

QUALIDADE DO SOLO: RELEVÂNCIA E USO DE INDICADORES PARA O MONITORAMENTO

SOIL QUALITY: RELEVANCE AND USE OF INDICATORS FOR MONITORING

Carlos F. Camilo Cotrim^{1*}; Antônio Sérgio F. de Sá¹; Daniela P. da Silva Alves²; Ester V. Gonçalves¹; Flaviane B. Teixeira²; Junilson A. de Paula Silva¹; Madhswon H. Silva Branco²; Luciane M. Almeida³; Samantha S. Caramori³

RESUMO: O manejo intensivo, a constante aplicação de defensivos químicos e o uso de fertilizantes são práticas agrícolas comuns, as quais aumentam a produtividade das lavouras, porém provocam grandes alterações nas características dos solos. Essas mudanças causam a sua degradação e tem comprometido o fornecimento dos serviços ecossistêmicos do solo. Os indicadores de qualidade do solo são ferramentas simples, econômicas e eficientes de diagnóstico da fertilidade das terras, os quais podem ser utilizados para aumentar a sustentabilidade no manejo de forma a garantir uma melhor produção, e conseqüentemente maior lucratividade das lavouras. Três tipos de indicadores são comumente empregados: os físicos, os químicos e os biológicos. Contudo, a escolha de indicadores confiáveis é uma das principais dificuldades para o diagnóstico da qualidade do solo. Isso porque condições ambientais específicas exigem indicadores específicos, de tal modo que há variação de indicadores de local para outro. Este trabalho apresenta e discute alguns dos indicadores comumente empregados para avaliar a qualidade de solos e mostra a importância de monitorar este recurso e implementar atividades que levem a prevenção, correção, mitigação e recuperação do solo, já que a ausência de manejo adequado acarreta sérias complicações para toda espécie de vida na terra.

PALAVRAS-CHAVE: biomassa microbiana, degradação do solo,

porosidade, teor de matéria orgânica, microrganismos do solo.

ABSTRACT: Intensive soil management, the constant application of chemical pesticides, and the use of fertilizers are common agricultural practices, which increase crop productivity; otherwise, they promote major changes in soil attributes. Those changes cause soil degradation and have damaged the supply of soil ecosystem services. In this sense, soil quality indicators are simple, economical, and efficient tools for diagnosing the fertility of the land, which can be used for greater environmental sustainability and to guarantee better production and, consequently, greater profitability of crops. Three types of indicators are commonly used in the evaluation of soil quality, they are the physical, chemical, and biological indicators. However, choosing reliable indicators is one of the main difficulties in diagnosing soil quality. This is because specific environmental conditions require specific indicators, in such a way that indicators vary from place to place. This work presents and discusses some of the indicators commonly used to assess soil quality and shows the importance of monitoring this resource and implementing activities that lead to prevention, correction, mitigation, and soil recovery, since the misuse of the soil entails serious complications. for all life on earth.

KEYWORDS: microbial biomass, soil degradation, porosity, organic matter content, soil microorganisms.

¹Doutorando em Recursos Naturais do Cerrado, Universidade Estadual de Goiás, ² Mestrando em Recursos Naturais do Cerrado, Universidade Estadual de Goiás, ³Docentes da Universidade Estadual de Goiás, Laboratório de Biotecnologia, Anápolis, GO, Brasil. *carlosfcamil@gmail.com

INTRODUÇÃO

Desde a revolução verde, nos anos 1960, a agricultura mundial tem passado por mudanças profundas na forma de manejo e uso do solo. No início, a maior preocupação dos produtores era a produtividade agrícola e o solo era apenas um suporte para o crescimento de plantas de interesse comercial (BAULCOMBE et al., 2009). Sendo apenas um suporte, pouca importância era dada a ele, e se valorizava atividades como a mecanização, a aplicação de fertilizantes químicos para correção do solo e uso de agrotóxicos para o controle de pragas (DUTRA; SOUZA, 2017). No Brasil, um exemplo deste comportamento ocorreu no Cerrado em 1970. Nesta época o governo federal, por meio de políticas públicas, incentivou a conversão de áreas do bioma Cerrado para a agricultura por razão do relevo plano que facilitava a adoção de maquinário para as etapas desde a semeadura até a colheita (SOUSA; LOBATO; GOEDERT, 2008). Contudo, os solos do Cerrado apresentaram baixa fertilidade devido à elevada acidez, o que dificultava o plantio das espécies utilizadas na agricultura. Surgiu então a preocupação com a influência do solo na produtividade.

A expressão “qualidade do solo” tornou-se popular e usual a partir de 1990, em decorrência dos grandes investimentos no agronegócio. O aumento na demanda de produtividade ocasionou uma preocupação com as propriedades naturais, uma vez que o manejo inadequado do solo causa perdas por erosão, empobrecimento de nutrientes,

além de interferir nos fatores climáticos e no habitat dos animais e vegetais. Entretanto, a ciência ainda não conseguiu chegar em um consenso para a definição quantitativa do termo qualidade do solo, pois diferentemente da qualidade da água e qualidade do ar, o solo não possui padrões, impossibilitando a criação de regulamentações para aferir suas propriedades. Contudo, as ferramentas mencionadas a seguir tem auxiliado a obter informações precisas sobre as propriedades dos solos.

Funções do Solo

O solo pode ser definido como a camada superior da crosta terrestre. Sua estrutura consiste em uma mistura complexa de materiais particulados derivados de minerais abióticos, biota viva e partículas de detritos orgânicos e substâncias húmicas (KAMAL; PRASAD; VARMA, 2010). As inúmeras interações entre os componentes bióticos e abióticos proporciona aos solos a realização de diferentes serviços ecossistêmicos de grande importância para a manutenção da vida no planeta (Figura 1). Entre as diferentes funções do solo pode-se citar: formação e manutenção da atmosfera, substrato para produção de plantas, infiltração e fornecimento de água limpa, estoque de carbono e biomassa, regulação climática, além de abrigar uma grande biodiversidade de microrganismos, fauna e flora (WALL et al., 2012; GREEN et al., 2019; VELASQUEZ; LAVELLE, 2019; NKONGOLO; NARENDRULA-KOTHA, 2020).

