



Indicadores de qualidade do solo em cultivos de plantas forrageiras: uma revisão

Soil quality indicators in forage crops: a review

Lana Raissa Barros Alves Cordeiro¹, Raul Caco Alves Bezerra¹, Agda Raiany Mota dos Santos¹, Jamiles Carvalho Gonçalves de Souza Henrique¹, Glícia Rafaela Freitas da Fonsêca¹, Mauricio Luiz de Mello Vieira Leite¹

¹Universidade Federal Rural de Pernambuco, Serra Talhada, Pernambuco, Brasil

Contato: nopalea21@yahoo.com.br

Palavras-Chave

qualidade ambiental
física do solo
química do solo
biologia do solo
manejo do solo

Key-word

environmental Quality
soil physics
soil chemistry
soil biology
soil management

RESUMO

O solo é a base de sustentação de todo habitat, além de ser um recurso natural e dinâmico de crucial importância para todo o ecossistema, devido a sua capacidade de promover a produção de alimentos e ser fundamental na qualidade ambiental e produtividade biológica. Estudos relacionados à qualidade do solo estão sendo cada vez mais procurados, e para essa avaliação existe um conjunto de indicadores dos solos utilizados. Diante disso, objetivou-se com esse estudo realizar uma revisão de literatura a fim de discutir de forma clara e concisa a respeito do solo e dos seus indicadores de qualidade em cultivos de plantas forrageiras, através de artigos publicados entre os anos 1986 até 2022 nas bases de dados Scopus, SciELO, Periódicos Capes e Google Acadêmico. Foram utilizadas 55 referências que se atentaram a responder à pergunta: Quais os benefícios do cultivo de plantas forrageiras para melhoria da qualidade do solo? A avaliação da qualidade do solo está relacionada com o uso dos indicadores físicos, químicos e biológicos, no qual a seleção dos mesmos é importante para a avaliação dessa qualidade. Um bom indicador tem a capacidade de mostrar a dinâmica do solo, contribuindo assim com a maior eficiência do manejo a ser utilizado. A associação das plantas forrageiras cultivadas em cada indicador de qualidade do solo, demonstrou uma influência positiva que melhoram a agregação das partículas do solo, aeração, redução da compactação, difusão de oxigênio, distribuição de nutrientes no solo, e na presença dos fungos micorrízicos arbusculares que melhoram as propriedades físicas do solo.

ABSTRACT

Soil is the support base for every habitat, in addition to being a natural and dynamic resource of crucial importance for the entire ecosystem, due to its ability to promote food production and being fundamental to environmental quality and biological productivity. Studies related to soil quality are increasingly sought after, and for this assessment there is a set of soil indicators used. In view of this, the aim of this study was to carry out a literature review in order to discuss in a clear and concise way about the soil and its quality indicators in forage plant cultivation, through articles published between the years 1986 and 2022 in the databases Scopus, SciELO, Periódicos Capes and Google Scholar data. 55 references were used to answer the question: What are the benefits of growing forage plants to improve soil quality? The assessment of soil quality is related to the use of physical, chemical and biological indicators, in which their selection is important for the assessment of this quality. A good indicator has the ability to show the functioning of the soil, thus contributing to greater efficiency in the management to be used. The association of cultivated forage plants with each soil quality indicator demonstrated a positive influence, improving the aggregation of soil particles, aeration, reduction of compaction, oxygen diffusion, distribution of nutrients in the soil, and the presence of mycorrhizal fungi. arbuscular plants that improve the physical properties of the soil.

Informações do artigo

Recebido: 02 de março, 2023
Aceito: 21 de novembro, 2023
Publicado: 01 de dezembro, 2023

Introdução

As plantas forrageiras são utilizadas como fonte de alimento para os animais ruminantes, sendo uma das opções mais econômicas disponíveis no setor pecuário (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2019).

Segundo Almeida (2014), as plantas forrageiras necessitam de maior eficiência na produção, a qual se dá através da melhoria nas condições da qualidade do solo (SOUZA, 2018), pois são plantas exigentes nas características físico-químicas do solo (NEVES et al., 2020).

A qualidade do solo é um assunto muito discutido, especialmente em relação à sua definição e ao conjunto de atributos que podem determiná-la, levando em consideração sua diversidade química, física e biológica (MELO et al., 2017).

Desse modo, a qualidade do solo pode ser definida como a manutenção do funcionamento do sistema biológico que permeia o solo, frente as alterações em seu uso, eliminando assim efeitos prejudiciais ao seu manejo (MATOS et al., 2016).

A qualidade do solo pode ser avaliada através do uso de indicadores, os quais são atributos que avaliam as condições do solo e promovem a manutenção da sustentabilidade produtiva dos ambientes, podendo ser classificados como indicadores físicos, químicos e biológicos (SILVA et al., 2021). E, atualmente, na comunidade científica, tem-se aumentado o interesse por indicadores do funcionamento do sistema do solo, baseados na atividade microbiana, que sozinho ou em agrupamentos com outros indicadores convencionais, podem ajudar na orientação dos produtores a manejarem seus solos de forma mais sustentável e produtiva (ARAGÃO et al., 2012).

Deste modo, o conhecimento da qualidade do solo é imprescindível, pois seu uso reflete na produtividade e sustentabilidade de agrossistemas, se tornando um indicador fundamental quando se deseja obter informações sobre o manejo e conservação do solo e garantir a tomada de decisões na melhoria da utilização desse recurso (ARCOVERDE, 2013), se tornando cada vez mais, um mecanismo valioso e eficiente na sua avaliação por meio desses indicadores, para então definir a capacidade de se manter e viabilizar no presente e no futuro (SILVA et al., 2020).

Com base nessas informações, objetivou-se com esta revisão bibliográfica apresentar uma discussão clara e concisa a respeito da qualidade do solo e dos seus respectivos indicadores de qualidade de solos sob cultivos de plantas forrageiras.

Material e Métodos

O presente estudo ocorre com o uso da técnica de revisão de literatura, que consiste em uma pesquisa aprofundada e sistemática de fontes secundárias, com o objetivo de explorar e descrever aspectos qualitativos dos indicadores de qualidade do solo em sistemas de produção de forragens.

A revisão da literatura permite situar o problema de pesquisa no contexto teórico e metodológico, identificar as lacunas existentes na literatura, delimitar o objetivo e a justificativa da pesquisa, e fundamentar as escolhas teóricas e metodológicas do pesquisador (BAEK et al., 2018).

Esse trabalho utilizou como fontes de informação os principais estudos nacionais e internacionais sobre o assunto, publicados em revistas, livros, trabalhos acadêmicos e bases de dados online, tais como: Scopus, SciELO, Periódicos Capes e Google Acadêmico. O texto segue uma abordagem científica, com rigor metodológico e linguagem adequada ao tema.

