria das amostras provenientes das áreas sob SPD e ILP. O maior aporte de biomassa vegetal e resíduos orgânicos nas áreas sob manejo conservacionista contribui para a maior atividade enzimática. Nas áreas com qualidade estrutural “ruim”, a maior atividade da urease está relacionada aos maiores valores de CBM (KLOSE; TABATABAI, 2000), sugerindo que, apesar de o solo apresentar visual degradação física pela indução da compactação ou pela desagregação promovida pela escarificação, isso ainda não refletiu na biomassa microbiana no curto prazo. Essa abordagem confirma a maior sensibilidade dos atributos bioquímicos em monitorar alterações na QS resultantes do manejo, apesar de, no caso do presente estudo, verificar-se alteração física imediata devido à indução da compactação e da escarificação.

Com base na análise discriminante canônica foi possível verificar que as áreas com qualidade estrutural “muito boa” se diferenciaram das demais e se relacionaram com as maiores atividades das enzimas arilsulfatase e urease, assim como com o teor de N-t, que está predominantemente na forma orgânica, enfatizando o papel chave da matéria orgânica na estrutura, na química e na biologia do solo (CUI; HOLDEN, 2015; SILVA et al., 2014; TUCHTENHAGEN et al., 2018; UTOBO; TEWARI, 2014).

As áreas com qualidade estrutural “boa” se relacionaram com a Ds e microporosidade. Boizard et al. (2017), Silva et al. (2014) e Zebalos et al. (2018) verificaram relação entre atributos físicos do solo e as avaliações visuais feitas pelo Perfil Cultural e DRES e; por Ball et al. (2015, 2017) e Tuchtenhagen et al. (2018) ao usarem o VESS. As áreas com “boa” qualidade estrutural também se correlacionaram com a RB e com o qCO_2 , em concordância com o observado por Cui e Holden (2015), devido à influência recíproca entre a estrutura e a atividade microbiana.

As áreas com pior qualidade estrutural (“ruim” e “muito ruim”) se posicionaram de forma oposta às áreas consideradas de melhor qualidade (“boa” e “muito boa”), demonstrando a capacidade do DRES em discriminar a qualidade estrutural do solo. Métodos visuais de análise da QS permitem inferir sobre a qualidade estrutural ou se correlacionar com atributos físicos (BOIZARD et al., 2017; JOHANNES et al., 2017), sendo necessários no monitoramento da QS, a fim de prever eventuais falhas no manejo a tempo de promover melhorias ou ajustes para manter a sustentabilidade dos sistemas produtivos (AON et al., 2001b).

As piores classes de qualidade estrutural (“ruim” e “muito ruim”) também se correlacionaram com os atributos microbiológicos CBM e $qMic$ e com a atividade da enzima celulase, e em oposição ao COT, N-t, arilsulfatase e urease, confirmando que o uso inadequado do solo reduz a atividade bioquímica, que resultam na perda da qualidade estrutural e funcional do solo. Esse efeito negativo é resultado de limitações na ciclagem do carbono (CUI e HOLDEN, 2015), que em longo prazo pode resultar na diminuição do COT do solo. Por sua vez, esses efeitos também são desfavoráveis à microbiota do solo, pois a degradação da estrutura também é desfavorável à comunidade microbiana (SILVA et al., 2014), o que pode resultar na diminuição da sustentabilidade do sistema de produção pela degradação física, biológica e, em longo prazo, química do solo.

Mais estudos com o intuito de verificar a correlação entre outros atributos físicos, químicos e biológicos com a metodologia DRES ajudarão a reforçar o potencial dessa ferramenta para inferir sobre importantes propriedades do solo e sua qualidade. Com base nos resultados aqui apresentados, o método DRES se apresenta como uma ferramenta integrativa, que pode representar não somente a qualidade estrutural, mas que também reflete a qualidade biológica do solo e permite inferir sobre a sustentabilidade dos sistemas de produção.

Conclusões

Os sistemas de manejo conservacionistas (Integração Lavoura Pecuária e Sistema Plantio Direto) proporcionaram melhor qualidade estrutural avaliada pelo DRES, e confirmada pelos atributos densidade do solo, microporosidade e porosidade total. ILP e SPD promoveram ambiente favorável à microbiota do solo, verificado por menores coeficientes metabólicos (qCO_2) e maiores quocientes microbianos ($qMic$), de forma oposta ao observado nos manejos envolvendo escarificação.

A compactação pelo tráfego de máquinas e a escarificação promoveram a degradação da qualidade estrutural, resultando em um ambiente desfavorável à microbiota do solo.

O índice de qualidade estrutural do solo obtido pelo Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) reflete a qualidade microbiológica e bioquímica do solo, demonstrando ser uma ferramenta integrativa útil no monitoramento da qualidade do solo sob diferentes manejos.

Referências do artigo A

ADETUNJI, A. T. et al. The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: A review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 3, p. 794–807, 2017.

ALEF, K. Soil Respiration. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (Eds.). **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. Academic Press, 1995. p. 214–218.

ANDERSON, T.; DOMSCH, K. H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 21, p. 471–479, 1989.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as

- ph, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, n. 3, p. 393–395, 1993.
- AON, M. A. et al. I. Spatio-temporal patterns of soil microbial and enzymatic activities in an agricultural soil. **Applied Soil Ecology**, v. 18, n. 3, p. 239–254, 2001.
- BALL, B. C. et al. The numeric visual evaluation of subsoil structure (SubVESS) under agricultural production. **Soil and Tillage Research**, v. 148, p. 85–96, 2015.
- BALL, B. C. et al. Visual soil evaluation: A summary of some applications and potential developments for agriculture. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 114–124, 2017.
- BALL, B. C.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. J. Field assessment of soil structural quality - A development of the Peerlkamp test. **Soil Use and Management**, v. 23, n. 4, p. 329–337, 2007.
- BALOTA, E. L. et al. Soil enzyme activities under long-term tillage and crop rotation systems in subtropical agro-ecosystems. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 35, n. 4, p. 300–306, 2004.
- BINI, D. et al. Effects of land use on soil organic carbon and microbial processes associated with soil health in southern Brazil. **European Journal of Soil Biology**, v. 55, p. 117–123, 2013.
- BOIZARD, H. et al. Developments in the “profil cultural” method for an improved assessment of soil structure under no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 92–103, 2017.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, v. 124, n. 1–2, p. 3–22, 2005.
- CARRIZO, M. E. et al. Aggregation agents and structural stability in soils with different texture and organic carbon contents. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 1, p. 75–82, 2015.
- CASTIONI, G. A. et al. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 301–309, 2018.
- CUI, J.; HOLDEN, N. M. The relationship between soil microbial activity and microbial biomass, soil structure and grassland management. **Soil and Tillage Research**, v. 146, p. 32–38, 2015.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, p. 201–214, 2004.
- DICK, R. P.; BREACKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: SSSA, 1996. p. 247–271.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA, 1994. p. 1–20.

FAGOTTI, D. S. L. et al. Gradients in N-cycling attributes along forestry and agricultural land-use systems are indicative of soil capacity for N supply. **Soil Use and Management**, v. 28, n. 3, p. 292–298, 2012.

GUIMARÃES, R. M. L. et al. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p. 92–99, 2013.

HÉNIN, S. et al. **Le profil cultural: Principes de physique du sol**. Paris: Masson, 1960.

IUSS WORKING GROUP WRB. **World Reference Base for Soil Resources 2014**, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 2015.

JIAO, X. et al. Effects of slow-release urea fertilizers on urease activity, microbial biomass, and nematode communities in an aquic brown soil. **Science in China Series C: Life Sciences**, v. 48, n. S1, p. 26–32, 2005.

JOHANNES, A. et al. To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure? **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 24–32, 2017.

KLOSE, S.; TABATABAI, M. A. Urease activity of microbial biomass in soils as affected by cropping systems. **Biology and Fertility of Soils**, v. 31, n. 3–4, p. 191–199, 2000.

LOPES, A. A. D. C. et al. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon soil biology & biochemistry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 2, p. 461–472, 2013.

MANN, C. et al. Relationships between field management, soil health, and microbial community composition. **Applied Soil Ecology**, v. 144, p. 12–21, 2019.

MCCARTY, G. W.; SHOGREN, D. R.; BREMNER, J. M. Regulation of urease production in soil by microbial assimilation of nitrogen. **Biology and Fertility of Soils**, v. 12, n. 4, p. 261–264, 1992.

MENDES, I. C. et al. **Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo**. Circular técnica 38. Embrapa Cerrados, 2018.

MENDES, I. C. et al. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, v. 139, p. 85–93, 2019.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R Foundation for Statistical Computing**. Vienna: Austria, 2014.