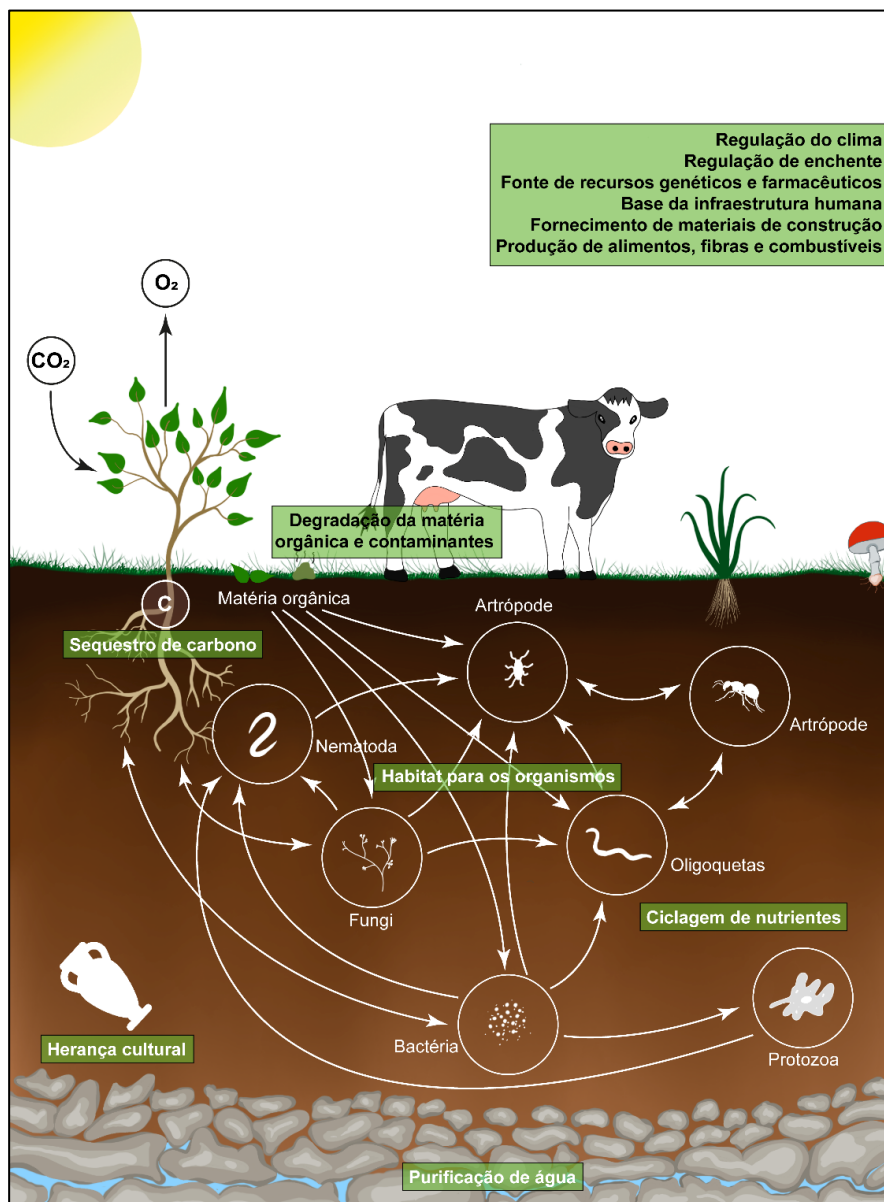


Figura 1. Funções do solo e diferentes serviços ecossistêmicos.

Indicadores de Qualidade do Solo

Apesar da sua importância, os solos têm sido degradados em ritmo acelerado devido às atividades antropogênicas, como conversão de habitats naturais em áreas rurais e expansão urbana (OLIVEIRA et al., 2021). As consequências destas atividades incluem aumento da desertificação, erosão e redução da fertilidade (WALL et al., 2012; PEREIRA et al., 2018). Na tentativa de identificar os danos e minimizar o processo de

degradação do solo pesquisadores tem desenvolvido ao longo dos anos diferentes estratégias de estudo. Estas metodologias selecionam atributos mensuráveis os quais possam ser associados a determinadas funções que o solo deve desempenhar, servindo desta forma como indicadores de sua qualidade. Os indicadores de qualidade do solo mais comumente utilizados são as avaliações das propriedades físicas, químicas e biológicas (NKONGOLO; NARENDRULA-KOTHA, 2020).

Contudo, dentre os diferentes indicadores é difícil eleger o melhor, sendo necessária a combinação de diferentes parâmetros para obtenção de dados confiáveis a respeito da qualidade do solo. Isso porque condições ambientais específicas (clima, tipo de manejo humano, disponibilidade de oxigênio, fauna e flora presente no solo, por exemplo) exigem indicadores específicos, de tal modo que é possível haver variação de indicadores de local para outro. Mesmo considerando todos estes fatores, ainda não se tem um modelo prático, confiável e totalmente isento de erros. A escolha do indicador irá depender do objetivo da análise, conseqüentemente, da finalidade de uso do solo. A literatura prescreve os preceitos examinados na escolha do indicador, sendo fundamental o aspecto de funcionalidade, o fácil manuseio e a susceptibilidade às variações climáticas e de manejo (SILVA et al., 2021). Para realização das análises, recomenda-se a divisão da área estudada em ecorregiões, de acordo com as características similares (hídricas/vegetativas/solo). Esse critério é imprescindível para escolha prévia dos indicadores (ARAÚJO et al., 2012). Ainda se sugere a combinação de indicadores químicos, físicos e biológicos para uma análise mais completa e confiável da qualidade do solo, assim é possível implementar atividades que levem a prevenção, correção, mitigação e recuperação deste recurso natural (VELASQUEZ; LAVELLE, 2019; NKONGOLO; NARENDRULA-KOTHA, 2020).

Indicadores Físicos

Para a avaliação de impactos nas propriedades físicas do solo, destacam-se as condições relacionadas com a textura do solo (composição e porosidade), a retenção de água, a compactação (densidade do solo e resistência à penetração) e a estrutura do solo (agregação) (CHAVEIRO et al., 2022; MANTOVANELLI et al., 2022).

O indicador textura do solo é determinado pela composição e porosidade. Em relação a composição as proporções de areia, silte e argila no solo determinam o arranjo, tamanho e a organização das partículas no solo, o que influencia no tamanho dos poros (Figura 2A). Por sua vez, os poros são os espaços entre as partículas do solo, e podem estar cheios de ar ou água (Figura 2A). Por exemplo, se o solo for composto por alta porcentagem de areia, o espaço entre as partículas é maior e, portanto, o solo tem maior porosidade. À medida que o tamanho das partículas diminui, ocorre um melhor encaixe entre as partículas e conseqüentemente menor porosidade. Assim, a textura é um indicador associado a capacidade de retenção e a permeabilidade de água no solo, além do desenvolvimento de raízes e distribuição de nutrientes (MOMOLI et al., 2022), trazendo influência nos processos ecológicos e pedológico. Importante resaltar que a classe textural de um solo varia pouco ao longo do tempo (STEFANOSKI et al., 2013).

Outro indicador físico é a compactação do solo. A compactação ocorre quando há um aumento da densidade do solo em um mesmo volume com a redução da sua porosidade (Figura 2B). Isso ocorre quando o solo é submetido a um grande esforço ou compressão,

expulsando o ar dos poros e rearranjando as partículas. A compactação altera a estrutura, aumenta a densidade, reduz a porosidade e afeta a permeabilidade de água e nutrientes, diminuindo a fertilidade (BATEY; MCKENZIE, 2006). Geralmente a compactação ocorre em função do uso incorreto do solo, tanto com equipamentos agrícolas, tráfego de máquinas ou por

negligência no manejo da criação de animais com utilização de sobrecarga animal (Figura 2B). O indicador densidade do solo pode possuir grande variabilidade espacial, devido ao manejo agrícola, ao tipo de solo e a profundidade de amostragem (PIRES; ROSA; TIMM, 2011).