Os termos utilizados para o levantamento bibliográfico foram: qualidade ambiental, qualidade do solo, indicadores de qualidade do solo, indicadores físicos, indicadores químicos, indicadores biológicos, qualidade do solo em cultivo de plantas forrageiras, manejo do solo e cultivo de forrageiras na melhoria da qualidade do solo. Para este, foram levados em consideração os trabalhos dos anos de 1986 até 2022, totalizando 55 referências, sendo 37 trabalhos dos últimos 10 anos e 18 trabalhos posterior a 10 anos.

Os indicadores de qualidade do solo são ferramentas úteis para avaliar o impacto das plantas forrageiras na sustentabilidade dos agroecossistemas. Neste trabalho, realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre os principais indicadores de qualidade do solo relacionados às plantas forrageiras, tais como matéria orgânica, agregação, porosidade, infiltração, erosão, atividade biológica, diversidade microbiana e disponibilidade de nutrientes.

A pesquisa foi baseada em artigos científicos publicados em periódicos indexados, que abordaram experiências de campo com plantas forrageiras em diferentes condições ambientais. Os artigos selecionados foram aqueles que apresentaram dados empíricos e análises estatísticas sobre os efeitos das plantas forrageiras na qualidade do solo. Foram excluídos os artigos que não tinham relação com o objetivo do estudo, os que eram repetidos ou duplicados e os que eram de revisão bibliográfica. A questão que orientou a pesquisa foi: Quais os benefícios das plantas forrageiras para melhoria da qualidade do solo?

Após a coleta do material, a revisão bibliográfica foi desenvolvida a fim de descrever sobre a qualidade do solo, bem como apresentar os indicadores de qualidade do solo, indicadores físicos, químicos e biológicos, discutindo a melhoria da qualidade do solo sob cultivos de plantas forrageiras.

Resultados e Discussões

Através de uma minuciosa pesquisa bibliográfica, resultando em mais de 70 trabalhos, dentre artigos, monografias, dissertações e teses, foram designados para a realização dessa revisão 55 trabalhos, os quais estavam publicados em periódicos com um bom fator de impacto.

Diante disso, os trabalhos foram organizados de acordo com os temas, sendo: 10 trabalhos sobre qualidade do solo, 10 trabalhos sobre indicadores de qualidade do solo, 5 trabalhos sobre indicadores físicos do solo, 5 trabalhos sobre indicadores químicos do solo, 14 trabalhos de indicadores biológicos do solo e 11 trabalhos sobre qualidade do solo em cultivos de plantas forrageiras.

O solo

O solo pode ser definido como um grupo ativo de corpos naturais, composto por partes sólidas, líquidas e gasosas, com várias dimensões, formados por materiais orgânicos e minerais, ocupando grande parte do manto superficial do planeta. Possui matéria viva de todas as ordens, de forma intensamente variável e natural, e apresenta alterações consequentes de interferências antrópicas (MOLINA JÚNIOR, 2017).

O solo é o pilar de sustentação de todo habitat vivo, resultante da interação dos fatores de sua formação: relevo, clima, organismos e tempo perante um material de origem, que possa garantir a sustentação da vegetação. É considerado um recurso natural de extrema importância, por possuir a capacidade de proporcionar a produção de alimentos, tornando-se fundamental na proteção ambiental e desempenhando funções importantes, como um meio para o desenvolvimento vegetal, armazena e promove a ciclagem de nutrientes e regula o fluxo da água para o lençol freático (SILVA et al., 2020).

O solo é um meio dinâmico e vivo que suporta o balanço global do ecossistema (FERRAZ JÚNIOR, 2018), e também uma associação entre as propriedades físicas, químicas e biológicas que o habilitam a manifestar as suas funções, conceito que está inteiramente ligado à importância do solo para o desempenho dos ecossistemas (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009; DEON et al., 2020).

Segundo Chaer (2001) o solo também pode ser considerado como a junção entre a qualidade ambiental e a produção sustentável (DEON, 2020).

Porém, estes exibem ocupação rural desajustada em relação ao seu crescimento populacional, o que pode comprometer na sua qualidade (CHAVES et al., 2012). Por este motivo, compreender e determinar o impacto do uso do solo é primordial no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (BAVOSO et al., 2010).

A qualidade do solo

A qualidade do solo é um tema muito procurado atualmente pela comunidade científica (MELO et al., 2017), além de ser um aspecto de fundamental importância para o sucesso da produção agropecuária, devido a sua capacidade de funcionamento do solo. A qualidade do solo pode ser determinada mediante diversas variáveis, que são representadas por indicadores físicos (densidade do solo, porosidade e estabilidade dos agregados), químicos (pH, macro e micronutrientes e matéria orgânica) e biológicos (biota do solo), da forma que serão avaliados através de metodologias criadas para a avaliação da qualidade do solo (ARAÚJO et al., 2012; SILVA et al., 2020).

A qualidade do solo está diretamente relacionada ao seu uso e manejo, no qual os atributos do solo podem ser alterados pelas práticas de manejo afetando na sustentabilidade ambiental e resultando na perda de qualidade e, conseqüentemente, da produtividade agrícola (NIERO et al., 2010; CHAVES et al., 2012).

Portanto, compreender e quantificar o impacto do uso e manejo do solo é necessário para o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis (BAVOSO et al., 2010), pois através disso, irá definir através disso, irá definir o potencial de capacidade do solo em manter a sustentabilidade da produção mundial de alimentos (SOBUCKI et al., 2019), e sua competência de promover a produtividade biológica mantendo a qualidade ambiental (FERRAZ JÚNIOR, 2018). Do ponto de vista agrônomo, a qualidade do solo sustenta a produtividade, bem como a promoção da saúde vegetal e animal. Desse modo, o solo bem equilibrado proporciona um desenvolvimento vigoroso, oferecendo condições de expressar seu potencial genético produtivo (WU et al., 2017), além de manifestar o crescimento das plantas, podendo a qualidade do solo ser classificada como alta, média ou baixa para determinada finalidade (FERNANDES, 2019).

As análises de qualidade do solo por meio desses indicadores se tornaram um mecanismo importante, cada vez mais eficaz para definir a capacidade do sistema de se manter e viabilizar-se no presente e no futuro. Essa avaliação é importante para identificar prováveis causas da falta de sustentabilidade de cultivos sucessivos e averiguar a qualidade daquele solo (SILVA et al., 2020).

A análise da qualidade do solo colabora na compreensão dos limites de cada solo, assim como esclarece em relação às medidas necessárias para a sua recuperação em caso de degradação (BRADY; WEIL, 2013). Para uma análise exata, deve-se considerar a qualidade ambiental, a sustentabilidade agrônoma e a viabilidade econômica (MUKHERJEE; LAL, 2014).