- RABOT, E. et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122–137, 2018.
- RALISCH, R. et al. Morphostructural characterization of soil conventionally tilled with mechanized and animal traction with and without cover crop. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1795–1802, 2010.
- RALISCH, R. et al. **Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo - DRES**. Documentos 390. Londrina: Embrapa Soja, 2017.
- REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009.
- SALTON, J. C. et al. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 70–79, 2014.
- SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SCHINNER, F.; VON MERSI, W. Xylanase-, CM-cellulase- and invertase activity in soil: An improved method. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 22, n. 4, p. 511–515, 1990.
- SILVA, A. P. DA et al. Soil structure and its influence on microbial biomass in different soil and crop management systems. **Soil and Tillage Research**, v. 142, p. 42–53, 2014.
- SOIL SURVEY STAFF. **Soil Taxonomy - a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys**. 2 nd ed. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, 1999.
- STIRZAKER, R. J.; PASSIOURA, J. B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. **Plant and Soil**, v. 185, n. 1, p. 151–162, 1996.
- TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America, Proceedings**, v. 34, p. 225–229, 1970.
- TAVARES FILHO, J. et al. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 393–399, 1999.
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análises de solo**. 3ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.
- TUCHTENHAGEN, I. K. et al. Visual evaluation of the soil structure under different management systems in lowlands in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, n. e0170270, 2018.
- UTOBO, E. B.; TEWARI, L. Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 13, n. 1, p. 147–169, 2014.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703–707, 1987.

WILLIAMS, A. et al. A regionally-adapted implementation of conservation agriculture delivers rapid improvements to soil properties associated with crop yield stability. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 2018.

ZEBALOS, C. H. et al. Soil structural quality in pasturelands in the city of Buritis (RO), Brazil. **Revista Científica FAEMA**, v. 9, n. 1, p. 245, 2018.

5 ARTIGO B - RELAÇÃO ENTRE QUALIDADE ESTRUTURAL E ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO ARENOSO SOB DIFERENTES USOS

Resumo

A manutenção da qualidade física, química e biológica de solos arenosos e a sustentabilidade dos sistemas de produção é um desafio em regiões tropicais, agravado pelo baixo teor de matéria orgânica, associado ao monocultivo. Esses solos são predominantemente ocupados por pastagens em situação de degradação, de modo que a Integração Lavoura Pecuária pode ser uma alternativa para recuperação dessas áreas. O objetivo desse estudo foi avaliar a qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho arenoso sob diferentes usos e relacioná-la com indicadores microbiológicos e bioquímicos de qualidade do solo. Cinco usos do solo foram avaliados: Integração Lavoura Pecuária (ILP) na fase lavoura (soja), ILP na fase pastagem (*Megathyrus maximus*), pastagem degradada (*Paspalum notatum* + *Urochloa decumbens*), monocultivo (cana-de-açúcar, *Saccharum* spp.) e uma área de mata nativa (fragmento secundário de Mata Atlântica) como referência. A qualidade estrutural foi avaliada pelo Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES), além dos atributos: carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total, carbono da biomassa microbiana, respiração basal e a atividade enzimática (arilsulfatase, β -glucosidase, celulase, fosfatase ácida, L-glutaminase e urease). A área sob ILP na fase pastagem apresentou qualidade estrutural e COT semelhantes aos da mata nativa, além de maior atividade microbiana e enzimática em relação aos demais usos do solo. A ILP foi estratégia eficiente na melhoria da qualidade de solos arenosos. O monocultivo com cana-de-açúcar e a pastagem degradada reduziram os atributos físicos, químicos, microbiológicos e bioquímicos relativos à qualidade do solo. A melhoria dos processos biológicos foi acompanhada pela melhoria da qualidade estrutural do solo. O DRES permitiu diferenciar a qualidade estrutural do solo sob diferentes usos e refletiu as condições microbiológicas e bioquímicas, demonstrando ser ferramenta integrativa útil no monitoramento da qualidade de solo arenoso.

Palavras-chave: Integração Lavoura Pecuária, cana-de-açúcar, pastagem degradada, Sistema Plantio Direto, enzimas do solo, Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES).

RELATIONSHIP AMONG STRUCTURAL QUALITY AND MICROBIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL ATTRIBUTES IN A SANDY OXISOL UNDER DIFFERENT LAND USES

Abstract

The maintenance of physical, chemical and biological quality of sandy soils and the sustainability of the cropping systems is a challenge in the tropics, and is worsened due to the low levels of soil organic matter, in addition to monoculture. These soils are often occupied by degraded pastures, so that the Crop Livestock Integration System can be an alternative for recovery of degraded pastures in sandy soils, improving their quality. The aim of this study was to assess the structural quality of a sandy Rhodic Hapludox under different uses and correlate with microbiological and biochemical attributes of soil quality. Five land uses were assessed: Crop Livestock Integration (CLI) in the crop phase (soybean); CLI in the pasture phase (*Megathyrsus maximus*); degraded pasture (*Paspalum notatum* + *Urochloa decumbens*); monoculture (sugarcane, *Saccharum* spp.); and a native forest (a secondary fragment of Atlantic Forest) as reference. The structural quality was assessed with the Rapid Soil Structure Diagnosis (DRES, from Portuguese) method, in addition to: total soil organic C (TOC) and total N, microbial biomass, basal respiration and soil enzyme activities (arylsulphatase, β -glucosidase, cellulase, acid phosphatase, L-glutaminase, and urease). The area under CLI in the pasture phase showed structural quality and TOC similar to the native forest fragment, in addition to higher microbial and enzyme activities compared with the other soil uses. The CLI was an efficient strategy for improving the quality of sandy soils. Monoculture with sugarcane and degraded pasture reduced the physical, chemical, microbiological and biochemical attributes related to soil quality. The improvement of biological processes was followed by an improvement in the soil structural quality. The DRES method allowed to discriminate the soil structural quality and reflected the microbiological and biochemical conditions, proving to be a useful integrative tool for monitoring the quality of sandy soil.

Keywords: Crop Livestock Integration, sugarcane, degraded pasture, No-Till System, soil enzymes, Rapid Soil Structure Diagnosis (DRES).

Introdução

A qualidade do solo (QS) engloba atributos físicos, químicos e biológicos que se interrelacionam e são influenciados pelo uso e manejo (OBADE, 2019). Os atributos microbiológicos e bioquímicos têm se revelado sensíveis indicadores da QS, e de mais rápida resposta quando comparados aos químicos e físicos (BABUJIA et al., 2014; CARDOSO et al., 2013).

A atividade de enzimas envolvidas nos ciclos biogeoquímicos é um dos principais indicadores de QS devido sua grande sensibilidade a mudanças no ambiente (BŁOŃSKA; LASOTA; ZWYDAK, 2017). A atividade enzimática ainda se correlaciona com a qualidade da estrutura e com perturbações físicas do solo, como o revolvimento (UTOBO; TEWARI, 2014). A análise de determinadas enzimas tem sido recentemente proposta como complemento às tradicionais análises químicas e físicas, por refletir a “memória” do uso do solo (MENDES et al., 2019). Assim, a análise enzimática permite interpretar como o componente biológico pode favorecer o potencial produtivo de uma cultura, permitindo uma análise mais abrangente sobre os efeitos do uso e manejo do solo.

Geralmente, os indicadores de QS, principalmente os físicos, não apresentam uma boa performance na caracterização de solos arenosos, muitas vezes considerados impróprios quanto à capacidade de uso para culturas de grãos (ARTHUR et al., 2011). Entretanto, a qualidade estrutural do solo é um aspecto central na sustentabilidade dos agroecossistemas (LEHMANN; ZHENG; RILLIG, 2017), apresentando relação recíproca com a atividade microbiana do solo. Sendo assim, uma boa qualidade estrutural favorece a atividade microbiana, enquanto que a comunidade microbiana ativa contribui para a qualidade estrutural (CUI; HOLDEN, 2015).

Avaliações visuais da QS englobam diversas características e processos de degradação, podem ser realizadas no campo, não demandam treinamento prolongado ou equipamentos específicos, e os resultados são rápidos e prontamente disponíveis (JOHANNES et al., 2017). O Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) (RALISCH et al., 2017) é uma metodologia fundamentada no Perfil Cultural (BOIZARD et al., 2017; HÉNIN et al., 1960; TAVARES FILHO et al., 1999), adaptada às condições tropicais e que permite rápida e fácil identificação dos efeitos do uso e manejo nas condições estruturais. A ferramenta facilita a tomada de decisão quanto às ações de correção ou melhoria da qualidade do manejo de áreas

agrícolas (RALISCH et al., 2017).

Uso e manejo inadequados do solo, como o revolvimento excessivo, o baixo aporte de material orgânico e a baixa diversificação de culturas, reduzem a atividade microbiana e promovem impactos negativos à estrutura (CUI; HOLDEN, 2015). O favorecimento à atividade microbiana também permite a estabilização de agregados do solo por meio de exopolissacarídeos microbianos e hifas de fungos filamentosos, que auxiliam na formação de microagregados (CARRIZO et al., 2015; SHER et al., 2019). Por sua vez, a formação de microagregados favorece a formação de microssítios, os quais servem de abrigo à comunidade microbiana (TOTSCHKE et al., 2018). Além disso, a modificação da estrutura altera os fluxos e armazenamento de água e gases, fundamentais para o desenvolvimento da microbiota. Efeitos indiretos, como a produção de fitomassa e o aporte de resíduos vegetais, influenciados pelas condições de qualidade ou degradação dos solos, influenciarão a atividade microbiana.