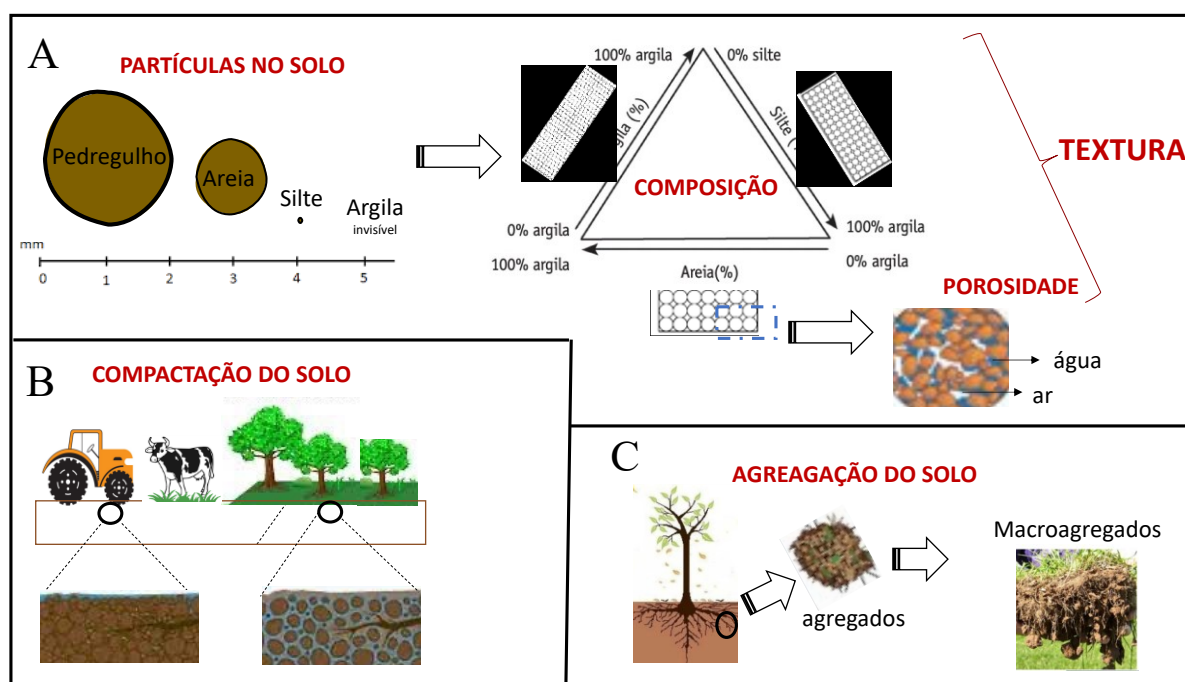


Figura 2. Indicadores físicos de qualidade do solo. A. Textura (composição e porosidade) e Retenção de água; B. Compactação; C. Agregação.

Um conjunto de partículas primárias (argila, silte e areia) que se aderem fortemente umas às outras e comportando-se mecanicamente como unidade estrutural é chamado de agregado (SOARES et al., 2018) (Figura 2C). A distribuição das classes ou tamanhos de agregados é considerada um fator importante para a germinação de sementes e para o desenvolvimento das raízes, servindo como indicador da qualidade do solo (ZENG et al., 2018). Além disto, a estabilidade dos agregados é um fator importante no

controle da erosão hídrica em solos tropicais ácidos, uma vez que a erosão dos solos é diretamente relacionada à estabilidade de agregados em água (SAYGIN et al., 2012). A agregação está associada a capacidade dos solos em sequestrar carbono e nitrogênio (PEIXOTO et al., 2006), influenciando também sobre o conteúdo de matéria orgânica no solo (MOS). Por outro lado, Conte et al. (2011) explicam que solos muito compactados possuem grande estabilidade de agregados e ao mesmo

tempo baixa porosidade, afetando o desenvolvimento de vegetais.

Os parâmetros usados para inferir qualidade do solo não devem ser usados de maneira isolada para avaliações físicas (FREITAS et al., 2017). Os indicadores contribuem para a compreensão dos limites de cada solo, importantes para contribuir no manejo e conservação (BRADY; WEIL, 2013). As ferramentas físicas usadas para inferir a qualidade do solo se justificam pela sua capacidade de sustentar a produtividade ambiental, mensuram propriedades que servem como indicadores na classificação de ecossistemas perturbados (REIS JUNIOR et al., 2002).

Uma metodologia simples e de fácil execução para avaliação em campo é o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo, conhecida pela sigla DRES (RALISCH et al., 2017). Este método desenvolvido recentemente por pesquisadores da Embrapa se baseia na avaliação dos agregados do solo ao longo de um perfil de 25 cm de profundidade e permite que técnicos de campo possam identificar alterações em indicadores físicos do solo na superfície sem a necessidade de encaminhar amostras para laboratório. O DRES facilita a tomada de decisão quanto ao manejo de uma área para evitar compactação ou ausência de agregados que demonstram perda de fertilidade do solo. Embora aborde de forma superficial os indicadores físicos do solo, o DRES tem demonstrado ser uma ferramenta versátil para avaliações em campo do solo em escalas espacial, temporal e para avaliação de manejos conservacionistas (GOMES et al., 2018; PAIVA; RITA; CAVALIERI-POLIZELI, 2020).

Indicadores Químicos

Os indicadores químicos mais abordados em estudos sobre qualidade de solos são: pH, condutividade elétrica (CE), capacidade de troca catiônica (CTC), teor de matéria orgânica do solo (MOS), saturação de bases ($v\%$) e elementos fitotóxicos (Al^{3+}).

O pH, concentração de íons de H^+ na solução do solo, é considerado um importante indicador químico de qualidade (ALLEN; SINGH; DALAL, 2011). Essa variável é extremamente importante para o bom funcionamento dos processos do solo, desde fornecer condições favoráveis ao desenvolvimento das comunidades de microrganismos, até a disponibilidade de nutrientes para as plantas, visto que alguns macronutrientes, como N, P, K e Mg, têm sua disponibilidade aumentada dependendo das condições de pH. Dentre os indicadores químicos o pH apresenta maior facilidade em sua mensuração, podendo ser aferido por equipamentos de fácil manipulação como o pHmetro. Os solos do Brasil são considerados ácidos na maioria das ecorregiões encontradas no país, com pH em torno de 5, devido a pobreza de alguns nutrientes e até mesmo a processos de intemperismos. Porém, como as principais plantas cultivadas utilizadas como alimento (soja, trigo e algodão) necessitam de solos alcalinos para se desenvolverem, torna-se necessário fazer uma correção desse pH dos solos a fim de se obter maior produtividade.

A CE é a medida da salinidade do solo, a qual é obtida pela concentração de sal, que pode variar de acordo com temperatura, teor de água, íons, textura e estrutura do solo (ALLEN; SINGH;

DALAL, 2011). A medição da condutividade elétrica do solo é uma ferramenta valiosa para identificar as características do solo que influenciam nos padrões de rendimento das culturas e para estabelecer a variação espacial dessas propriedades do solo (CORWIN et al., 2003). A CE pode ser mensurada de forma rápida e eficiente pelo uso de condutímetro.