Indicadores de qualidade do solo

A seleção de indicadores é fundamental para a avaliação da qualidade do solo. Os quais se referem a atributos que influenciam a capacidade do solo para realizar a produção de culturas ou funções ambientais (FERNANDES, 2019).

Os indicadores de qualidade do solo (Tabela 2) podem ser representados através de propriedades físicas, químicas e biológicas relacionadas aos diversos processos que ocorrem, como: retenção hídrica, ciclagem de nutrientes, potencial de lixiviação, potencial de erosão, atividade biológica e entre outros.

As propriedades físicas dos solos são responsáveis pelos mecanismos de atenuação física de poluentes, como filtração e lixiviação, possibilitando ainda condições para que os processos de atenuação química e biológica possam ocorrer (CETESB, 2022), e os indicadores do solo mais utilizados são: textura, porosidade, densidade e estabilidade de agregados.

As propriedades químicas do solo são responsáveis pelos principais mecanismos de atenuação de poluentes no meio, sendo parceira da atividade biológica (CETESB, 2022).

Tabela 1. Conjunto mínimo de atributos físicos, químicos e biológicos afim de avaliar a qualidade do solo e suas condições

Atributos de qualidade do solo	Indicadores de qualidade	Descrições e condições do solo	Autores (Ano)
Atividade biológica	Aumento de CO ₂ Biodiversidade Atividade enzimática	> média dos solos > média dos solos > média dos solos	Santana e Bahia Filho (1999)
Matéria Orgânica	Cor da camada superficial Carbono orgânico	Preta ou marrom escuro > 1%	Santana e Bahia Filho (1999)
Acidez do solo	pH	5,6 a 6,5	Santana e Bahia Filho (1999)
Toxidez de alumínio	Sistema radicular Saturação de Alumínio	Raízes rasas com ângulos acentuados e desenvolvimento limitado < 20%	Santana e Bahia Filho (1999)
Fósforo	P extraído	> 10 % solo argiloso > 20% solo de textura média > 30% solo de textura arenosa	Santana e Bahia Filho (1999)
Mobilização de nutrientes	Aspecto da cultura (vigor, cor) Colheita Saturação de bases (V%) Equilíbrio de bases (%CEC): - Saturação de Ca - Saturação de Mg - Saturação de K	Cor verde escura -> saudável > média regional para os melhores produtores 40 a 60% - 60% 15% 5%	Santana e Bahia Filho (1999)
Compactação do solo	Alagamento Sistema radicular Taxa de infiltração Densidade do solo Penetração das raízes no solo	Quando a água penetra de forma lenta ou empoça após uma forte chuva Raízes rasas com ângulos acentuados e desenvolvimento limitado > média dos solos < média dos solos Não penetra devido camada estar adensada	Santana e Bahia Filho (1999)
Erosão do solo	Perda do solo Espessura do horizonte A Medição local de perda do solo	Sinais de erosão laminar ou sulcos > média dos solos < média dos solos	Santana e Bahia Filho (1999)
Cobertura do solo	% de cobertura permanente na superfície do solo no início da estação das chuvas	> 70%	Santana e Bahia Filho (1999)

Fonte: Autores (2023)

Tabela 2. Atributos físicos, químicos e biológicos e suas interações com a qualidade do solo

Atributos	Indicadores	Relação com a qualidade do solo	Autores (Ano)
Físicos	Estrutura do solo Infiltração de água e densidade do solo Capacidade de retenção de umidade	Representa retenção e transporte de água e nutrientes Movimentação da água e a porosidade do solo Disponibilidade e armazenamento de água	Doran; Parkin (1994)
Químicos	Matéria Orgânica pH Condutividade elétrica Conteúdo de N, P e K	Representa fertilidade, estrutura e estabilidade do solo Atividade biológica e disponibilidade de nutrientes Crescimento vegetal e atividade microbiana Disponibilização dos nutrientes para a planta	Doran; Parkin (1994)
Físicos	Biomassa microbiana Mineralização de Nutrientes Respiração do solo Atividade enzimática	Representa atividade microbiana e transferência de nutrientes Produtividade do solo e seu potencial de suprir os nutrientes Existência de atividade microbiana Atividade microbiana acelerada no solo	Doran; Parkin (1994)

Fonte: Autores (2023)

Os atributos químicos mais utilizados são: acidez do pH, salinidade, teor de carbono total ou orgânico, fósforo disponível, capacidade de troca iônica, entre outros (SILVA et al., 2020). As propriedades biológicas do solo são importantes tanto no que se refere à ciclagem dos nutrientes, como também na estimativa da capacidade do solo para o crescimento vegetal (ARAÚJO et al., 2012), e devem ser avaliadas quanto às medidas consideráveis de diferentes organismos do solo, biomassa microbiana, atividade enzimática e entre outros (MAIA, 2013).

A sugestão é que esses indicadores sejam relacionados com cinco funções do solo: habilidade de regular e compartimentalizar o fluxo de água; habilidade de regular e compartimentalizar o fluxo de elementos químicos; promover e sustentar o desenvolvimento de raízes; manter um habitat biológico adequado; e responder ao manejo, resistindo à degradação. Os atributos recebem níveis de equilíbrio relativos a valorização ambiental e socioeconômicas e com base nos três componentes da qualidade de solo (VEZZANI; MIELNICZUCK, 2009). Os atributos mais sensíveis são mais almejados como indicadores. Dentre esses atributos, os que são mais influenciados são: profundidade do solo, matéria orgânica, respiração, agregação, textura, densidade aparente, infiltração, disponibilidade de nutrientes e capacidade de retenção. Os indicadores precisam ser medidos para avaliar mudanças na qualidade do solo resultantes de vários sistemas de manejo. Muitos indicadores do solo agem mutuamente com outros e, portanto, os valores de um são afetados por um ou mais desses parâmetros selecionados (FERNANDES, 2019).

As mudanças na qualidade do solo podem ser avaliadas medindo indicadores apropriados e comparando-os com os valores desejados (limites críticos), em diferentes intervalos de tempo, para um uso específico em um sistema selecionado. Esse sistema de monitoramento fornecerá informações sobre a eficácia do sistema de cultivo selecionado, práticas de uso do solo, tecnologias e políticas. Os sistemas que melhoram o desempenho dos indicadores podem ser promovidos e avançados para garantir a sustentabilidade (FERNANDES, 2019).

Um bom indicador de qualidade (Tabela 2) precisa se relacionar com os processos envolvidos na transformação do solo, decorrente de práticas agrícolas adotadas no sistema estudado. A delimitação concisa desses processos é fundamental para a escolha de indicadores de qualidade do solo (SILVA et al., 2021). Portanto, é necessário que um conjunto de atributos sensível a mudança pelo manejo, seja selecionado e caracterizado como um indicador de qualidade (BUNEMANN et al., 2018), sendo necessário considerar indicadores que incluam aspectos físicos, químicos e biológicos, pois, em conjunto, estes fatores são capazes de influenciar os processos bioquímicos no solo e suas variações no tempo e espaço (SILVA, 2019).