É preciso enfatizar que o carbono orgânico é componente chave que interfere em todos atributos do solo. Dessa forma, sistemas de produção mais complexos e diversificados, com maior aporte de carbono orgânico favorecem as interações entre os atributos do solo que resultam em melhoria da qualidade estrutural, maior eficiência do uso de nutrientes pelas plantas, assim como maior diversidade e atividade da microbiota, resultando em um sistema mais resiliente (SALTON et al., 2014).

A intensificação do uso do solo por meio de sistemas de Integração Lavoura Pecuária (ILP), cultivados sob Sistema Plantio Direto, aumenta a rentabilidade e a sustentabilidade da produção agrícola (BARTH NETO et al., 2014; MOREIRA et al., 2018). Essa estratégia tem sido usada para reduzir o processo de degradação ou recuperar pastagens degradadas, resultando em sistemas agronomicamente e ambientalmente mais eficientes e sustentáveis (SALTON et al., 2014), sendo promissora sobretudo para solos arenosos (DONAGEMMA et al., 2016).

Dada à importância da estrutura do solo, bem como da promissoria da ILP como sistema conservacionista em solos arenosos, o objetivo desse trabalho foi avaliar a qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho arenoso sob diferentes usos por meio do DRES e relacioná-la com atributos microbiológicos e bioquímicos de qualidade do solo.

Material e Métodos

Descrição das áreas

As avaliações foram realizadas em áreas agrícolas localizadas no município de Jardim Olinda, PR (23°32'59"S e 52°03'11"O), e altitude de 321 m. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS et al., 2018), correspondente ao Rhodic Hapludox (SOIL SURVEY STAFF, 1999) e ao Rhodic Ferralsol (IUSS, 2014), de textura arenosa, com teores entre 713 e 828 g kg⁻¹ de areia, 28 e 57 g kg⁻¹ de silte e 134 e 229 g kg⁻¹ de argila. O relevo é suave ondulado, com declividade inferior a 5%. O clima da região é classificado como Aw, tropical com inverno seco, de acordo com a classificação de Köppen.

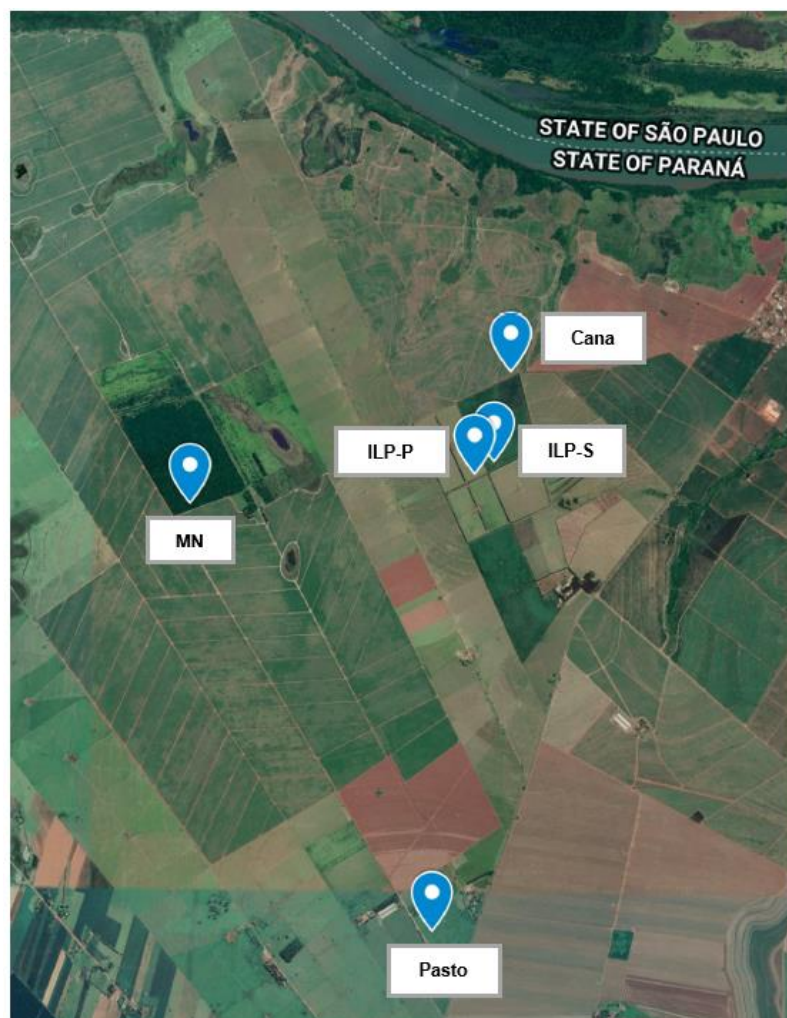
Foram avaliadas cinco áreas sob diferentes usos do solo: ILP em fase lavoura (ILP - Soja), ILP em fase pastagem (ILP - Pastagem), pastagem degradada, monocultivo de cana-de-açúcar (Cana) e fragmento de mata nativa (MN), usada como referência (Tabela 1; Figura 1). A caracterização química do solo das áreas avaliadas é apresentada na Tabela 2.

Tabela 1. Descrição dos usos do solo nas áreas avaliadas em Latossolo Vermelho arenoso em Jardim Olinda, PR, novembro de 2018.

Uso do solo	Coordenadas geográficas	Altitude	Histórico de manejo
Pastagem - ILP (<i>Megathyrsus maximus</i> cv. Mombaça, com três anos de implantação)	22°33'36"S 52°03'50"O	330 m	Área manejada há 18 anos em sistema de ILP em SPD, intercalando três anos com pastagem de <i>Urochloa brizantha</i> e três anos com soja no verão e milho segunda safra consorciado com <i>Urochloa ruziziensis</i> . Amostragem realizada no terceiro ano de implantação de <i>M. maximus</i> .
Soja - ILP	22°33'49"S 52°03'45"O	332 m	Área manejada há 18 anos em sistema de ILP, intercalando três anos com pastagem de <i>Urochloa brizantha</i> e três anos com soja no verão e milho segunda safra consorciado com <i>Urochloa ruziziensis</i> . Amostragem realizada no terceiro ano de implantação da soja.
Pastagem degradada	22°36'03"S 52°04'04"O	373 m	Área sob pastagem perene, formada com <i>Urochloa decumbens</i> e <i>Paspalum notatum</i> (este como planta invasora), implantada há 30 anos, sem adubação de manutenção e com

			pastejo contínuo, sem ajuste de lotação e sem controle de plantas daninhas.
Cana-de-açúcar	22°33'24"S 52°03'39"O	312 m	Área sob cana há 10 anos, anteriormente ocupada com pastagem degradada com <i>Urochloa decumbens</i> e <i>Paspalum notatum</i> . A avaliação foi realizada quando as plantas apresentavam 1.5 m de altura, após o quarto corte, com despalha a fogo para a colheita.
Mata nativa	22°34'01"S 52°05'20"O	332 m	Fragmento secundário de Mata Atlântica, sem intervenção antrópica.

Figura 1. Mapa de localização das áreas amostradas para avaliação da qualidade do solo em Jardim Olinda, PR, em novembro de 2018.



Legenda: MN – Mata Nativa, Pasto – Pastagem degradada, ILP - P – Integração Lavoura Pecuária fase pastagem, ILP – S - Integração Lavoura Pecuária fase soja, Cana – monocultivo de cana-de-açúcar.

Amostragem e análises de solo

A amostragem e a avaliação da qualidade estrutural foram realizadas em novembro de 2018, para cada uso, em um raio de 500 m do ponto indicado na Figura 1, apresentando relevo e condições edafoclimáticas semelhantes. Foram coletadas 10 amostras compostas por área, obtidas a 0-0,10 m de profundidade, para determinação dos atributos químicos, microbiológicos e bioquímicos do solo. Foram delimitados aleatoriamente 10 transectos de 5 x 25 m em cada uso e manejo do solo, ao longo dos quais foram obtidas as 12 subamostras deformadas simples com auxílio de trado holandês. Na posição central de cada transecto foi retirado um monólito para avaliação da qualidade estrutural pelo DRES (RALISCH et al., 2017).

A qualidade estrutural foi avaliada em 10 repetições (monólitos) por uso e manejo do solo, a 0-0,25 m de profundidade. As características são avaliadas por camada, quando existentes, e o índice de qualidade estrutural (IQES) é obtido pela média ponderada dos escores de cada camada. O escore da amostra do DRES varia entre 1 (qualidade estrutural muito ruim) a 6 (qualidade estrutural muito boa). As médias dos atributos químicos, microbiológicos e bioquímicos em cada repetição foram então agrupadas de acordo com as classes de interpretação do IQES segundo a metodologia: muito ruim (1,0 a 1,9), ruim (2,0 a 2,9), regular (3,0 a 3,9), boa (4,0 a 4,9) e muito boa (5,0 a 6,0).