A CTC é uma das formas de mensurar a capacidade de disponibilização e retenção de nutrientes do solo. Ela é medida através da quantidade de cargas negativas presentes no solo. As cargas negativas geralmente são representadas pelas partículas orgânicas e pela fração de argila, enquanto as cargas positivas são representadas pelos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. A baixa CTC no solo aumenta significativamente o processo de lixiviação de cátions, em caso de chuvas intensas em solos descobertos (ALLEN; SINGH; DALAL, 2011). Assim, no preparo do solo para a agricultura é possível a correção do solo com adição de cargas negativas pelo uso do calcário, ou a adição de cargas positivas por meio da introdução da matéria orgânica e adição de nutrientes por meio de fertilizantes.

A MOS é considerada um importante atributo, porque desenvolve funções vitais para o bom funcionamento do solo, como a regulação do ciclo de fósforo e enxofre, e fornece substratos e habitat para microbiota que se desenvolve nestes ambientes, serve como fonte e sumidouro de carbono e nitrogênio e ainda influencia a textura do solo. A fração orgânica do solo se constitui como um sistema complexo, definido como material orgânico, em diferentes níveis de

decomposição, de origem vegetal, animal e microbiana (Biomassa microbiana, compostos solúveis e fragmentos de resíduos), assim como microrganismos vivos (STEVENSON, 1994).

A MOS é um indicador que afeta diretamente os atributos físicos e biológicos, de forma que a disponibilidade de matéria orgânica no solo promove a manutenção e melhoria destes outros indicadores, da mesma forma que a ausência ou diminuição de MOS pode levar a perda da estrutura dos agregados, da biodiversidade e da fertilidade do solo (CÓ-JÚNIOR, 2011). A determinação da matéria orgânica do solo é realizada usualmente por titulação após oxirredução pelo método de Walkley-Black (CANTARELLA; QUAGGIO; RAIJ, 2001).

Outro indicador químico do solo é a saturação por bases, denominada pela soma das bases trocáveis, utilizando-se o valor total de CTC. Este indicador é comumente utilizado para análise de fertilidade do solo, porque onde há percentagem de saturação por bases maior que 50% consideram-se solos férteis (eutróficos), enquanto onde apresentarem menos de 50% serão solos não férteis ou com baixa fertilidade (distróficos). Alguns solos apresentam, por características pedogênicas, altos teores de alumínio trocável (m%), por exemplo os solos do domínio fitogeográfico Cerrado. Estes solos apresentam saturação de alumínio de até 50%, os chamados solos álicos (RONQUIM, 2010), e faz que sejam naturalmente de baixa fertilidade (LEITE, 2022).

Indicadores Biológicos

Muitas propriedades biológicas do solo podem ser empregadas como indicadores de qualidade e saúde do solo, pois são sensíveis e refletem a influência do manejo humano e das mudanças climáticas. Indicadores biológicos podem fornecer respostas sozinhos ou em combinação com outros parâmetros químicos ou físicos. Apesar da vasta gama de indicadores biológicos que possam ser utilizados para avaliar os solos, é primordial que sejam escolhidos de acordo com a situação a ser investigada e usar apenas aquelas sensíveis a mudanças (MARTINEZ-SALGADO et al., 2010). Também deve-se levar em conta a capacidade dos indicadores em interferir sobre os processos ecológicos e de serem facilmente utilizáveis por especialistas, técnicos e agricultores (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007). Contudo, indicadores biológicos não possuem padrões e limites definidos, o que dificulta sua interpretação e torna a análise mais complexa por necessitar de áreas referência, as quais permitirão a comparação entre os locais estudados (MENDES; SOUSA; REIS-JUNIOR, 2015). O uso de indicadores biológicos de qualidade do solo permite avaliar processos ecológicos nos solos em áreas perturbadas ou processos de recuperação (OLIVEIRA FILHO; BARETTA; SANTOS, 2014).

Dentre os diferentes indicadores biológicos de qualidade do solo pode-se citar a biodiversidade de microrganismos e as funções e serviços ecossistêmicos que eles desempenham no solo. Eles podem ser utilizados como indicadores, porque respondem, mudam e se adaptam ao estresse e alterações ambientais (DANTAS et al., 2021), além de participarem de uma

vasta gama de processos ecológicos e de ser de fácil acesso. Microrganismos ainda possuem características tais como a abundância e atividade bioquímica e metabólica, além de proporcionarem respostas mais rápidas a mudanças no ambiente (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007). Dentre os parâmetros analisados nos microrganismos pode-se citar a biomassa microbiana, a respiração, o quociente respiratório e a atividade enzimática (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007).

Fazem parte da biomassa microbiana bactérias, fungos, protozoários e algas (Figura 3). Tais organismos representam o componente vivo da matéria orgânica do solo e sua avaliação fornece informações sobre alterações ocorridas no solo, principalmente alterações decorrentes do manejo (ARAÚJO et al., 2012). A biomassa microbiana relaciona-se com o funcionamento do solo, pois é um componente essencial da matéria orgânica que, entre outras funções, regula a ciclagem de nutrientes do solo controlando a decomposição e o acúmulo de matéria orgânica e as transformações envolvendo os nutrientes minerais (REIS JUNIOR, 2007). Para estimar a biomassa microbiana, é necessário saber a concentração de carbono, também chamado de carbono microbiano.

A respiração basal do solo é a soma de todas as funções metabólicas nas quais há produção de CO₂ (Figura 3). Sua produção se dá em sua maioria por fungos e bactérias durante a degradação da matéria orgânica (SILVA; AZEVEDO; DE-POLLI, 2007). O qCO₂ é obtido pela razão da respiração basal do solo e carbono da biomassa microbiana, expresso pela quantidade de CO₂ liberada em função do

tempo. Valores altos de qCO_2 indicam que os microrganismos estão oxidando carbono de suas próprias células para sobreviverem, indicando assim que há uma situação estressante (ALVES et al., 2011).

Outro indicador é a resposta enzimática dos microrganismos, a qual é bastante sensível e prática para detecção de impactos no solo (MARTINEZ-SALGADO et al., 2010). As enzimas podem ser agrupadas de duas formas: as que estão dentro da célula (endoenzimas) e as que são secretadas ou ligadas a membrana externa (exoenzimas). As enzimas extracelulares são fundamentais para o funcionamento dos ecossistemas,

uma vez que vários processos no solo dependem da atividade dessas enzimas, incluindo decomposição das plantas, formação/mineralização da matéria orgânica do solo e ciclagem de nutrientes (SOBUCKI et al., 2021) (Figura 3). As enzimas comumente avaliadas são as relacionadas ao ciclo do carbono (celulases, beta glicosidases), nitrogênio (protease e urease), fósforo (fosfatase) e enxofre (arilsulfatase). As enzimas comportam-se de forma semelhante à matéria orgânica e podem ser consideradas como impressões digitais dos sistemas de manejo em que o solo foi submetido (BALOTA et al., 2013).