Indicadores físicos de qualidade do solo

Os indicadores físicos são utilizados na análise da qualidade do solo de acordo com a função de estabelecer relações fundamentais com os processos hidrológicos, tais como taxa de infiltração, escoamento superficial, drenagem e erosão, além de também influenciar no suprimento e armazenamento de água e oxigênio no solo (SILVA, 2019). Os atributos físicos são utilizados para avaliar a qualidade do solo são: textura, estrutura, agregação das partículas, densidade do solo, condutividade hidráulica, resistência a penetração, taxa de infiltração de água e porosidade total (SILVA et al., 2020).

Segundo Freitas et al. (2017), a avaliação dos indicadores físicos de qualidade do solo é fundamental, pois esses estão profundamente envolvidos com a

dinâmica do solo. A compactação do solo diminui a atividade microbológica e a macroporosidade do solo aumentando sua densidade, em que tais fatores, em conjunto, podem acabar prejudicando no desenvolvimento radicular das plantas, o que pode dificultar na recuperação de áreas degradadas com solos compactados. Além disso, esses indicadores físicos têm a capacidade de esclarecer os motivos que o solo possui em problemas de permeabilidade e disponibilidade de nutrientes e água (SILVA, 2019).

Nesse contexto, existem exemplos de solos arenosos que apresentam maior capacidade de condução hidráulica devido maior quantidade de macroporos e menor força de adsorção de água comparando a solos argilosos (BRADY; WEIL, 2013; SILVA et al., 2020). O manejo pode modificar a densidade e a porosidade do solo, alterando a condutividade hidráulica e dificultando a infiltração da água resultando na elevação do escoamento superficial, acarretando a erosão (SILVA et al., 2020).

Dentre os principais atributos físicos (Tabela 3) utilizados na avaliação da qualidade do solo tem-se a textura do solo que é um dos mais estáveis, sendo pouco modificada pelo cultivo ou outras práticas que levam a incorporação ou mistura de camadas, mas tem a capacidade de influenciar outros fatores tais como a densidade do solo, porosidade do solo e condutividade hidráulica saturada (SILVA et al., 2020).

Tabela 3. Atributos físicos do solo que podem ser melhorados com o cultivo de plantas forrageiras

Atributos físicos do solo	Autores (Ano)
Textura do solo	Bortolotto (2012)
Estrutura do solo	Panachuki et al. (2011)
Agregação das partículas	Salton et al. (2008)
Densidade do solo	Brady; Weil (2013)
Compactação do solo	Silva et al. (2020)
Condutividade hidráulica	Suszek et al. (2019)
Resistência à penetração	Silva et al. (2020)
Taxa de infiltração de água	Silva et al. (2020)
Porosidade total	Bortolotto (2012)

Fonte: Autores (2023)

A porosidade e a densidade são propriedades dinâmicas, suscetíveis ao uso do solo e de fácil determinação e podem ser relacionadas à compactação e restrição no crescimento das raízes. Já a estabilidade de agregados está relacionada à erosão do solo, pois influencia a infiltração, a retenção de água, a aeração, entre outros fatores essenciais para a manutenção do equilíbrio no solo (ARAÚJO et al., 2012). A condutividade hidráulica é um importante fator para o dimensionamento de sistemas de drenagem agrícola, destacando-se como um parâmetro que representa a facilidade com que o solo ou rocha transmite água (SILVA et al., 2020).

Indicadores químicos de qualidade do solo

Os indicadores químicos (Tabela 4) de qualidade do solo são agrupados em variáveis relacionadas com o teor de matéria orgânica do solo, a acidez do solo, o conteúdo de nutrientes, elementos fitotóxicos e

determinadas relações como a saturação de bases e de alumínio (ARAÚJO et al., 2012).

Contudo, outros atributos químicos também são frequentemente utilizados, são eles a capacidade de troca de cátions (CTC), óxido de ferro e óxido de alumínio. (SILVA, 2019). O pH e a matéria orgânica são atributos essenciais no estudo de qualidade do solo em áreas degradadas, devido exercerem grande influência no crescimento e desenvolvimento das plantas (COSTA et al., 2017).

Os indicadores químicos podem ser utilizados para avaliar a contaminação e poluição no solo, no caso de avaliação de níveis de metais pesados, nitrato, fosfato e agrotóxicos, sendo importante também para constatar deficiência de nutrientes, no que diz respeito à fertilidade, além de identificar elementos em excesso, em especial àqueles que podem ter efeito prejudicial para o desenvolvimento das plantas (SILVA, 2019).

O pH do solo, a CTC, a matéria orgânica e a disponibilidade de nutrientes são os principais indicadores químicos de qualidade do solo e estão relacionados com a capacidade do solo em proporcionar o crescimento e desenvolvimento das plantas a partir do fornecimento de nutrientes. Os atributos químicos (Tabela 4) auxiliam na identificação da capacidade do solo em sustentar os biomas, por meio da ciclagem dos nutrientes. Além disso, esses parâmetros estão correlacionados ao rendimento das culturas, permitindo analisar e determinar ações de correção no solo por meio de adubações e calagens para prover condições para produção (CARDOSO et al., 2013).

Tabela 4. Atributos químicos do solo que podem ser melhorados com o cultivo de plantas forrageiras

Atributos químicos do solo	Autores (Ano)
Teor de Matéria Orgânica	Primo et al. (2011)
Acidez do solo	Cardoso et al. (2013)
pH do solo	Silva et al. (2020)
Alumínio (Al)	Silva et al. (2020)
Acidez potencial (H+Al)	Silva et al. (2020)
Fósforo (P)	Silva et al. (2020)
Potássio (K)	Silva et al. (2020)
Sódio (Na)	Silva et al. (2020)
Cálcio (Ca)	Silva et al. (2020)
Magnésio (Mg)	Silva et al. (2020)
Soma de bases (SB)	Silva et al. (2020)
Capacidade de troca de cátions (CTC)	Silva et al. (2020)
Porcentagem de saturação por bases (V%)	Silva et al. (2020)

Fonte: Autores (2023)

Entre os indicadores químicos mais importantes para avaliar a capacidade de disponibilizar nutrientes, estão inseridos em relação aos teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), no qual são facilmente mensuráveis e estão ligados a nutrição das culturas (SILVA et al., 2020).