O carbono orgânico total (COT), C solúvel e N total foram determinados por combustão seca em analisador Organic Elemental Analyzer, Thermo Scientific, modelo Flash 2000. As demais análises químicas foram realizadas segundo Teixeira et al. (2017). Os atributos microbiológicos avaliados foram: carbono e nitrogênio da biomassa microbiana (CBM e NBM, respectivamente) extraídos pelo método de fumigação-extração (VANCE; BROOKES; JENKINSON, 1987); e respiração basal (RB) (ALEF, 1995), sendo calculados os quocientes microbiano (q_{Mic}) pela razão entre CBM e COT (ANDERSON; DOMSCH, 1989) e o quociente metabólico (q_{CO_2}), pela relação entre respirometria e CBM.

Quanto aos atributos bioquímicos, foram determinadas as atividades de enzimas envolvidas na ciclagem do S: arilsulfatase (TABATABAI; BREMNER, 1970); do C: β -glucosidase (EIVAZI; TABATABAI, 1988), celulase (SCHINNER; VON MERSI, 1990); do P: fosfatase ácida (TABATABAI; BREMNER, 1969); e do N: L-glutaminase (FRANKENBERGER; TABATABAI, 1991) e urease (DICK; BREACKWELL; TURCO, 1996).

Tabela 2. Caracterização química de um Latossolo Vermelho arenoso a 0-0,10 m de profundidade sob diferentes usos: ILP em fase soja, ILP em fase pastagem, pastagem degradada, monocultivo de cana-de-açúcar e mata nativa constituída por fragmento secundário de Floresta Atlântica . Jardim Olinda, PR, novembro de 2018.

Uso do solo	Areia	COT	N-t	P	pH	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC	V	S-SO ₄	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- g kg ⁻¹ -----			mg dm ⁻³	em CaCl ₂			----- cmol _c dm ⁻³ -----				%						-----mg dm ⁻³ -----
ILP – Soja	758,5	13,3	1,6	12,6	5,7	2,4	0,0	2,1	0,7	0,2	5,4	56	2,9	0,1	1,5	125	56	3,2
ILP - Pastagem	713,0	14,8	1,8	13,5	5,9	2,3	0,0	2,4	1,1	0,2	6,0	62	4,0	0,1	1,3	110	57	3,1
Pastagem degradada	828,5	9,34	1,1	19,1	5,2	2,5	0,0	1,4	0,7	0,1	4,8	47	2,3	0,1	0,8	37	52	4,8
Cana-de-açúcar	801,5	6,77	0,6	16,5	5,4	2,3	0,0	1,3	0,6	0,1	4,4	46	2,3	0,2	1,7	54	59	2,8
Mata nativa	777,5	13,5	2,0	6,5	4,2	4,4	0,2	1,5	0,5	0,1	6,5	33	5,7	0,3	0,8	64	57	1,2

Éxtratores: B = Água Quente; S-SO₄²⁻ = Fosfato monocalcico; P, K, Cu, Fe, Mn, Zn = Mehlich 1; Ca, Mg, Al = KCl 1M; H+Al = SMP; pH = CaCl₂ 0,01 M; (COT e N-t: Carbono orgânico total e Nitrogênio Total – análise por combustão seca em analisador TOC); CTC: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases.

Análises estatísticas

Realizou-se a verificação dos pressupostos de normalidade, homogeneidade da variância dos resíduos e homocedasticidade previamente à análise de variância (ANAVA). Quando os pressupostos não foram atendidos, os dados foram transformados em $\ln(x+1)$, antes da análise, considerando um delineamento inteiramente casualizado. As médias de cada variável foram comparadas pelo teste de Scott-Knott, verificando-se o valor individual de p .

As variáveis independentes também foram submetidas à análise de correlação de Pearson, obtendo-se os respectivos coeficientes de correlação e níveis de significância. Por meio de análise discriminante canônica, buscou-se identificar diferenças entre os diferentes usos do solo, bem como quais atributos mais contribuíram para discriminar as formas de uso (BARETTA et al., 2005). Todas as análises foram realizadas no software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014).

Resultados

Índice de qualidade estrutural do solo (IQES) obtido pelo DRES

O IQES da área sob ILP na fase pastagem (ILP – Pastagem) foi semelhante à da mata nativa (MN) (Tabela 3), ressaltando-se que a presença de agregados estruturados favoráveis (entre 1 e 4 cm) foi maior na área de pastagem, demonstrando a contribuição benéfica do sistema conservacionista ILP na agregação de solos arenosos (Figura 2). Foi constatada a presença abundante de raízes da forrageira nas amostras das áreas de ILP - Pastagem, indicando ambiente favorável ao desenvolvimento radicular e seus efeitos benéficos na estrutura. A área cultivada sob ILP na fase soja (ILP – Soja) apresentou qualidade estrutural inferior à MN e ao ILP - Pastagem, porém superior à pastagem degradada e ao monocultivo de cana-de-açúcar.

Atributos químicos e microbiológicos do solo

A área sob ILP na fase pastagem foi semelhante à MN quanto aos atributos COT, N-t, CBM e NBM, e ambas foram superiores às áreas com cana-de-açúcar e pastagem degradada (Tabela 3). Na área de ILP – Soja, essas variáveis apresentaram valores quase sempre próximos à MN e ILP - Pastagem e na maioria das vezes superiores à pastagem degradada e ao monocultivo de cana-de-açúcar.

Maior teor de C solúvel foi observado nas áreas da MN e ILP-soja, sendo que a pastagem degradada apresentou o menor valor para essa variável.

A maior RB foi observada na área de ILP – Pastagem, seguida da área de ILP – soja e MN, ao passo que o monocultivo de cana e a pastagem degradada apresentaram as menores taxas respiratórias, revelando menor atividade da microbiota (Tabela 3). O menor $q\text{CO}_2$ foi observado na área de MN, demonstrando maior eficiência metabólica da comunidade microbiana. Em relação à área de ILP – Pastagem, essa se destacou das demais, apresentando RB 89% superior à MN. O $q\text{Mic}$ das áreas sob ILP, tanto na fase pastagem quanto na fase soja, foi menor do que nas demais áreas, incluindo a MN.



Figura 2. Qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho arenoso pelo Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES), a 0-0,25 m de profundidade, em área de a) Integração Lavoura Pecuária na fase soja, b) Integração Lavoura Pecuária na fase pastagem, c) Pastagem degradada, d) Monocultivo de cana-de-açúcar e, e) Mata nativa. Jardim Olinda, PR, novembro, 2018. Foto: O autor.

Tabela 3. Índice de qualidade estrutural (IQES) determinado pelo Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) e atributos químicos e microbiológicos de um Latossolo Vermelho arenoso, a 0-0,10 m de profundidade, sob diferentes usos. Jardim Olinda, PR, novembro de 2018.

Uso do solo	IQES	Qualidade estrutural ⁽¹⁾	COT	N-t ⁽²⁾	C solúvel	CBM	NBM ⁽²⁾	RB	qCO ₂ ⁽²⁾	qMic ⁽²⁾
			g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	----- µg dia ⁻¹ g ⁻¹ -----	µg CO ₂ -C mg ⁻¹ solo dia ⁻¹	µg C-CO ₂ mg ⁻¹ CBM h ⁻¹	%		
ILP - Soja	4,6	Boa	13,3 a	1,6 a	262 a	375 b	37,7 ^{ns}	29,9 b	3,70 b	2,85 b
ILP - Pastagem	5,8	Muito boa	14,8 a	1,8 a	238 b	458 a	32,6	55,6 a	5,20 a	3,14 b
Pastagem degradada	2,4	Ruim	9,34 b	1,1 b	220 c	331 b	33,3	24,3 c	3,12 b	3,88 a
Cana-de-açúcar	2,4	Ruim	6,77 c	0,6 c	240 b	275 c	41,0	21,7 c	3,60 b	4,18 a
Mata Nativa	6,0	Muito boa	13,5 a	2,0 a	266 a	488 a	35,3	29,4 b	2,60 b	3,66 a
<i>p-valor</i>	-		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,87	<0,001	<0,001	0,04
CV%	8,93		18,7	23,1	5,5	19,9	54,5	12,3	26,1	29,3

Médias seguidas de letras diferentes, na coluna, diferem pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. ⁽¹⁾ Classe de interpretação do índice de qualidade estrutural do solo avaliado pelo DRES (Ralisch et al., 2017). ⁽²⁾ Dados analisados após transformação para logaritmo natural para comparação de médias.

Tabela 4. Índice de qualidade estrutural (IQES) determinado pelo Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) e atividade enzimática de um Latossolo Vermelho arenoso, a 0-0,10 m de profundidade, sob diferentes usos. Jardim Olinda, PR, novembro de 2018.