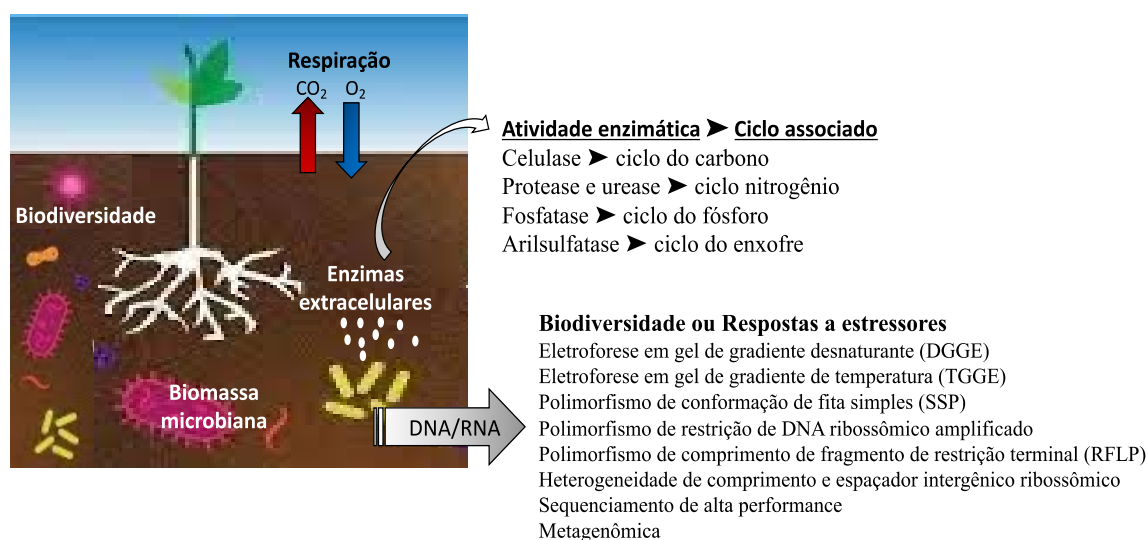


Figura 3. Indicadores biológicos de qualidade do solo usando microrganismos: parâmetros como biodiversidade, biomassa microbiana, respiração basal, atividade enzimática, marcadores moleculares baseados na análise de DNA/RNA.

Outro indicador é a resposta enzimática dos microrganismos, a qual é bastante sensível e prática para detecção de impactos no solo (MARTINEZ-SALGADO et al., 2010). As enzimas podem ser agrupadas de duas formas: as que estão dentro da célula (endoenzimas) e as que são secretadas ou ligadas a membrana externa (exoenzimas). As

enzimas extracelulares são fundamentais para o funcionamento dos ecossistemas, uma vez que vários processos no solo dependem da atividade dessas enzimas, incluindo decomposição das plantas, formação/mineralização da matéria orgânica do solo e ciclagem de nutrientes (SOBUCKI et al., 2021) (Figura 3). As enzimas comumente avaliadas são as

relacionadas ao ciclo do carbono (celulases, beta glicosidases), nitrogênio (protease e urease), fósforo (fosfatase) e enxofre (arilsulfatase). As enzimas comportam-se de forma semelhante à matéria orgânica e podem ser consideradas como impressões digitais dos sistemas de manejo em que o solo foi submetido (BALOTA et al., 2013).

Embora os microrganismos mediem muitos processos ecossistêmicos, as relações entre a diversidade microbiana e as funções dos ecossistemas muitas vezes ainda não são compreendidas (LAURETO; CIANCIARUSO; SAMIA, 2015). Neste sentido ferramentas moleculares têm sido comumente utilizadas para avaliar a biodiversidade dos solos e as respostas de microrganismos e organismos da fauna edáfica a agentes estressores do solo (Figura 3D). Historicamente, as técnicas como eletroforese em gel de gradiente desnaturante (DGGE), eletroforese em gel de gradiente de temperatura (TGGE), polimorfismo de conformação de fita simples (SSP), análise de restrição de DNA ribossômico amplificado, polimorfismo de comprimento de fragmento de restrição terminal (RFLP), PCR de heterogeneidade de comprimento e espaçador intergênico ribossômico têm sido utilizadas para avaliar o polimorfismo, a diversidade e a estrutura microbiana. Contudo, estas metodologias possuem limitações para aplicação no monitoramento de recuperação de solos, pois são trabalhosas, caras e com baixo rendimento. Métodos mais modernos, com melhor rendimento e com custos reduzidos, facilitaram o emprego destas técnicas no monitoramento microbiano do solo, como é o caso dos sequenciamentos de segunda e terceira

geração e as análises de metagenômica (NKONGOLO; NARENDRULA-KOTHA, 2020). Contudo, até o momento essas técnicas ainda têm custo proibitivo para aplicações em larga escala e tem sido empregadas em estudos acadêmicos.

Outros indicadores biológicos do solo são os organismos da fauna edáfica ou fauna do solo. De acordo com o tamanho dos organismos a fauna do solo é classificada em microfauna (protozoários e nematoides), mesofauna (ácaros e colêmbolos) e macrofauna (moluscos, anelídeos e artrópodes) (SWIFT et al., 2010). Estes organismos podem atuar como bioindicadores da qualidade do solo, uma vez que são capazes de evidenciar características físico-químicas (VELÁZQUEZ et al., 2010) e estruturais do ambiente em que se encontram (ARIAS et al., 2007). Estes organismos são afetados pelo manejo do solo e pelo declínio da quantidade de matéria orgânica, resultante do cultivo intensivo (ROVEDDER et al., 2009), pela introdução de novas espécies vegetais e pelo uso de insumos (FRAGOSO et al., 1999). Os organismos da macrofauna edáfica, tais como as minhocas, cupins e formigas são componentes muito importantes da biota do solo, atuando como engenheiros do ecossistema, fragmentadores de serrapilheira, transformadores de serrapilheira ou predadores (SWIFT et al., 2010) e também apresentam variações na diversidade e abundância de acordo com as alterações de manejo do solo.

Características Desejáveis Para Bons Indicadores

A aplicabilidade de metodologias para avaliação do estado do solo necessita

que as técnicas desenvolvidas sejam de fácil mensuração, passível de monitoramento, confiáveis e claras para o entendimento de especialistas e produtores rurais (FERREIRA, 2005, RALISCH et al., 2017). Os indicadores qualitativos caracterizam as alterações nos processos e atividades do solo e das plantas, muitas vezes verificados em campo e podem ser conduzidos pelo próprio produtor rural. Esta metodologia garante a observação das mudanças existentes no ambiente, por isso apresentam seu uso em crescente expansão, devido seu caráter descritivo e analítico (ARAÚJO et al., 2012; RALISCH et al., 2017). Por outro lado, os indicadores quantitativos conseguem contextualizar as condições do solo pelos índices numéricos, gráficos e matemáticos (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009; PEZARICO et al., 2013), e requerem o uso de laboratórios especializados.

Cada vez mais tem-se ampliado a aplicação de indicadores para comparação dos componentes do solo e das possíveis influências nos recursos naturais e agrícolas em um período (ARAÚJO et al., 2012). Normalmente, são identificados obstáculos na interpretação dos resultados quantitativos, apesar da literatura ter ampliado o nível das informações. Embora os indicadores químicos, físicos e biológicos resultem em testes confiáveis, ainda é complicado definir resultados adequados para essas características em diferentes tipos de solos e culturas, devido à heterogeneidade dos solos, o que dificulta a reprodutibilidade das amostras em situações distintas daquelas em que o trabalho foi inicialmente desenvolvido (TÓRTOLA; CHAER, 2002).