O pH do solo é um parâmetro de grande importância, notadamente para os solos das regiões tropicais (MAIA, 2013), pois a maior parte dos solos brasileiros apresentam problemas de acidez, devido a presença de alumínio e manganês em quantidades tóxicas para as culturas, ocorrendo conseqüentemente, deficiência de cálcio e magnésio, entre outros, o que vai prejudicar no desenvolvimento radicular das plantas, pela limitação de absorção de água e nutrientes (SILVA et al., 2020). Em contrapartida, os solos da região semiárida se apresentam

mais alcalinos, devido a quantidade de bicarbonato presente na água de irrigação (MAIA, 2013).

A matéria orgânica do solo pode ser definida como todo material orgânico de origem biológica, vivo ou morto que se encontra no solo, constituindo as raízes de plantas e organismos do solo e a parte morta representa a matéria macrororgânica, constituída de resíduos de plantas em decomposição, as substâncias humificadas e as não humificadas (PRIMO et al., 2011).

A capacidade de troca de cátions (CTC) é a quantidade de cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ e NH_4^+) que um material pode reter. A maioria dos nutrientes utilizados pelas plantas e micróbios é absorvido na sua forma iônica, portanto descreve a fertilidade do solo, então, um valor baixo de CTC indica que o solo tem pequena capacidade para reter cátions sem forma trocável, nesse caso, não se devem fazer as adubações e as calagens em grandes quantidades de uma só vez, mas sim de forma parcelada para que se evitem maiores perdas por lixiviação (SILVA et al., 2020).

A saturação por bases (V%) expressa a porcentagem que os elementos essenciais, tais como o Ca, Mg e K, estão ocupando a troca de cátions. Quando a saturação por base se apresenta muito baixa (< 50%), ocorre maior absorção de elementos tóxicos como o Al^{3+} e H^+ (SILVA et al., 2020). A saturação por bases é um dos métodos mais utilizados para a correção de acidez do solo, através da determinação da necessidade de calagem. Na agricultura, a calagem pode contribuir no aumento da produtividade, na qualidade e no estabelecimento dos plantios de plantas forrageiras (CARLOS et al., 2014).

Indicadores biológicos de qualidade do solo

Os indicadores biológicos, como a biomassa microbiana do solo, o nitrogênio mineralizável, a respiração microbiana do solo, a atividade enzimática e o quociente metabólico, são importantes tanto no que se refere à ciclagem dos nutrientes, como também na estimativa da capacidade do solo para o crescimento vegetal (ARAÚJO et al., 2012).

A avaliação biológica do solo é de grande importância para a determinação da atividade microbiana, atividade esta que pode ser determinante para a qualidade do solo (ANDRADE, 2021). É importante ressaltar que, diferentemente dos indicadores químicos e físicos do solo, que já possuem níveis definidos (baixo, médio, adequado e alto) para cada tipo de solo/cultura, quando se trata dos indicadores biológicos é difícil a interpretação dos resultados. O estudo desses indicadores é de fundamental importância para entender processos ecológicos que ocorrem em áreas degradadas ou em processo de recuperação (SILVA, 2019), além de ser um indicador importante para sustentabilidade dos sistemas de produção, pois exercem funções essenciais para garantir a saúde do solo, como ciclagem de nutrientes, melhoria das relações ecológicas como equilíbrio da cadeia alimentar, entre outras (FIDELIS et al., 2016).

De acordo com Brookes (1995), existem alguns critérios de atributos biológicos a serem analisados: 1) Os atributos microbiológicos devem ser exatos e precisamente avaliados para se obter respostas em uma ampla escala de

tipos e condições de solo; 2) Devido ao alto número de amostras analisadas normalmente, os atributos microbiológicos devem ser fáceis e econômicos de serem avaliados; 3) Os atributos microbiológicos devem ser sensíveis a estresses, mas suficientemente robustos para não fornecer alarmes falsos; 4) Devem ter validação científica, com base na realidade e conhecimento atual; 5) Dois ou mais atributos, independentes, devem ser utilizados (SILVA, 2019).

Entre os atributos utilizados para avaliar a dinâmica da matéria orgânica do solo destacam-se os atributos biológicos (Tabela 5) e bioquímicos, como a respiração basal, a atividade enzimática, o nitrogênio da biomassa microbiana, o carbono da biomassa microbiana e a diversidade microbiana, os quais podem funcionar como indicadores sensíveis, sendo possível sua utilização no monitoramento de prováveis modificações ambientais (SILVA et al., 2021).

Portanto, o uso de atributos biológicos para determinar a condição ambiental do solo é de extrema importância, devido possuir a capacidade de refletir na saúde do solo, ou seja, permite conhecer os processos relativos à habilidade do solo em manter seus serviços ambientais ou ecossistêmicos, os quais são essenciais para a sustentabilidade do ecossistema (STEFANOSKI et al., 2013).

Tabela 5. Atributos biológicos do solo que podem ser melhorados com o cultivo de plantas forrageiras

Atributos biológicos do solo	Autores (Ano)
Biomassa microbiana do solo	Silva et al. (2021)
Nitrogênio da biomassa microbiana	Silva et al. (2021)
Carbono da biomassa microbiana	Silva et al. (2021)
Diversidade microbiana	Silva et al. (2021)
Respiração basal	Silva et al. (2021)
Atividade enzimática do solo	Silva et al. (2021)

Fonte: Autores (2023)

Indicadores de qualidade do solo sob influência de cultivo de plantas forrageiras

Indicadores físicos

Plantas forrageiras do gênero *Urochloa* são notáveis pela capacidade de melhorias dos atributos físicos (Tabela 6) e biológicos do solo. O crescimento radicular associado à presença de bactérias e fungos micorrízicos arbusculares são fundamentais para formar, recuperar e manter a estrutura e a agregação das partículas do solo (MOSCARDINI, 2020).

A braquiária é a forrageira chave para melhorar a estrutura do solo por produzir de 5 a 12 vezes mais biomassa radicular do que a parte aérea, por associar os fungos micorrízicos arbusculares e por aumentar a biomassa microbiana do solo, devido à grande quantidade de C-oxidável adicionado no interior do solo através das raízes. O potencial dessa planta em recuperar o solo fisicamente foi comprovado em área explorada por mineração e cultivada com eucalipto (CAVALCANTE et al., 2019; MOSCARDINI, 2020).

A quantidade de poros de aeração do solo pode aumentar através da biomassa de raízes associadas aos microrganismos, em razão do expressivo desenvolvimento

radicular da braquiária em aumentar a taxa de infiltração de água no solo e diminuir a erosão. Outro benefício é redução da compactação, difusão de oxigênio da atmosfera para o interior do solo e subsolo, no qual esse gás é indispensável para a respiração e crescimento das raízes, principalmente no subsolo (MOSCARDINI, 2020).