Uso do solo	IQES	Qualidade estrutural ⁽¹⁾	Arilsulfatase	β-Glucosidase	Fosfatase ácida	Celulase	L-Glutaminase	Urease
			----- µg p-nitrofenol g ⁻¹ h ⁻¹ -----	µg glicose g ⁻¹ h ⁻¹	----- µg N-NH ₄ ⁺ g ⁻¹ h ⁻¹ -----			
ILP - Soja	4,6	Boa	490 b	181 b	626 b	22,8 a	683 b	88,5 a
ILP - Pastagem	5,8	Muito boa	521 a	203 a	658 a	25,9 a	955 a	82,6 a
Pastagem degradada	2,4	Ruim	459 c	148 c	582 c	20,3 b	464 c	66,6 b
Cana	2,4	Ruim	404 d	133 d	452 d	7,6 c	218 d	54,7 b
Mata	6,0	Muito boa	499 b	149 c	582 c	19,4 b	94 e	71,9 b
<i>p-valor</i>	-		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
CV%	8,93		3,8	5,3	4,3	20,2	27,5	22,4

Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Atividade bioquímica do solo

A área de ILP - Pastagem apresentou atividade enzimática superior às demais áreas (Tabela 4), inclusive superior à área de referência sob fragmento de floresta nativa. A área de ILP - Soja também apresentou maior atividade enzimática que a área referência (MN), a pastagem degradada e a cana, exceto para a arilsulfatase, em que a atividade foi semelhante à MN.

Relação entre o IQES e a qualidade microbiológica e bioquímica do solo

Houve correlação positiva e significativa entre o IQES e os teores de COT e de N-t do solo. A qualidade estrutural também se correlacionou significativa e positivamente com o CBM, a RB e a atividade das enzimas arilsulfatase, celulase, β -glucosidase e fosfatase (Tabela 5), indicando concordância entre a qualidade estrutural e a atributos microbiológicos e bioquímicos.

Tabela 5. Coeficiente de correlação de Pearson entre o índice de qualidade estrutural (IQES) determinado pelo Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) e atributos microbiológicos, bioquímicos e químicos de um Latossolo Vermelho arenoso, a 0-0,10 m de profundidade, sob diferentes usos. Jardim Olinda, PR, novembro de 2018.

Atributo	CBM	NBM	RB	Aryl	Cel	β -glu	Fosf	L-Glu	Ure	COT	N-t
IQES	0,69 ***	-0,06 ns	0,52 ***	0,77 ***	0,54 ***	0,59 ***	0,63 ***	0,23 ns	0,43 **	0,74 ***	0,76 ***
Areia	-0,47 ***	0,05 ns	-0,78 ***	-0,67 ***	-0,51 ***	-0,84 ***	-0,61 ***	-0,63 ***	-0,44 ***	-0,66 ***	-0,52 ***
CBM		0,18 ns	0,42 **	0,61 ***	0,48 ***	0,39 **	0,51 ***	0,06 ns	0,17 ns	0,63 ***	0,65 ***
NBM			0,01 ns	-0,08 ns	-0,05 ns	-0,04 ns	-0,05 ns	-0,09 ns	-0,14 ns	-0,04 ns	0,02 ns
RB				0,57 ***	0,53 ***	0,74 ***	0,58 ***	0,64 ***	0,30 *	0,47 ***	0,35 **
Aryl					0,71 ***	0,75 ***	0,88 ***	0,51 ***	0,51 ***	0,79 ***	0,85 ***
Cel						0,73 ***	0,84 ***	0,63 ***	0,42 **	0,60 ***	0,58 ***
β-glu							0,83 ***	0,84 ***	0,48 ***	0,62 ***	0,53 ***
Fosf								0,67 ***	0,51 ***	0,68 ***	0,71 ***
L-Glu									0,40 **	0,35 **	0,22 ns
Ure										0,41 **	0,39 **
COT											0,82 ***

CBM: Carbono da Biomassa Microbiana; NBM: Nitrogênio da Biomassa Microbiana; RB: Respiração Basal; Aryl: Arilsulfatase; Cel: Celulase; β -Glu: β -Glucosidase; Fosf: Fosfatase ácida; Gluta: L-Glutaminase; Ure: Urease; COT: Carbono Orgânico Total do solo; Nt: N total do solo.

Coeficientes de correlação significativos a $p \leq 0,05$ (*), $\leq 0,01$ (**), $\leq 0,001$ (***). Foram destacadas as correlações consideradas moderadas e fortes ($r > 0,50$).

A análise discriminante canônica por classe de qualidade estrutural explicou 96,2% da variação (Tabela 6; Figura 3). Houve agrupamento das áreas com qualidade estrutural “muito ruim”, “ruim” e “regular”, compostas pelas áreas de monocultivo de cana-de-açúcar e de pastagem degradada. Os usos do solo que resultaram em pior qualidade estrutural se relacionaram unicamente com o atributo microbiológico q_{Mic} , sendo opostos aos demais atributos avaliados no estudo. Houve ainda convergência dos atributos microbiológicos (notadamente da CBM e RB) com áreas de melhor qualidade estrutural, correspondentes ao sistema conservacionista ILP – pastagem e área referência sob mata nativa (MN).

Tabela 6. Coeficientes canônicos padronizados referentes à análise discriminante canônica com base nas diferentes classes de qualidade estrutural, considerando atributos microbiológicos, bioquímicos e químicos de um Latossolo Vermelho arenoso, a 0-0,10 m de profundidade, sob diferentes usos. Jardim Olinda, PR, novembro de 2018.

Atributo do solo	Can1 (85,8%)	Can2 (10,4%)
<i>Atributos microbiológicos</i>		
Carbono da Biomassa Microbiana (CBM)	0,214	0,520
Quociente microbiano (q_{Mic})	0,099	0,165
Respiração Basal (RB)	-0,753	-2,087
Quociente metabólico (q_{CO_2})	-0,226	0,064
<i>Atributos bioquímicos</i>		
Arilsulfatase (Aryl)	-0,097	-0,503
Celulase (Cell)	0,435	0,018
B-Glucosidase (BGlu)	-1,961	0,684
Fosfatase ácida (Fosf)	1,013	0,809
L-Glutaminase (Gluta)	-0,566	-0,512
Urease (Ure)	-0,166	0,494
<i>Atributos químicos</i>		
Carbono Orgânico Total (COT)	-0,226	0,413
Nitrogênio Total (N)	-0,068	-0,024
pH	1,704	0,645
CTC	-0,977	-0,074
R ²	0,922*	0,590
<i>p-value</i>	< 0,0001	0,14
Autovalor	11,847	1,443

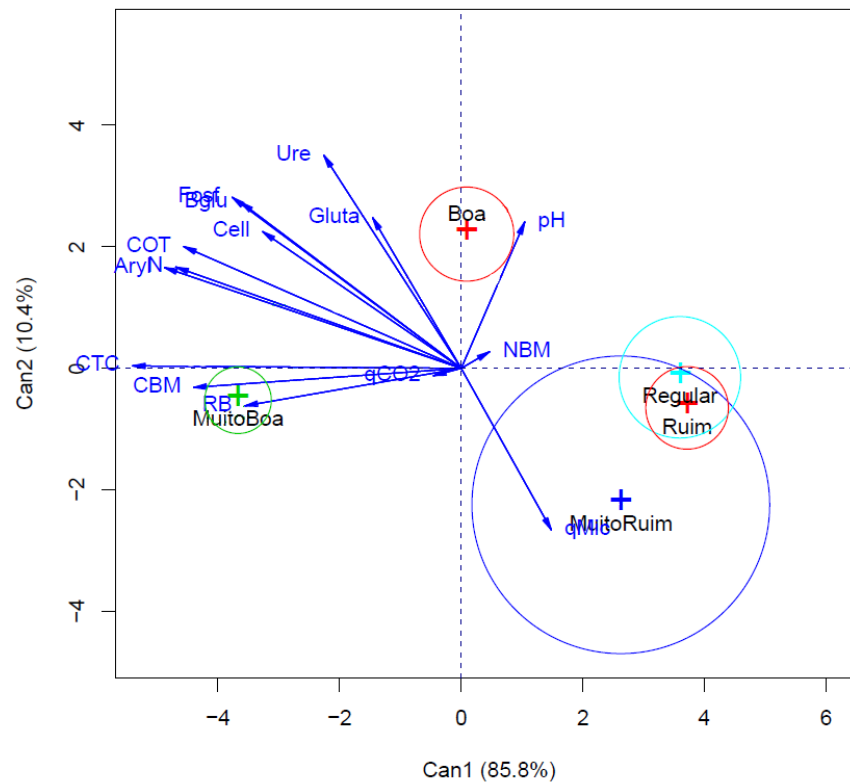


Figura 3. Relação entre as diferentes classes de qualidade estrutural, considerando atributos microbiológicos, bioquímicos e químicos de um Latossolo Vermelho arenoso, a 0-0,10 m de profundidade, sob diferentes usos. Jardim Olinda, PR, novembro de 2018.