Entender a qualidade do solo garante harmonia e equilíbrio entre os ecossistemas, aumento da produtividade na agricultura e agropecuária, sem gerar prejuízos a saúde e bem-estar animal, vegetal e humana. Assim, o uso dos indicadores possibilita abordagens de conservação e melhorias das condições do solo, das práticas e técnicas de manejo, e principalmente, nas tomadas de decisões por parte do Estado e dos produtores rurais (SILVEIRA, 2007).

Quais Fatores Interferem na Qualidade do Solo?

Muitos fatores podem afetar a qualidade do solo, sendo a maioria decorrente de ações antrópicas, como por exemplo o crescimento populacional e crise alimentícia, poluição, monocultura, manejo intensivo do solo e uso intensivo de pesticidas (EUGENIO; MCLAUGHLIN; PENNOCK, 2018). A utilização destas práticas tem ocasionado perda de matéria orgânica do solo, erosão e contaminação das águas subterrâneas, além de prejuízos a microbiota e seus processos bioquímicos (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007).

Há também o desmatamento, que é uma das causas da redução da qualidade dos solos. A vegetação natural fornece matéria orgânica e participa de fluxo de energia e troca de nutrientes com o solo, retém umidade, diminui a temperatura na superfície e mesmo com o intemperismo a vegetação se estabelece, mas com a retirada da vegetação natural ocorre o processo de desertificação da área (LANGE et al., 2019).

Os pesticidas vêm se mostrando um grande inimigo quando o assunto é

qualidade do solo, além do seu reconhecido risco a saúde pública (FERNANDES et al., 2020). Essas substâncias, além de promover proteção às lavouras contra pragas, ficam retidas no solo levando a fragilidade e diminuição da fertilidade por desencadear a morte da microbiota diminuindo assim sua biodiversidade (RODRIGUES et al., 2020).

As queimadas são uma prática realizada como ferramenta de preparo de pequenas áreas agrícolas e manejo de pastagem (CAPECHE, 2012; VIEIRA et al., 2016). O fogo é usado para limpar, controlar pragas e doenças, preparar o solo para o plantio, renovar pastagens, melhorar a oferta e qualidade dos alimentos, abrir novas áreas de plantio, entre outros (VIEIRA et al., 2016). A justificativa para essa prática, segundo os agricultores, é o baixo custo, o enriquecimento do solo pela cinza e os efeitos dela no pH e na disponibilidade de bases necessárias à nutrição das plantas (MOURA, 2004; FREITAS et al., 2013). Contudo, a queimada altera as características físicas, químicas, morfológicas e biológicas dos solos, como o pH, teor de nutrientes e carbono, biodiversidade da micro, meso e macrofauna, temperatura, porosidade e densidade (CAPECHE, 2012). Ainda segundo Capeche (2012), após a queimada o solo fica exposto ao sol (ressecamento) e a chuva (erosão), o que reduz sua capacidade produtiva. As queimadas são proibidas sobre a proteção da vegetação nativa, segundo a Lei n.º 12.651, de 25 de maio de 2012 Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, que trata das penalidades. Entretanto há situações que podem ser permitidas, como: i) em locais

ou regiões que justifiquem o uso do fogo em práticas agropastoris ou florestais, desde que com autorização do órgão ambiental; ii) em unidades de conservação para conservar a vegetação nativa; e iii) atividade de pesquisa científica (BRASIL, 1998, 2012).

Como Melhorar a Qualidade do Solo?

O solo fornece serviços ecossistêmicos e possui indicadores físicos, químicos e biológicos que podem ser utilizados para avaliar a sua qualidade, o que torna possível direcionar práticas para sua recuperação ou melhoria dos indicadores (CHERUBIN et al., 2015). Essas práticas visam melhorar a densidade do solo (DS), capacidade de troca catiônica (CTC), biomassa microbiana, biomassa orgânica (BO), nutrientes como nitrogênio (N), o fósforo (P), o potássio (K) e carbono (C) e disponibilidade de água (BÜNEMANN et al., 2018; TRAZZI et al., 2018).

O biocarvão é um resíduo de vegetais pirolisados em ambiente fechado, dessa forma conservam grande quantidade de biomassa carbônica, que quando aplicado ao solo apresenta melhora na CTC, aumento da atividade microbiana, disposição de nutrientes e a capacidade de retenção de água pelo solo, sem causar a sua saturação (TRAZZI et al., 2018). Mesmo com essas vantagens o biocarvão ainda requer mais estudos sobre o impacto de sua utilização na recuperação da qualidade do solo.

A utilização de gramíneas para cobertura também tem sido estudada para melhoria da qualidade do solo, principalmente em consórcio com mais de uma espécie, a fim de se evitar a erosão

hídrica, perda de água e perda das camadas superficiais do solo, aumentando a sua qualidade física (BLAINSKI et al., 2012). A utilização de gramíneas também favorece a disponibilidade de água no solo e sua porosidade, colaborando com o aumento da atividade microbiana, assim como o uso de leguminosas, que aumentam a CTC, a DS, disponibilidade de nutrientes e de água, favorecendo a atividade de fungos micorrízicos nos ambientes edáficos aumentando a qualidade dos solos em que são utilizados (IMBANA et al., 2021).

Os resíduos vegetais acumulados no solo, conhecidos como serapilheira, podem agir melhorando a fertilidade, pois durante a sua decomposição disponibilizam nutrientes como o nitrogênio, fósforo, potássio e carbono orgânico que favorecem o crescimento de plantas e a funcionalidade da microbiota edáfica, fornecendo um serviço de reciclagem de nutrientes da biomassa orgânica (SILVA et al., 2021).

Práticas como plantio direto e rotação de culturas podem promover diversos benefícios ao solo. O plantio direto é capaz de reduzir as ações nocivas da erosão do solo, melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e mitigar os efeitos provocados pelas emissões de gases de efeito estufa, incrementar a biodiversidade, contribuir positivamente para o ciclo hidrológico e ainda não degradar o solo (MOTTER; ALMEIDA, 2015). A rotação de culturas é um dos requisitos para a qualidade do sistema plantio direto, pois aumenta a qualidade da matéria orgânica depositada na camada superficial do solo, além de reduzir o estresse do solo por introduzir

cultivares com necessidades diferentes de nutrientes e água ao longo de seu desenvolvimento. A ausência dessa prática acarreta o surgimento de alterações de ordem química, física e biológica no solo, que podem comprometer a estabilidade do sistema produtivo (FRANCHINI et al., 2011).

Sistemas integrados de plantio também podem ajudar na qualidade do solo. O sistema agroflorestal tem potencial em melhorar a qualidade do solo por trazer benefícios, como: i) aumento do carbono orgânico; ii) enriquecimento de nutrientes no solo; e iii) benefícios a biota do solo (DOLLINGER; JOSE, 2018). A implementação de Sistemas Integrados Lavoura-Pecuária-Floresta (ILFS) aumenta a atividade microbiana e melhora a qualidade do solo em escalas de tempo curtas a médias. Isso ocorre, por exemplo, devido haver mais serapilheira no solo. Após decomposta, haverá mais nutrientes para as plantas e microfauna do solo. Além disso, a diversificação de culturas, pastagem e a presença de gado e esterco faz com que haja mudanças nas comunidades microbiana do solo que contribuirá para a sua melhora em relação às pastagens convencionais (ZAGO et al., 2020).

