



Soil physical quality: a comprehensive analysis of its importance for agricultural production

A qualidade física do solo: uma análise de sua importância para a produção agrícola

Diego Lima de Souza Cruz^{1*}, José Frutuoso do Vale Júnior², Leandro Timoni Buchdid Camargo Neves², Lais de Brito Carvalho⁴, Oswald Renaud Koblam Ahouangbonou⁵

Abstract: In Brazil, soil physics has acquired great notoriety in recent decades due to losses in agricultural production resulting from soil degradation. Degraded areas are commonly abandoned and generate greenhouse gas emissions, which is why the conservationist soil management have been a priority in government programs. The application of this type of management requires in-depth knowledge about the physical properties of the soil and how each of them interacts with other components of the environment. In this context, the objective of this review article was to bring scientific work that correlated the physical quality of the soil with agricultural productivity. Articles indexed in the Web bases of Science, Scopus, Scielo and Redalyc were used. This methodology provided 129 articles, 4 books, 1 book chapter and a doctoral thesis. It can be established that the physical quality of the soil is dynamic and influenced by a set of properties simultaneously, also responding to soil management and climatic conditions. Compaction is the most studied property and has direct effects on the loss of agricultural production, leading many areas to erosion and compromising the soil's environmental functions. It is considered that maintaining the physical quality of the soil is an essential component within the planning of agricultural activities and can prevent the degradation of areas. Understanding the dynamics of these properties can also help in reversing advanced cases of loss of soil physical quality.

Key words: Compaction. Management and conservation. Sustainability.

Resumo: No Brasil a física do solo adquiriu grande notoriedade nas últimas décadas devido às perdas de produção agrícola decorrentes da degradação do solo. As áreas degradadas comumente são abandonadas e geram emissões de gases de efeito estufa, e por isso têm sido prioridade em programas governamentais, o manejo de solo conservacionista. A aplicação desse tipo de manejo exige profundo conhecimento acerca das propriedades físicas do solo e como cada uma delas interage com outros componentes do ambiente. Neste sentido, objetivou-se com essa revisão trazer trabalhos científicos que correlacionaram a qualidade física do solo com a produtividade agrícola. Empregou-se artigos indexados nas bases Web of Science, Scopus, Scielo e Redalyc. Esta metodologia forneceu 129 artigos, 4 livros, 1 capítulo de livro e uma tese de doutorado. Pode se estabelecer que a qualidade física do solo é dinâmica e influenciada por um conjunto de propriedades simultaneamente, respondendo também ao manejo do solo e às condições climáticas. A compactação é a propriedade mais estudada sendo a que apresenta efeitos diretos na perda da produção agrícola, levando muitas áreas à erosão e comprometimento das funções ambientais do solo. Considera-se que a manutenção da qualidade física do solo é um componente essencial dentro do planejamento das atividades agrícolas e pode evitar a degradação das áreas. Entender a dinâmica dessas propriedades pode também auxiliar na reversão de quadros avançados de perda da qualidade física do solo.

Palavras-chave: Compactação. Manejo e Conservação. Sustentabilidade.

*Corresponding author

¹ Doutor. Engenheiro agrônomo. E-mail: diegocruzali@gmail.com

² Docente - Programa de Pós-graduação em Agronomia - Universidade Federal de Roraima, Campus Cauamé. E-mails: vale.junior@gmail.com; rapelbtu@hotmail.com

⁴ Engenheiro agrônomo. E-mails: lay_carvalho@hotmail.com; oswaldagrorr@gmail.com

INTRODUCTION

Currently, there are challenges in producing food, fiber, energy, wood and non-wood products in a manner compatible with the availability of natural resources, especially land and water (ASSIS *et al.*, 2019). Therefore, it is necessary to disseminate integrated production systems with or without forestry sectors, due to the agricultural, economic, social and environmental benefits (BARBOSA *et al.*, 2015). Since these systems are based on spatial integration and the location of the components of the productive system, they aim to strengthen land use to achieve higher levels of environmental quality and competition and reduce pressure on ecosystems (CORDEIRO *et al.*, 2015).

The physical quality of the soil is directly associated with the sustainability of agricultural systems and the reduction of greenhouse gas emissions, causing environmental and economic damage when not studied and monitored (TAHAT *et al.*, 2020). These systems are based on spatial integration and the location of the components of the productive system, they aim to strengthen land use to achieve higher levels of environmental quality and competition and reduce pressure on ecosystems (CRUZ *et al.*, 2014; POLIDORO *et al.*, 2021).

In most cases, the loss of soil physical quality is caused by low-technology agricultural systems such as extensive pastures without grazing control, indiscriminate mechanization and the absence of conservation practices such as contour lines, terracing and direct planting. Soil degradation problems resulting from the loss of physical quality are greater in regions lacking technical assistance for rural producers (CRUZ *et al.*, 2014; ALEMINEW, 2024).

Agricultural activities, especially mechanized ones, when carried out without scientific criteria and without technological support, can be considered as the main causes of the loss of soil physical quality. Inadequate management causes the loss of soil fertility due to compaction, low water retention, low aeration and high susceptibility to erosion, thus causing degradation and abandonment of areas (CRUZ, 2017).

INTRODUÇÃO

Atualmente, há desafios em produzir alimentos, fibras, energia, madeira e produtos não madeireiros de modo compatível com a disponibilidade de recursos naturais, especialmente terra e água (ASSIS *et al.*, 2019). Dessa forma, é necessário difundir os sistemas de produção integrados com ou sem setores florestais, em razão dos benefícios agrícolas, econômicos, sociais e ambientais (BARBOSA *et al.*, 2015). Esses sistemas, se baseiam na integração espacial e localização dos componentes do sistema produtivo, visam fortalecer o uso da terra para alcançar níveis mais elevados de qualidade ambiental e competição, bem como, reduzir a pressão sobre os ecossistemas (CORDEIRO *et al.*, 2015).