CBM: Carbono da Biomassa Microbiana; NBM: Nitrogênio da Biomassa Microbiana; RB: Respiração Basal; Aryl: Arilsulfatase; Cell: Celulase; BGluc: β -Glucosidase; Fosf: Fosfatase ácida; Gluta: L-Glutaminase; Ure: Urease; COT: Carbono Orgânico Total; N: N total

Discussão

Solos sob fragmentos florestais nativos são usados como referência de qualidade nas regiões tropicais devido à sua atividade, diversidade microbiana, e teor de matéria orgânica (MO), sendo considerados autossustentáveis (GONZAGA et al., 2016; NOGUEIRA et al., 2006), assim também podem ser usados como referência de qualidade estrutural pelas metodologias DRES (RALISCH et al., 2017) e Perfil Cultural (BOIZARD et al., 2017; TAVARES FILHO et al., 1999). A área de ILP - Pastagem foi a única que se assemelhou à MN em relação à qualidade estrutural. Por sua vez, a área sob ILP cultivada com soja apresentou qualidade estrutural inferior à MN e à ILP - Pastagem, porém superior à pastagem degradada e à área sob monocultivo de cana. O manejo conservacionista em ILP com a presença de forrageira

tropical proporciona não apenas melhor qualidade biológica, mas também melhor qualidade física ao solo (NASCIMENTO et al., 2019), aproximando dos atributos físicos encontrados em áreas de referência, como resultado da melhoria da QS, corroborando Salton et al. (2014) e Silva et al. (2014).

Os resultados de qualidade estrutural obtidos fundamentam a indicação de alternar o cultivo de soja com pastagem perene em solos arenosos. Constatou-se que o cultivo de soja por três safras, intercalada com milho segunda safra consorciado com *Urochloa ruziziensis*, resultou na redução da qualidade estrutural do solo comparativamente à pastagem perene. Assim, ficou evidente a grande contribuição da pastagem perene bem manejada na estruturação do solo de textura arenosa. Essa informação é fundamental no delineamento de modelos de sistemas produtivos para solos arenosos.

A qualidade estrutural foi negativamente correlacionada com o teor de areia, corroborando Behrends Kraemer et al. (2017) ao correlacionarem esse atributo do solo com os escores de VESS (*Visual Evaluation of Soil Structure*) (BALL; BATEY; MUNKHOLM, 2007). A granulometria exerce influência determinante em outros atributos da QS como MO e agregação (MANN et al., 2019). Em geral, quanto maior o teor de areia, pior a qualidade não apenas química e biológica, mas também a qualidade estrutural. Sendo assim, práticas conservacionistas que resultem em melhoria da qualidade estrutural em solo arenoso, como o sistema ILP, devem ser priorizadas e difundidas, uma vez que esses solos são altamente suscetíveis à degradação se usados e manejados de forma inadequada.

A qualidade estrutural avaliada pelo DRES se correlacionou significativa e positivamente com os atributos microbiológicos COT, CBM, RB e a atividade enzimática do solo. Cui e Holden (2015) também verificaram correlação positiva entre qualidade estrutural (avaliada pelo VESS) e os atributos COT e atividade enzimática. Entretanto, a ferramenta não teve relação com o CBM, diferente do verificado no presente estudo, em que a qualidade estrutural também foi fortemente correlacionada com o CBM.

As áreas sob ILP (fase soja ou pastagem) apresentaram COT e N-t semelhantes à MN. A MO é o indicador de QS mais importante para quase todos os solos do mundo, pois permeia entre os demais indicadores, sendo considerada um indicador chave (LOPES et al., 2013; MENDES et al., 2019; RAIESI; BEHESHTI, 2015), quase sempre encontrada em baixos teores em solos degradados (LEHMAN

et al., 2015). Em ambiente tropical e, especialmente em solos arenosos, a MO é a principal responsável pela CTC, o que pôde ser verificado na tabela 2, além de contribuir na disponibilização de nutrientes e para o aumento da capacidade de retenção de água e na melhoria da agregação do solo (CASTRO et al., 2015). Esses resultados refletem positivamente na comunidade microbiana por propiciar um ambiente mais favorável à sua atividade e diversidade (LEHMAN et al., 2015). Maiores teores de COT também foram encontrados em áreas de ILP por Laroca et al. (2018) e Maia et al. (2007).

Além dos maiores teores de COT destaca-se, ainda, maior CBM na área de ILP - Pastagem, assemelhando-a à área referência MN. Entretanto, a área sob ILP - Pastagem apresentou o maior índice qCO_2 , o que é resultante da maior RB dentre os demais usos do solo. Isso indica que a comunidade microbiana produz mais CO_2 por unidade de CBM. No caso do fragmento florestal sob MN, a ausência da perturbação antropogênica resulta em uma comunidade microbiana mais estável metabolicamente, que emite menos CO_2 por unidade de CBM (ANDERSON; DOMSCH, 2010; STIEVEN et al., 2014). Na área de pastagem em ILP, a presença da gramínea favorece o CBM, mas também aporta C ao solo de modo a estimular a respiração microbiana (LANGE et al., 2015; THAKUR et al., 2015), principalmente devido ao aporte de resíduos vegetais, presença de sistema radicular abundante, exsudando substratos orgânicos e manutenção de condições mais estáveis de umidade e temperatura pela cobertura vegetal (LAROCCA et al., 2018). Nesse caso, as áreas MN e ILP - Soja apresentaram maior teor de C solúvel comparados às áreas de pastagem, o que corrobora Figueiredo et al. (2008) e Zhao et al. (2012), pois os resíduos vegetais aportados são mais facilmente degradáveis pela comunidade microbiana.

Maior qCO_2 é típico de solos agrícolas que recebem aporte de C de fácil uso pela comunidade microbiana (DINESH et al., 2003). Por sua vez, o segundo maior índice qCO_2 , encontrado na área sob monocultura de cana representa um cenário preocupante, visto que o índice é alto, apesar da área apresentar o menor valor de CBM. Isso indica que a comunidade microbiana está exposta a uma condição que favorece a mineralização da MO, o que coincide com o menor teor de COT do solo sob monocultivo de cana. Apesar de a cana-de-açúcar produzir abundante sistema radicular, boa parte da sua biomassa é exportada e os resíduos deixados na superfície foram queimados para facilitar a colheita. Sistemas conservacionistas como

a ILP são importantes para a recuperação e manutenção da MO e da atividade microbiana (BALOTA et al., 2015; CARDOSO et al., 2013; SILVA et al., 2010), sendo que as gramíneas em áreas de ILP estimulam a biomassa microbiana do solo em comparação às áreas sob monocultivo (LAROCCA et al., 2018).

As áreas sob ILP apresentaram os menores quocientes microbianos (q_{Mic}) dentre os diferentes usos do solo, corroborando Maia et al. (2007), o que é resultado do acúmulo de COT sob ILP, semelhante ao encontrado no solo referência sob MN. Por sua vez, valores mais elevados de q_{Mic} nas áreas sob monocultivo de cana e pastagem degradada são resultantes dos menores teores de COT.

Ainda que geralmente os solos de uso agrícola apresentem menor atividade enzimática comparados àqueles sob vegetação nativa (BANDICK; DICK, 1999; ISLAM; WEIL, 2000), a maior atividade enzimática nas áreas sob ILP resulta do maior teor de C favorecido pelo manejo conservacionista, em concordância com o observado por Trasar-Cepeda et al. (2008). Solos sob pastagem geralmente apresentam maior atividade enzimática comparados a solos sob uso agrícola, devido aos benefícios resultantes da cobertura pela vegetação, com sistema radicular mais abundante e menor distúrbio mecânico quando em SPD (ACOSTA-MARTÍNEZ et al., 2007). Apesar da atividade enzimática se correlacionar positivamente com a MO (BŁOŃSKA; LASOTA; ZWYDAK, 2017; LOPES et al., 2013), todas as enzimas avaliadas tiveram maior atividade nas áreas de ILP - Pastagem, mesmo que o teor de MO dessas áreas tenha sido semelhante ao da área referência MN. Embora a mata nativa seja usada como referência para avaliação das alterações do solo decorrentes de seu uso, nem sempre a mata apresenta as melhores condições para os indicadores de qualidade do solo, como geralmente é o caso para os baixos teores de P e valores de pH (DE MORAIS et al., 2015), o que é decorrente da baixa fertilidade natural do solo. Os resultados do presente estudo corroboram Wallenius et al. (2011), que confirmaram que a variação da atividade enzimática e da biomassa microbiana não depende somente do teor de MO, mas também de outras características do uso do solo, principalmente da heterogeneidade física e da diversidade de plantas nele cultivadas.