Fatores pedológicos como o tipo de solo, a latitude, o clima, a variação sazonal, entre outros podem influenciar nas propriedades do solo. É importante conhecer os atributos do solo para determinar o melhor manejo de forma a aumentar a sua qualidade. Os solos diferem entre si quanto a disponibilidade de matéria orgânica, nutrientes e aspectos físicos, e a identificação desses conjuntos indica a capacidade de melhorar o

funcionamento do solo e a sua utilização em serviços ecossistêmicos, diminuindo assim a sua degradação (BÜNEMANN et al., 2018).

CONCLUSÃO

Os indicadores de qualidade do solo têm se mostrado eficientes para detectar impactos que levam a degradação desse ecossistema, e por isso se consolidam como uma importante ferramenta fornecendo dados que auxiliam no manejo adequado do solo e em sua recuperação. Entretanto, se utilizados de forma isolada não detectam alterações precoces na perda de estrutura e composição do solo. Tanto os fatores causadores de impactos quanto aqueles relacionados às práticas conservacionistas têm seus efeitos no solo detectados pela ação de indicadores de qualidade em escalas que variam desde o diagnóstico rápido no campo quanto às técnicas ultrasensíveis desenvolvidas nas universidades e centros de pesquisa.

REFERÊNCIA

ALLEN, D. E.; SINGH, B. P.; DALAL, R. C. Soil Health Indicators Under Climate Change: A Review of Current Knowledge. In: SINGH, B.; COWIE, A.; CHAN, K. (Org.). **Soil Health and Climate Change. Soil Biology**. 29. ed. Berlin: Springer, 2011. p. 25–45. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-20256-8_2>.

ALVES, T. D. S. et al. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 2, 2011. Disponível em:

<<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/4841>>.

ARAÚJO, A. S. F. de; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 3, p. 66–75, 2007.

ARAÚJO, E. A. de et al. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 5, n. 1, p. 187–206, 2012.

ARIAS, A. R. L. et al. Utilização de bioindicadores na avaliação de impacto e no monitoramento da contaminação de rios e córregos por agrotóxicos. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 12, n. 1, p. 61–72, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232007000100011&lng=pt&tlng=pt>.

BALOTA, E. L. et al. Enzimas e seu papel na qualidade do solo. In: ARAÚJO, A. P.; ALVES, B. J. R. (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 189–249.

BATEY, T.; MCKENZIE, D. C. Soil compaction: identification directly in the field. **Soil Use and Management**, v. 22, n. 2, p. 123–131, 2006. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-2743.2006.00017.x>>.

BAULCOMBE, D. et al. **Reaping the benefits: science and the sustainable intensification of global agriculture**. The Royal Society, 2009.

BLAINSKI, É. et al. Qualidade física de um latossolo sob plantio direto

influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 79–87, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832012000100009&lng=pt&tlng=pt>.

BRADY, N.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências**. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1998.

_____. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1966**. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2012.

BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038071718300294>>.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van. Determinação de matéria orgânica. In: RAIJ, B. van et al. (Org.). **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. São Paulo: Instituto Agronômico Campinas, 2001. p. 173–180.

CAPECHE, C. L. Impactos das queimadas na qualidade do solo - degradação ambiental e manejo e conservação do solo e água. **Encontro científico do parque estadual dos três picos**. Cachoeiras de Macacu, RJ: INEA, 2012, 2012. p. 82.

CHAVEIRO, A. C. e et al. Qualidade física e química do solo em sistema de plantio direto cultivado com hortaliças – Uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, p. e32711931564, 2022. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/31564>>.

CHERUBIN, M. R. et al. Qualidade física, química e biológica de um latossolo com diferentes manejos e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 615–625, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832015000200615&lng=pt&tlng=pt>.

CONTE, O. et al. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1301–1309, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2011001000026&lng=pt&tlng=pt>.

CORWIN, D. L. et al. Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil. **Geoderma**, v. 114, n. 3–4, p. 231–259, 2003. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706103000430>>.

DANTAS, J. O. et al. Artrópodes e microbiota do solo em sistema agroecológico de produção no semiárido nordestino. **Agroecologia: métodos e técnicas para uma agricultura sustentável**. Guarujá, SP: Científica Digital, 2021. v. 2. p. 267–281. Disponível em:

<<http://www.editoracientifica.org/books/isbn/978-65-87196-73-2>>.

DOLLINGER, J.; JOSE, S. Agroforestry for soil health. **Agroforestry Systems**, v. 92, n. 2, p. 213–219, 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10457-018-0223-9>>.

DUTRA, R. M. S.; SOUZA, M. M. O. de. Cerrado, revolução verde e a evolução do consumo de agrotóxicos. **Sociedade & Natureza**, v. 29, n. 3, p. 469–484, 2017. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/sociedade/natureza/article/view/36367>>.

EUGENIO, N. R.; MCLAUGHLIN, M.; PENNOCK, D. **Soil Pollution: a hidden reality**. Rome: FAO, 2018.

FERNANDES, C. L. F. et al. Quais agrotóxicos estão contaminando os solos brasileiros? **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, p. e114932569, 2020. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/2569>>.

FERREIRA, J. M. L. **Indicadores de qualidade do solo e de sustentabilidade em cafeeiros arborizados**. 2005. 107 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de

Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, 2005.

FRAGOSO, C. et al. A survey of tropical earthworms: taxonomy, biogeography and environmental plasticity. In: LAVELLE, P.; BRUSSAARD, L.; HENDRIX, P. (Org.). **Earthworm Management in Tropical Agroecosystems**. CABI Publishing, 1999. p. 1–28.

FRANCHINI, J. C. et al. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011.

FREITAS, I. C. de et al. Agroecossistemas de produção familiar da Amazônia e seus impactos nos atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1310–1317, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662013001200009&lng=pt&tlng=pt>.

FREITAS, L. de et al. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Unimar Ciências**, v. 26, n. 1–2, p. 8–25, 2017.

GOMES, T. O. et al. Aplicação do diagnóstico rápido da estrutura do solo (DRES) no projeto de assentamento Nossa Senhora do Perpétuo Socorro. 2018, 2018. p. 10.

GREEN, S. M. et al. Soil functions and ecosystem services research in the Chinese karst Critical Zone. **Chemical Geology**, v. 527, p. 119107, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009254119301160>>.

IMBANA, R. et al. Leguminosas como plantas de cobertura para melhoria da qualidade do solo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 16, n. 4, p. 351–357, 2021. Disponível em: <<https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/8861>>.

JÚNIOR, C. **Matéria orgânica, capacidade de troca catiônica e acidez potencial no solo com dezoito cultivares de Cana-de-Açúcar**. 2011. 119 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias., 2011.

KAMAL, S.; PRASAD, R.; VARMA, A. Soil Microbial Diversity in Relation to Heavy Metals. **Soil Heavy Metals. Soil Biology**. Berlin: Springer, 2010. p. 31–63. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-02436-8_3>.

LANGE, A. et al. Degradação do solo e pecuária extensiva no norte de Mato Grosso. **Nativa**, v. 7, n. 6, p. 642, 2019. Disponível em: <<http://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/6838>>.