De acordo com um estudo feito por Borges (2013), as leguminosas do gênero *Stylosanthes* se destacam por possuírem sistema radicular profundo, boa produção de biomassa (8 a 14 t/ha em estandes puros), alta produção de sementes, além de conseguir se adaptar a solos pobres e com boa cobertura de solo, diminuindo processos erosivos.

Em um trabalho realizado por Nogueira Guimarães et al., (2019), foi possível observar que o guandu foi a espécie com maior potencial nas propriedades físicas e biológicas do solo, como penetração de raízes no solo, produção de biomassa aérea e imobilização de nutrientes, bem como proporcionou os menores valores de resistência à penetração, indicando possuir a habilidade de descompactar o solo nas condições empregadas. Assim como Silva & Rosolem (2001b) constataram que houve maior acúmulo de nutrientes em plantas de soja cultivadas em sucessão ao guandu, em função da descompactação do solo provocada pela cultura (NOGUEIRA GUIMARÃES et al., 2019).

Tabela 6. Plantas forrageiras que tiveram influência nos indicadores físicos do solo

Gênero/Cultura	Influências das forrageiras nos indicadores físicos do solo	Autores (Ano)
<i>Urochloa</i>	Recupera e mantém a estrutura e a agregação das partículas do solo.	Moscardini (2020)
Braquiária	Recupera a estrutura do solo, melhora a aeração do solo, aumenta a biomassa das raízes, melhora a taxa de infiltração de água no solo, reduz a compactação e a difusão de oxigênio da atmosfera para o interior do solo.	Cavalcante et al. (2019) e Moscardini (2020)
<i>Stylosanthes</i>	Melhora a profundidade do solo, tem alta produção da biomassa aérea e diminui processos erosivos.	Borges (2013)
Guandu	Melhora a compactação do solo com habilidade de descompactar, facilitando o desenvolvimento radicular, aumenta a produção de biomassa aérea, além de aumentar o acúmulo de nutrientes e sua imobilização.	Silva & Rosolem (2001b) e Nogueira Guimarães et al. (2019)

Fonte: Autores (2023)

Indicadores químicos

As plantas forrageiras sob influência dos indicadores químicos do solo (Tabela 7) se associam a quatro processos de distribuição de nutrientes no perfil do solo: intemperismo, deposição atmosférica, lixiviação e ciclagem biológica. A distribuição dos nutrientes no solo é heterogênea, então quanto maior o volume explorado maior a capacidade de a planta acessar os nutrientes e absorvê-lo (MOSCARDINI, 2020).

As braquiárias influenciam em dois processos de distribuição de nutrientes no solo através da extensão das

raízes, que são lixiviação e ciclagem biológica. Em sistema de cultivo de cereais, a forrageira cultivada na segunda safra, após colheita de soja, absorveu 40% do potássio (K) contido na biomassa da zona abaixo de 0,3 m e 34% abaixo de 0,6 m de profundidade (OLIVEIRA et al., 2020; MOSCARDINI, 2020).

Os nutrientes beneficiados pela presença da braquiária foram: potássio (K) e fósforo (P). Durante o processo evolutivo em solos de baixa fertilidade, a forrageira desenvolveu uma série de mecanismos que facilitam o acesso ao nutriente, são eles: exsudação de ácidos orgânicos, liberação de enzimas fosfatases e a solubilização de frações recalcitrantes de P orgânico, aumentando assim a disponibilidade de P lábil no solo (MOSCARDINI, 2020).

Para a produção de pastagens, o nitrogênio (N) é um elemento essencial, mas, as adubações nitrogenadas tendem a elevar os custos de implantação e manutenção. Um fator importante a ser considerado é a fixação biológica de nitrogênio (FBN), que pode ser aproveitada do nitrogênio disponibilizado por bactérias diazotróficas em associação às espécies de Brachiaria através da FBN, processo pelo qual esses microrganismos convertem o N₂ atmosférico em formas de N assimiláveis pelas plantas (GUIMARÃES et al., 2011a).

Tabela 7. Plantas forrageiras que tiveram influência nos indicadores químicos do solo

Gênero/Cultura	Influências das forrageiras nos indicadores químicos do solo	Referências
Braquiária	Possui influência nos processos de distribuição de nutrientes no solo através das raízes, facilita a disponibilidade de Fósforo e Potássio através dos mecanismos de exsudação de ácidos orgânicos, liberação de enzimas fosfatases e solubilização de frações recalcitrantes de Fósforo orgânico, aumentando a disponibilidade de Fósforo lábil no solo.	Oliveira et al. (2020) e Moscardini (2020)
Stylosanthes	Apresentam maior CTC radicular, além do Nitrogênio fixado pelas bactérias (FBN), possuem alta capacidade de reciclagem de reciclagem de cálcio que podem beneficiar também as braquiárias.	Borges (2013)
Pennisetum	Contribui com até 75% do Nitrogênio acumulado pela planta, indicando que não necessita uso de fertilizantes nitrogenados.	Quesada (2001) e Reis Júnior et al. (2002)
Forrageira + FBN	Essa interação pode ser economicamente viável, pois favorece a manutenção da capacidade produtiva das pastagens.	Santos Branco e Prates Júnior (2022)
Braquiária + FBN	Nessa interação as bactérias conseguem converter o N ₂ atmosférico em N assimiláveis.	Guimarães et al. (2011a)

Fonte: Autores (2023)

A exploração da interação entre plantas e bactérias fixadoras de nitrogênio se mostram como uma alternativa economicamente viável e sustentável, por ser capaz de suprir cerca de 17% da necessidade de N

requerida pelas gramíneas, favorecendo a manutenção da capacidade produtiva das pastagens (SANTOS BRANCO; PRATES JÚNIOR, 2022).

Em relação às gramíneas, as leguminosas apresentam maior capacidade de troca de cátions (CTC) radicular, no qual os cátions divalentes vão ser absorvidos em maiores quantidades pela leguminosa. Desse modo, além do N fixado biologicamente, a alta capacidade de reciclagem de cálcio (Ca) das Stylosanthes também pode beneficiar a braquiária, quando o consórcio for bem estabelecido (BORGES, 2013).

Quesada (2001), em um experimento de campo, ao utilizar a técnica de abundância natural de 15N (d 15N), apresentou resultados em que a FBN, associada a Pennisetum purpureum, foi capaz de contribuir com até 57% do N acumulado pela planta, demonstrando ser possível alcançar grandes produções sem a aplicação de fertilizante nitrogenado (REIS JÚNIOR et al., 2002).

Em estudos efetuados por Boddey & Victoria (1986), para a quantificação da FBN, foi utilizado o método de diluição isotópica de 15N, com isso os autores puderam observar que as espécies *B. decumbens* e *B. humidicola* receberam uma quantidade de N via FBN significativamente superior àquela apresentada por *B. radicans* e *B. ruziziensis*, demonstrando que o cultivo de plantas forrageiras possui influência positiva sob os indicadores de qualidade do solo.