A atividade da arilsulfatase e da fosfatase ácida foram maiores na área de ILP - Pastagem em relação à MN, mesmo que as duas áreas tenham apresentado teores semelhantes de CBM e de COT, diferente do observado por Acosta-Martínez et al., (2007), que indicam que a atividade enzimática está

relacionada com o teor de C do solo, o que não foi observado no presente estudo, pois em áreas com teor semelhante de COT, verificou-se variação na amplitude da atividade enzimática. Lopes et al. (2013) também verificaram alta correlação entre COT e atributos microbiológicos e bioquímicos do solo (CBM, RB e atividade das enzimas celulase, β -glucosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase), destacando, novamente, a importância da MO como indicadora chave da QS.

A maior atividade da β -glucosidase na área de ILP – Pastagem tem relação com a maior atividade microbiana nesse solo, medida pela respiração basal, além de maior CBM. O maior volume de raízes e aporte de resíduos vegetais na área de manejo conservacionista torna o ambiente mais favorável à comunidade microbiana (LEHMANN; ZHENG; RILLIG, 2017), resultando em maior atividade das enzimas do solo, as quais têm origem não apenas microbiana, mas também da comunidade vegetal (UTOBO; TEWARI, 2014). A maior atividade medida pela RB e maior CBM se correlacionaram positivamente com a atividade das demais enzimas, o que indica maior dinâmica na ciclagem de C e nutrientes pela maior ativação dos ciclos biogeoquímicos (ACOSTA-MARTÍNEZ et al., 2007; DICK, 1997). A atividade da β -glucosidase é usada como indicadora do efeito do manejo nos sistemas de produção, devido à sua baixa sazonalidade e por sua influência na dinâmica da MO (BANDICK; DICK, 1999; KNIGHT; DICK, 2004; MENDES et al., 2019).

A atividade da celulase foi maior nas áreas em ILP, seguida de MN e área de pastagem degradada, provavelmente devido à disponibilidade de raízes e aporte de resíduos (MAKOI; NDAKIDEMI, 2008), especialmente resíduos de relação C/N mais alta, que estimulam a atividade dessa enzima no solo. As raízes de *Urochloa* sp. são bastante ativas e liberam compostos orgânicos que servem como fonte de C e energia para a microbiota (MENEZES-BLACKBURN et al., 2016), favorecendo sua atividade e a produção de várias enzimas que mantêm sua atividade no solo. Similarmente, urease e L-glutaminase, envolvidas na ciclagem de N, também apresentaram maior atividade nas áreas de ILP, o que indica um ambiente mais ativo em termos de ciclagem de N (Tabela 3) e, conseqüentemente, capaz de suportar a comunidade vegetal que nele se estabelecer (BINI et al., 2014).

A qualidade estrutural avaliada por metodologias visuais permite a diferenciação de sistemas de manejo e a identificação de áreas passíveis de melhoria (BEHRENS KRAEMER et al., 2017; BOIZARD et al., 2017). A rotação de culturas favorece a qualidade estrutural, pela diversificação dos resíduos vegetais, mas

principalmente pela diversidade de raízes, sendo que, no caso de solos arenosos, exerce papel fundamental no incremento de MO, o que favorece a manutenção do teor de água, aeração e a agregação, que por sua vez influencia e é influenciada pela comunidade microbiana (LEHMANN; ZHENG; RILLIG, 2017).

As classes de qualidade estrutural “boa” e “muito boa”, avaliadas pelo DRES, se correlacionaram com atributos químicos e microbiológicos do solo, notadamente pela concordância das áreas com qualidade estrutural “muito boa” com o CBM, a RB e a CTC (Tabela 3), demonstrando que o uso de práticas conservacionistas, como a ILP, permitiu a melhoria da qualidade física e microbiológica, aumentando a resiliência e a QS agrícola em relação à área referência sob fragmento florestal nativo. Por outro lado, as áreas com pior qualidade estrutural se opuseram aos atributos avaliados, exceto pela convergência com o $qMic$, mas esse índice foi severamente influenciado pelos baixos valores de CBM nessas áreas.

A atividade enzimática do solo se mostrou robusta para avaliar as propriedades biogeoquímicas, sendo um indicador simples, rápido e de baixo custo para a avaliação da QS (MENDES et al., 2019; NANNIPIERI; TRASAR-CEPEDA; DICK, 2018), além de apresentar relação com a qualidade estrutural e o COT.

Conclusões

A área sob Integração Lavoura Pecuária na fase de pastagem apresentou qualidade estrutural com índices semelhantes aos do solo sob mata nativa, com abundante ocorrência de raízes e presença de agregados considerados favoráveis.

O uso de solo arenoso em sistema ILP, especialmente na fase pastagem, resultou em atributos microbiológicos e bioquímicos semelhantes ao solo sob mata nativa. O sistema conservacionista constitui-se em estratégia eficiente de manejo para a melhoria da qualidade de solos arenosos. O uso do solo com cana-de-açúcar e a pastagem degradada reduziram a qualidade física, química, microbiológica e bioquímica do solo.

O favorecimento dos processos biológicos do solo também favorece a sua qualidade estrutural, sendo fundamental para a sustentabilidade da produção agrícola em solos arenosos.

O método de avaliação baseado no DRES permitiu a diferenciação da qualidade estrutural do solo sob diferentes usos, mostrando-se uma ferramenta

prática e útil para o monitoramento também de solo arenoso, o que é geralmente um desavio. A qualidade estrutural apresentou correlação positiva com o COT, a atividade microbiana e a atividade enzimática.

O índice de qualidade estrutural do solo (IQES) obtido pelo Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo reflete a qualidade estrutural, microbiológica e bioquímica de solos arenosos, considerada ferramenta integrativa útil no monitoramento da qualidade do solo.

Referências do artigo B

- ACOSTA-MARTÍNEZ, V. et al. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. **Applied Soil Ecology**, v. 35, n. 1, p. 35–45, 2007.
- ALEF, K. Soil Respiration. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (Eds.). **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. Academic Press, 1995. p. 214–218.
- ANDERSON, T.; DOMSCH, K. H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 21, p. 471–479, 1989.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 12, p. 2039–2043, 2010.
- ARTHUR, E. et al. Amending a loamy sand with three compost types: Impact on soil quality. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 116–123, 2011.
- BABUJIA, L. C. et al. Microbial diversity in an Oxisol under no-tillage and conventional tillage in southern Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5, p. 863–870, 2014.
- BALL, B. C.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. J. Field assessment of soil structural quality - A development of the Peerlkamp test. **Soil Use and Management**, v. 23, n. 4, p. 329–337, 2007.
- BALOTA, E. L. et al. Qualidade do solo em razão da conversão de mata nativa em culturas anual e perene no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1003–1014, 2015.
- BANDICK, A. K.; DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, p. 1471–1479, 1999.
- BARETTA, D. et al. Efeito do monocultivo de Pinus e da queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no Planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 715–724, 2005.
- BARTH NETO, A. et al. Italian ryegrass establishment by self-seeding in integrated crop-livestock systems: Effects of grazing management and crop rotation strategies. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 77–83, fev. 2014.

- BEHRENDTS KRAEMER, F. et al. Morpho-structural evaluation of various soils subjected to different use intensity under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 169, p. 124–137, 2017.
- BINI, D. et al. Identifying indicators of C and N cycling in a clayey Ultisol under different tillage and uses in winter. **Applied Soil Ecology**, v. 76, p. 95–101, 2014.
- BŁOŃSKA, E.; LASOTA, J.; ZWYDAK, M. The relationship between soil properties, enzyme activity and land use. **Forest Research Papers**, v. 78, n. 1, p. 39–44, 2017.
- BOIZARD, H. et al. Developments in the “profil cultural” method for an improved assessment of soil structure under no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 92–103, 2017.
- CARDOSO, E. J. B. N. et al. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **Scientia Agricola**, v. 70, n. 4, p. 274–289, 2013.
- CARRIZO, M. E. et al. Aggregation agents and structural stability in soils with different texture and organic carbon contents. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 1, p. 75–82, 2015.
- CASTRO, G. S. A. et al. Management impacts on soil organic matter of tropical soils. **Vadose Zone Journal**, v. 14, n. 1, 2015.
- CUI, J.; HOLDEN, N. M. The relationship between soil microbial activity and microbial biomass, soil structure and grassland management. *Soil and Tillage Research*, v. 146, p. 32–38, 2015.
- DE MORAIS, E. R. C. et al. Indices of chemical quality of soil in areas cultivated with irrigated papaya. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 6, p. 587–591, 2015.
- DICK, R. P. Soil enzyme activities as integrative indicators of soil health. In: PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. (Eds.). **Biological indicators of soil health**. Wallingford: CAB International, 1997. p. 121–156.
- DICK, R. P.; BREACKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: SSSA, 1996. p. 247–271.
- DINESH, R. et al. Changes in soil microbial indices and their relationships following deforestation and cultivation in wet tropical forests. **Applied Soil Ecology**, v. 24, n. 1, p. 17–26, 2003.
- DONAGEMMA, G. K. et al. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003–1020, 2016.
- EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601–606, 1988.