LAURETO, L. M. O.; CIANCIARUSO, M. V.; SAMIA, D. S. M. Functional diversity: an overview of its history and applicability. **Natureza & Conservação**, v. 13, n. 2, p. 112–116, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1679007315000390>>.

LEITE, M. J. de H. Características gerais dos principais solos da região semiárida. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218**, v. 3, n. 10, p. e3101964, 2022. Disponível em: <<https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/1964>>.

MANTOVANELLI, B. C. et al. Qualidade física de solos do Brasil e aplicabilidade de métodos para estimativas de retenção de água no solo: A revisão. **Revista Edutec**, v. 3, n. 2, p. 87–100, 2022.

MARTINEZ-SALGADO, M. M. et al. Biological soil quality indicators: a review. **Current research, technology and education topics in applied microbiology and microbial biotechnology**, v. 1, n. 1, p. 319–328, 2010.

MENDES, I. de C.; SOUSA, D. M. G. de; JUNIOR, F. B. dos R. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 191–209, 2015.

MOMOLI, R. S. et al. Atributos morfológicos e físicos dos solos das trilhas turísticas da APA das nascentes do Rio Vermelho, Goiás. **Revista Formação**, v. 29, n. 54, p. 167–197, 2022.

MOTTER, P.; ALMEIDA, H. G. de. **Plantio direto: A tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira**. Foz do Iguaçu: Parque Itaipu, 2015.

MOURA, E. G. Agroambientes de transição avaliados numa perspectiva da agricultura familiar. In: MOURA, E. G.

(Org.). **Agroambientes de transição entre o trópico úmido e o semi-árido do Brasil**. São Luís: UEMA, 2004. p. 15–51.

NKONGOLO, K. K.; NARENDRULA-KOTHA, R. Advances in monitoring soil microbial community dynamic and function. **Journal of Applied Genetics**, v. 61, n. 2, p. 249–263, 2020. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s13353-020-00549-5>>.

OLIVEIRA, J. P. C. de et al. A utilização inadequada do solo e seus impactos na degradação das áreas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e35101219948, 2021. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/19948>>.

OLIVEIRA FILHO, L. C. I.; BARETTA, D.; SANTOS, J. C. P. Influência dos processos de recuperação do solo após mineração de carvão sobre a mesofauna edáfica em Lauro Müller, Santa Catarina, Brasil. **Biotemas**, v. 27, n. 2, p. 69, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/biotemas/article/view/2175-7925.2014v27n2p69>>.

PAIVA, I. A. de; RITA, Y. L.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. Knowledge and use of visual soil structure assessment methods in Brazil – A survey. **Soil and Tillage Research**, v. 204, p. 104704, 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198720304864>>.

PEIXOTO, R. S. et al. Soil aggregation and bacterial community structure as affected by tillage and cover cropping in

the Brazilian Cerrados. **Soil and Tillage Research**, v. 90, n. 1–2, p. 16–28, 2006. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198705002229>>.

PEREIRA, P. et al. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 5, p. 7–13, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2468584417300326>>.

PEZARICO, C. R. et al. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 56, n. 1, p. 40–47, 2013. Disponível em: <<http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/rca.2013.004>>.

PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, 2011. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/5507>>.

RALISCH, R. et al. **Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo – DRES**. Londrina: Embrapa Soja, 2017.

REIS JUNIOR, F. B. dos et al. **Uso de ferramentas moleculares em estudos da diversidade de microrganismos do solo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002.

REIS JUNIOR, F. B. **Biomassa microbiana do solo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007.

RODRIGUES, M. dos S. et al. EFEITO DE AGROTÓXICOS SOBRE A MICROBIOTA DO SOLO. **Revista Multidisciplinar De Educação E Meio Ambiente**, v. 1, n. 2, p. 1, 2020.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010.

ROVEDDER, A. P. M. et al. Organismos edáficos como bioindicadores da recuperação de solos degradados por arenização no Bioma Pampa. **Ciência Rural**, v. 39, n. 4, p. 1051–1058, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782009000400015&lng=pt&tlng=pt>.

SAYGIN, S. D. et al. Comparison of different aggregate stability approaches for loamy sand soils. **Applied Soil Ecology**, v. 54, p. 1–6, 2012. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0929139311003179>>.

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**, p. 1–4, 2007.

SILVA, R. M. da et al. Fauna do solo como bioindicadora da qualidade do solo em cultivos de cana-de-açúcar: um referencial teórico. **Research, Society and**

Development, v. 10, n. 10, p. e239101018741, 2021. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/18741>>.

SILVA, M. de O. et al. Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853–6875, 2021. Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/23374/18777>>.

SILVEIRA, A. de O. **Atividades enzimáticas como indicadores biológicos da qualidade de solos agrícolas do Rio Grande do Sul**. 2007. 1–94 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, 2007.

SOARES, R. et al. Avaliação da Estabilidade de Agregados em Marcadores Ambientais Terrestres do Antropoceno Submetidos a Diferentes Períodos de Pousio. **Rev. Virtual Quim**, v. 10, n. 6, p. 1693–1718, 2018.

SOBUCKI, L. et al. Contribution of enzymes to soil quality and the evolution of research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 2021. Disponível em: <<https://www.rbcjournal.org/article/contribution-of-enzymes-to-soil-quality-and-the-evolution-of-research-in-brazil/>>.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E.; GOEDERT, W. J. Manejo da fertilidade do solo no Cerrado. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. da (Org.).

Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 203–260.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1301–1309, 2013.

STEVENSON, F. J. **Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions.** John Wiley & Sons, 1994.

SWIFT, M. J. et al. O inventário da biodiversidade biológica do solo: conceitos e orientações gerais. **Manual de biologia dos solos tropicais: amostragem e caracterização da biodiversidade.** Lavras: Editora UFLA, 2010. p. 23–41.

TÓRTOLA, M.; CHAER, G. Tópicos ciência do solo. **Tópicos ciência do solo.** 2002. p. 1995–276.

TRAZZI, P. A. et al. BIOCARVÃO: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 875–887, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/32128>>.

VELASQUEZ, E.; LAVELLE, P. Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil based ecosystem services in agricultural landscapes. **Acta Oecologica**, v. 100, p. 103446, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1146609X18302613>>.

VELÁZQUEZ, J. et al. Environmental diagnosis: Integrating biodiversity conservation in management of Natura 2000 forest spaces. **Journal for Nature Conservation**, v. 18, n. 4, p. 309–317, 2010. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1617138110000063>>.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 743–755, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832009000400001&lng=pt&tlng=pt>.

VIEIRA, A. C. et al. Fogo e seus efeitos na qualidade do solo de pastagem. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 09, n. 06, p. 1703–1711, 2016.

WALL, D. H. et al. **Soil Ecology and Ecosystem Services.** Oxford University Press, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199575923.001.0001>>.

ZAGO, L. de M. S. et al. Biochemical indicators drive soil quality in integrated crop–livestock–forestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 6, p. 2249–2260, 2020. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s10457-020-00547-w>>.

ZENG, Q. et al. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China). **CATENA**, v. 167, p. 276–283, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0341816218301759>>.