Indicadores biológicos

A atividade biológica no solo (Tabela 8) está relacionada com o fornecimento de carbono (C), temperatura, umidade do solo, vento e compactação, devido fatores envolvidos que mostram o potencial da braquiária como planta recuperadora das propriedades biológicas do solo. Essa gramínea é notável em relação ao incremento de C do solo, pois pode fornecer quantidade superior ao depositado por florestas tropicais. Além da proteção contra intempéries, a cobertura com biomassa caulinar da parte aérea pode tornar o sistema de produção resiliente à compactação (MOSCARDINI, 2020).

O cultivo da braquiária (Tabela 6) aumenta ainda a atividade de enzimas indicadoras de atividade biológica do solo, bem como as práticas como adubação orgânica e o cultivo de leguminosas estimulam a atividade dessas enzimas, concluindo que a braquiária pode beneficiar a atividade biológica do solo. As práticas culturais também influenciaram na abundância e diversidade dos fungos micorrízicos arbusculares, que são um fator muito importantes, pois melhoram as propriedades físicas do solo pela ação mecânica das hifas extrarradiculares e por causa da exsudação de glicoproteínas agregadoras das partículas do solo (MOSCARDINI, 2020).

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é um processo biológico mediado por bactérias procariotas que possuem um complexo enzimático denominado nitrogenase. O guandu (*Cajanus cajan* L.) possui destaque especialmente por contribuir significativamente na fixação biológica de nitrogênio no solo (NOGUEIRA GUIMARÃES, et al., 2019).

Tabela 8. Plantas forrageiras que tiveram influência nos indicadores biológicos do solo

Gênero/Cultura	Influências das forrageiras nos indicadores biológicos do solo	Referências
Braquiária	Fornecer Carbono em altas quantidades, recupera propriedades biológicas do solo, protege o solo contra intempéries e melhora a compactação do solo. Aumenta a atividade de enzimas indicadoras de atividade biológica do solo, influenciaram na abundância e diversidade dos fungos micorrízicos arbusculares, além de melhorar a agregação das partículas do solo.	Moscardini (2020)
Urochloa	Mantém a estrutura e agregação das partículas do solo, beneficiando o crescimento radicular das plantas devido a presença de fungos e bactérias.	Moscardini (2020)
Guandu	Contribui de forma significativa na fixação biológica de Nitrogênio no solo.	Nogueira Guimarães et al. (2019)

Fonte: Autores (2023)

Conclusão

Nessa revisão foi possível concluir que o solo é um recurso natural dinâmico, de fundamental importância para todo o ecossistema, e que necessita de monitoramento constante quanto a sua qualidade física, química e biológica, para então assegurar a sustentabilidade agrícola.

Os atributos físicos, químicos e biológicos do solo são indicadores favoráveis na avaliação da qualidade do solo, possibilitando conhecer a qualidade de determinada área, colaborando para realização do manejo mais sustentável dos solos.

A Brachiaria e o Guandu são as forrageiras com maior potencial para aprimorar as propriedades físicas e biológicas do solo, bem como melhorar a estrutura do solo influenciando na sua recuperação, tem capacidade de imobilizar os nutrientes a fim de ter maior acúmulo para as plantas, aumenta a taxa de infiltração de água no solo reduzindo a erosão e diminuindo a compactação do solo facilitando a penetração e desenvolvimento das raízes, além de se associar com os fungos micorrízicos arbusculares, aumentando a capacidade microbiana.

O cultivo de plantas forrageiras é capaz de melhorar os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, trazendo como benefícios para as propriedades físicas: recuperação da estrutura e agregação das partículas do solo, aeração, redução da compactação e difusão de oxigênio; propriedades químicas: maior distribuição de nutrientes no solo, grande disponibilidade de P e K no solo, bem como influencias na lixiviação e ciclagem biológica; e, propriedades biológicas: fornecimento de C e presença dos fungos micorrízicos arbusculares, melhorando nas propriedades físicas e biológicas do solo.

Este tema já está esgotado, necessitando de mais estudos, a fim de melhorar o conhecimento entre essa relação de indicadores de qualidade do solo sob influência do cultivo de plantas forrageiras, para poder contribuir em sistemas de produção agrícolas, garantindo a sustentabilidade e a qualidade ambiental.

Referências

ALMEIDA, J. R. Desempenho e características de cordeiros criados em creep feeding com silagem de grãos úmidos de milho. *Revista Brasileira de Zootecnia*. v.33, n.4, p.1048-1059, 2014.

ANDRADE, J. Metodologias para análise da qualidade biológica do solo. Monografia (Graduação em Zootecnia), Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2021.

ARAGÃO, D. V. et al. Avaliação de indicadores de qualidade do solo sob alternativas de recuperação do solo no Nordeste Paraense. *Acta Amazonica (Impresso)*. vol. 42(1): 11 – 18, 2012.

ARAÚJO, E. A. et al. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Applied Research & Agrotechnology*, v. 5, n. 1, p. 187-206, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5777/paet.v5i1.1658>

ARAÚJO JÚNIOR, G. N. et al. Estresse hídrico em plantas forrageiras: Uma revisão. *PUBVET*, v.13, n.1, a241, p.1-10, Jan, 2019. DOI: <https://doi.org/10.31533/pubvet.v13n01a241.1-10>

ARCOVERDE, S. N. S. Qualidade de solos sob diferentes usos agrícolas na região do entorno do lago de Sobradinho – BA / 71p. Dissertação/Mestrado. Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2013.

BAEK, S.; YOON, D. Y.; LIM, K. J.; CHO, Y. K.; SEO, Y. L.; YUN, E. J. The most downloaded and most cited articles in radiology journals: a comparative bibliometric analysis. *European Radiology*, v. 28, n. 11, p. 4832–4838, 2018. doi:10.1007/s00330-018-5423-1

BODDEY, R. M.; VICTORIA, R. L. Estimation of biological nitrogen fixation associated with Brachiaria and Paspalum grasses using 15N labelled organic matter and fertilizer. *Plant & Soil*, Dordrecht, v. 90, p.256-292, 1986. DOI: 10.1007/bf02277403

BORGES, S. R. Qualidade do solo em áreas em recuperação com forrageiras e caféiro pós-mineração de bauxita. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2013.

BORTOLOTTI, Rafael Pivotto et al. Nitrogen fertilizer (15N) leaching in a central pivot fertigated coffee crop. *Revista Ceres*, v. 59, p. 466-475, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000400006>

BRADY, NC et al. Arquitetura e propriedades físicas do solo. *Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos*. Porto Alegre: Bookman, pág. 106-145, 2013.