FIGUEIREDO, A. et al. Determinação de estoques totais de carbono e nitrogênio e suas frações em sistemas agrícolas implantados em Argissolo Vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 2091–2100, 2008.

FRANKENBERGER, W. T.; TABATABAI, M. A. L-glutaminase activity of soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 23, n. 9, p. 869–874, 1991.

GONZAGA, M. I. S. et al. Atlantic forest soil as reference in the soil quality evaluation of coconut orchards (*Cocos nucifera* L) under different management. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 6, p. 3847–3858, 2016.

HÉNIN, S. et al. **Le profil cultural: Principes de physique du sol**. Paris: Masson, 1960.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 79, n. 1, p. 9–16, 2000.

IUSS, Working Group WRB. **World reference base for soil resources 2014**. Rome: FAO, 2014.

JOHANNES, A. et al. To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure? **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 24–32, 2017.

KNIGHT, T. R.; DICK, R. P. Differentiating microbial and stabilized β -glucosidase activity relative to soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 12, p. 2089–2096, 2004.

LANGE, M. et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. **Nature Communications**, v. 6, n. 6707, p. 1–8, 2015.

LAROCCA, J. V. DOS S. et al. Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 11, p. 1248–1258, 2018.

LEHMAN, R. M. et al. Understanding and enhancing soil biological health: The solution for reversing soil degradation. **Sustainability (Switzerland)**, v. 7, n. 1, p. 988–1027, 2015.

LEHMANN, A.; ZHENG, W.; RILLIG, M. C. Soil biota contributions to soil aggregation. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, n. 12, p. 1828–1835, 2017.

LOPES, A. A. D. C. et al. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon soil biology & biochemistry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 2, p. 461–472, 2013.

MAIA, S. M. F. et al. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 71, n. 2, p. 127–138, 2007.

- MAKOI, J. H. J. H. J. R. R.; NDAKIDEMI, P. A. Selected soil enzymes: examples of their potential roles in the ecosystem. **African Journal of Biotechnology**, v. 7, n. 3, p. 191–191, 2008.
- MANN, C. et al. Relationships between field management, soil health, and microbial community composition. **Applied Soil Ecology**, v. 144, p. 12–21, 2019.
- MENDES, I. C. et al. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, v. 139, p. 85–93, 2019.
- MENEZES-BLACKBURN, D. et al. Organic Acids Regulation of Chemical-Microbial Phosphorus Transformations in Soils. **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 21, p. 11521–11531, 2016.
- MOREIRA, E. D. S. et al. Production efficiency and agronomic attributes of corn in an integrated crop-livestock-forestry system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 4, p. 419–426, 2018.
- NANNIPIERI, P.; TRASAR-CEPEDA, C.; DICK, R. P. Soil enzyme activity: a brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis. **Biology and Fertility of Soils**, v. 54, n. 1, p. 11–19, 2018.
- NASCIMENTO, D. M. DO et al. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 292–299, 2019.
- NOGUEIRA, M. A. et al. Promising indicators for assessment of agroecosystems alteration among natural, reforested and agricultural land use in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 115, n. 1–4, p. 237–247, 2006.
- OBADI, V. D. P. Integrating management information with soil quality dynamics to monitor agricultural productivity. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 2036–2043, 2019.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R Foundation for Statistical Computing**. Vienna: Austria, 2014.
- RAIESI, F.; BEHESHTI, A. Microbiological indicators of soil quality and degradation following conversion of native forests to continuous croplands. **Ecological Indicators**, v. 50, p. 173–185, 2015.
- RALISCH, R. et al. **Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo - DRES**. Documento 390. Londrina: Embrapa Soja, 2017.
- SALTON, J. C. et al. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 70–79, 2014.
- SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

- SCHINNER, F.; VON MERSI, W. Xylanase-, CM-cellulase- and invertase activity in soil: An improved method. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 22, n. 4, p. 511–515, 1990.
- SHER, Y. et al. Microbial extracellular polysaccharide production and aggregate stability controlled by Switchgrass (*Panicum virgatum*) root biomass and soil water potential. **bioRxiv**, p. 724195, 2019.
- SILVA, A. P. et al. Microbial biomass under various soil- and crop-management systems in short- and long-term experiments in Brazil. **Field Crops Research**, v. 119, n. 1, p. 20–26, 2010.
- SILVA, A. P. DA et al. Soil structure and its influence on microbial biomass in different soil and crop management systems. **Soil and Tillage Research**, v. 142, p. 42–53, 2014.
- SOIL SURVEY STAFF. **Soil Taxonomy - a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys**. 2 nd ed. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, 1999.
- STIEVEN, A. C. et al. Impacts of integrated crop-livestock-forest on microbiological indicators of soil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 1, p. 53–58, 2014.
- TABATABAI, M. A. A.; BREMNER, J. M. M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 1, n. 4, p. 301–307, 1969.
- TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America, Proceedings**, v. 34, p. 225–229, 1970.
- TAVARES FILHO, J. et al. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 393–399, 1999.
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análises de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.
- THAKUR, M. P. et al. Plant diversity drives soil microbial biomass carbon in grasslands irrespective of global environmental change factors. **Global Change Biology**, v. 21, n. 11, p. 4076–4085, 2015.
- TOTSCHKE, K. U. et al. Microaggregates in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 181, n. 1, p. 104–136, 2018.
- 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, 2008.
- UTOBO, E. B.; TEWARI, L. Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 13, n. 1, p. 147–169, 2014.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703–707, 1987.

WALLENIUS, K. et al. Effects of land use on the level, variation and spatial structure of soil enzyme activities and bacterial communities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 7, p. 1464–1473, 2011.

ZHAO, A.; ZHANG, M.; HE, Z. Characteristics of soil water-soluble organic C and N under different land uses in Alaska. **Soil Science**, v. 177, n. 12, p. 683–694, 2012.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A qualidade estrutural do solo tem relação com sua qualidade microbiológica e bioquímica, de modo que a modificação de uma reflete na outra. Nos dois capítulos componentes desta tese, foi possível verificar a possibilidade do uso da ferramenta DRES na avaliação e monitoramento da qualidade estrutural do solo. Além disso, o DRES se revelou metodologia integrativa, pois a qualidade estrutural se correlacionou com a qualidade microbiológica e bioquímica, confirmando a hipótese inicial do trabalho. Com isso, o DRES se confirma como ferramenta útil e de fácil repetibilidade, podendo ser usada para avaliar a qualidade do solo e inferir sobre seus atributos biológicos.

Independente da natureza do estudo, seja ao comparar condições físicas contrastantes devido à indução via compactação por tráfego de máquinas e escarificação, em campo experimental controlado, seja pela comparação de diferentes usos de solo (englobando condições conservacionistas e degradantes), o IQES obtido pelo DRES apresentou correlação com os atributos microbiológicos e bioquímicos, demonstrando robustez na avaliação e no monitoramento da QS. O DRES também se mostrou eficaz ao avaliar a qualidade estrutural de solos de diferentes classes texturais, destacando a importância dos sistemas conservacionistas em solos arenosos, como a Integração Lavoura Pecuária, favorecendo sua qualidade e reduzindo a suscetibilidade à degradação.

Os atributos microbiológicos e bioquímicos se mostraram eficazes no monitoramento de modificações nos agroecossistemas resultantes do uso e manejo do solo, sendo também concordantes com a variação da qualidade estrutural avaliada pelo DRES. Dentre os atributos avaliados, a atividade enzimática, mas principalmente a atividade da arilsulfatase, foi congruente com as classes de qualidade estrutural tanto em solos argilosos como arenosos. Os resultados da presente tese enfatizam a importância da bioanálise do solo (MENDES et al., 2018), em que a atividade enzimática se confirma como promissora indicadora da QS, devendo ser disseminada comercialmente.

As áreas sob sistemas conservacionistas (SPD e ILP) resultaram em melhor QS, refletida em maior índice de qualidade estrutural e em melhor qualidade microbiológica, avaliada pela biomassa microbiana e sua atividade. Por outro lado, os sistemas degradantes (com revolvimento do solo e sob monocultivo) promoveram a

degradação da qualidade estrutural, resultando em condições estressantes à comunidade microbiana, o que interfere na dinâmica da matéria orgânica, podendo resultar em perdas. O favorecimento dos processos biológicos do solo favoreceu sua qualidade estrutural, sendo fundamental para a sustentabilidade da produção agrícola em solos de diferentes texturas.

Os estudos relativos à QS e à sua sustentabilidade devem ir além da mera avaliação e quantificação de atributos, tendo como propósito seu uso na adequação dos agroecossistemas. Metodologias de fácil uso e repetibilidade, bem como baixo custo, como o DRES, devem ser priorizadas e difundidas, para que todos os envolvidos na produção agrícola possam avaliar o efeito dos sistemas produtivos na qualidade do solo e identificar possibilidades e necessidades de melhoria, em prol da sustentabilidade agrícola dos sistemas de produção.