BROOKES, D. C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. *Biology and Fertility of Soils*, Berlin, v. 19, p. 269-279, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00336094>

BUNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*. V. 120, p 105-125, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

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. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000400009>

CARLOS, L. et al. Crescimento e nutrição mineral de mudas de pequi sob efeito da omissão de nutrientes. *Ciência Florestal*, v. 24, n.1, p. 13-21, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509813318>

CAVALCANTE, D. M. et al. Effects of rehabilitation strategies on soil aggregation, C on N distribution and carbono management index in coffee cultivation in mined soil. *Ecological indicators*. [S. l.], v. 107, p. 105668, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105668>

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade do Solo. São Paulo – SP, 2022. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/solo/propriedades/#:~:text=As%20propriedades%20f%C3%ADsicas%20do%20solo,qu%C3%ADmica%20e%20biol%C3%B3gica%20possam%20ocorrer.>> Acesso em 21/11/2022.

- CHAER, G. M. Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos. 89 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.
- 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. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-40632012000400002>
- COSTA, B. M. B. et al. Análise e caracterização química do solo em locais de acomodação de resíduos hospitalares no município de Cuité-PB. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, Florianópolis, v. 6, n. 1, p. 83 – 100, 2017. DOI: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v6e1201783-100>
- DEON, D. S. Caracterização e estoques de carbono do solo no sistema silvipastoril de produção de caprinos da Embrapa Semiárido (Sistema CBL). Petrolina: Embrapa Semiárido, 2020.
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. IN: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Org.) *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: SSSA, 1994. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>
- FERNANDES, F. S. Indicadores de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2019.
- FERRAZ JÚNIOR, R. S. Indicadores de qualidade de solo em área cultivada com gliricídia e palma forrageira em Sistema Biossaliño no Semiárido Nordestino. Petrolina, 2018.
- FIDELIS, R. R. et al. Quality biological indicators of soil in intercropping to *Jatropha curcas*. *Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science*, Guarapuava-PR, v.9, n.3, p.87-95, 2016. DOI: 10.5935/PAeT.V9.N3.10
- FREITAS, L. et al. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. *Unimar Ciências*, Marília, v. 26, n.1, p. 08-25, 2017.
- GUIMARÃES, S. et al. PRODUÇÃO DE CAPIM-MARANDU INOCULADO COM *Azospirillum* spp. *Enciclopédia Biosfera*, v. 7, n. 13, 2011a.
- MAIA, C. E. Qualidade ambiental em solo com diferentes ciclos de cultivo do meloeiro irrigado. *Ciência Rural*, v. 43, p. 603-609, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000400007>.
- MATOS, E. R. et al. Capítulo 3: Ecologia microbiana. MATOS, E. R. et al. *Microbiologia do solo*. Piracicaba: ESALQ, 2016.
- MELO, V. F. et al. Chemical and biological quality of the soil in different systems of use in the savanna environment. *Rev. Agro@.online*, v.11, n. 2, p. 101-110, 2017.
- MENDES, I. C. et al. Bioindicadores para avaliação da qualidade dos solos tropicais: utopia ou realidade? Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2009.
- MOLINA JUNIOR, W. F. Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas [recurso eletrônico]. Piracicaba: ESALQ/USP, 2017. DOI: 10.11606/9788592238407.
- MOSCARDINI, D. B. Consórcio café-forrageira tropical: impactos nos indicadores da qualidade de solo. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.11.2020.tde-05102020-134357>.
- MUKHERJEE, A.; LAL, R. Comparison of soil quality index using three methods. *PLoS ONE*, v. 9, n. 8: e105981, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105981>.
- NEVES, F. P. et al. Palma forrageira: Opção e potencialidades para alimentação animal e humana em propriedades rurais do estado do Espírito Santo. *Incaper, Documentos*, v. 276, p. 52, 2020.
- 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 distroférico com usos e manejos distintos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 4, p.1271 – 1282, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400025>
- NOGUEIRA GUIMARÃES, I. C. et al. Influência dos cultivos de milho e guandu para produção de silagem na resistência do solo à penetração. *Archivos de Zootecnia* 68 (264): 546-550, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21071/az.v68i264.4994>
- OLIVEIRA, S. M. et al. Vertical stratification of K uptake for soybean-based crop rotation. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 117, 185–197, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10059-9>
- PANACHUKI, Elói et al. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 1777-1786, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500032>
- PRIMO, D. C. et al. Substâncias húmicas da matéria orgânica do solo: uma revisão de técnicas analíticas e estudos no nordeste brasileiro. *Scientia Plena*, v. 7, 1-13, 2011.
- QUESADA, D. M. Seleção de genótipos de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) para a alta produção de biomassa e eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN). Tese de mestrado - UFRJ, 119 p., 2001.
- REIS JÚNIOR, F. B. Fixação biológica de nitrogênio associada a pastagens de braquiária e outras gramíneas forrageiras. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002.
- SALTON, Júlio Cesar et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, v. 32, p. 11-21, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100002>
- SANTANA, D. P.; BAHIA FILHO, A. F. C. Soil quality and agricultural sustainability in the Brazilian Cerrado. In: *World Congress of Soil Science*, 16., Montpellier, França, 1998.
- SANTOS BRANCO, J.; PRATES JÚNIOR, P. Fixação biológica de nitrogênio na produção sustentável de forragem. *Revista EduTec, Ariquemes-RO*, v.03, n.01, p.101-114, Jan. – Jun, 2022.
- SILVA, T. A. C. Indicadores da qualidade de solo na avaliação da condição ambiental de área de lixão desativado em Ouro Fino – MG. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG, 2019.
- SILVA, M. O; et al. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. *Brazilian Journal of Development*. Curitiba, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, jul, 2020. DOI:10.34117/bjdv6n7-431
- SILVA, M. O; et al. Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.7, n.1, p. 6853-6875, Jan, 2021. DOI:10.34117/bjdv7n1-463
- SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 253-260, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200001>
- SOBUCKI, L. et al. I Manejo e qualidade biológica do solo: uma análise. *Revista Agrônômica Brasileira*, v. 3, n.4, 2019. DOI: 10.29372/rab201904
- SOUZA, E. S. et al. Plantas forrageiras para pastos de alta produtividade. *Nutri Time: Revista eletrônica*. Vol. 15, Nº 04, jul./ ago. ISSN: 1983-9006, 2018.
- STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.17, n.12, p.1301-1309, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001200008>

SUSZEK-ŁOPATKA, Beata et al. A seca e a alta umidade do solo impactam na toxicidade dos PAH (fenantreno) em relação às bactérias nitrificantes. *Revista de materiais perigosos*, v. 368, pág. 274-280, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.055>

VEZZANI, F. M; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 4, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001>

WU, Y. et al. Response of Saline Soil Properties and Cotton Growth to Different Organic Amendments. *Pedosphere*, v. 160, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60464-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60464-8)