A qualidade física do solo está diretamente associada à sustentabilidade dos sistemas agrícolas e à redução de emissão de gases de efeito estufa, provocando danos ambientais e econômicos quando não estudada e monitorada (TAHAT *et al.*, 2020). Essa área do conhecimento é uma das mais representativas na ciência do solo, pois ainda existe no mundo formas de agricultura que provocam sérios problemas relacionados à erosão, assoreamento e perda da fertilidade do solo (CRUZ *et al.*, 2014; POLIDORO *et al.*, 2021).

Na maioria dos casos, a perda da qualidade física do solo é ocasionada por sistemas de agricultura de baixa tecnologia como pastagens extensivas sem controle de pastejo, mecanização indiscriminada e ausência de práticas conservacionistas como curvas de nível, terracamento e plantio direto. Os problemas de degradação do solo decorrentes da perda da qualidade física são maiores em regiões carentes de assistência técnica para os produtores rurais (CRUZ *et al.*, 2014; ALEMINEW, 2024).

As atividades agrícolas, principalmente as mecanizadas, quando efetuadas sem critério científico e sem amparo tecnológico, podem ser consideradas como as principais causas da perda da qualidade física do solo. O manejo inadequado provoca a perda da fertilidade do solo devido à compactação, baixa retenção de água, baixa aeração e elevada susceptibilidade à erosão, ocasionando assim a degradação e abandono das áreas (CRUZ, 2017).

The emission of greenhouse gases from agriculture has gained relevance in recent decades because they occur in greater expression in degraded areas (EYUBOGLU and UZAR, 2020). In the case of CO₂, the soil acts as a carbon store and, depending on its management, it may or may not fulfill this function (RUFINO *et al.*, 2022). Therefore, by maintaining the physical quality of the soil, greater CO₂ emissions from productive activities are avoided (SILVA *et al.*, 2023).

In this way, the aim of this work was to carry out a scientific review that can elucidate the main physical properties of the soil involved in agricultural production and how they can be worked on in order to prevent environmental degradation.

REVIEW APPROACH

The present study is structured in the form of a review article, demonstrating research carried out primarily in the Brazilian context that has studied the effects of soil physics on agricultural production. The research for this review began in 2016 with the collection of classic studies that established the definitions of physical properties. Subsequently, articles were sampled from the main national and international journals indexed in the web databases of Science, Scopus, Scielo and Redalyc, some of which paid for access. This methodology provided 129 articles, with the Revista Brasileira de Ciência do Solo being the journal with the most articles used, in addition to 5 books and a doctoral thesis. The article searching ended in April 2024.

The focus of the article selection was to find soil physics works carried out in the field and that had a detailed discussion about the correlation between physical properties and their effect on agricultural production. To this end, research terms were used such as: soil compaction, soil density, resistance to penetration, porosity, aggregate stability, soil physical quality, crop-livestock-forest integration, compaction in direct planting, erosion and water infiltration. on the ground. The criteria for including articles in this review were: 1) Being work carried out in the field with agricultural crops; 2) Be published in relevant journals in the area of soil physics and management; 3) Have been conducted according to consolidated methods of analyzing physical properties and statistical analysis; 4) Preferably have been conducted in Brazil and by centers of excellence in soil physics research.

A emissão de gases de efeito estufa oriundos da agricultura tem ganhado relevância nas últimas décadas, porque essas emissões ocorrem em maior expressão nas áreas degradadas (EYUBOGLU e UZAR, 2020). No caso do CO₂, o solo atua como um depósito de carbono e, dependendo do seu manejo, ele pode cumprir ou não essa função (RUFINO *et al.*, 2022). Portanto, ao manter a qualidade física do solo evita-se maiores emissões de CO₂ por parte das atividades produtivas (SILVA *et al.*, 2023).

Diante do exposto, objetivou-se nesse trabalho realizar uma revisão científica que possa elucidar quais são as principais propriedades físicas do solo envolvidas na produção agrícola e como elas podem ser trabalhadas a fim de prevenir a degradação ambiental.

ABORDAGEM DA REVISÃO

O presente estudo está estruturado na forma de artigo de revisão, demonstrando pesquisas realizadas prioritariamente no contexto brasileiro que tenham estudado os efeitos da física do solo sobre a produção agrícola. A pesquisa de trabalhos para esta revisão iniciou-se em 2016 com a coleta de estudos clássicos que estabeleceram as definições das propriedades físicas. Posteriormente, foram amostrados artigos dos principais periódicos nacionais e internacionais indexados nas bases Web of Science, Scopus, Scielo e Redalyc, sendo alguns deles pagos para se obter acesso. Essa metodologia forneceu 129 artigos, sendo a Revista Brasileira de Ciência do Solo o periódico com mais artigos utilizados, além de 5 livros e uma tese de doutorado. A pesquisa de artigos se encerrou em abril de 2024.

O foco da seleção de artigos foi o de encontrar trabalhos de física do solo realizados em campo e que tivessem discussão detalhada acerca da correlação entre propriedades físicas e seu efeito na produção agrícola. Para tanto, foram usados termos de pesquisa como: compactação do solo, densidade do solo, resistência à penetração, porosidade, estabilidade de agregados, qualidade física do solo, integração lavoura-pecuária-floresta, compactação em plantio direto, erosão e infiltração de água no solo. Os critérios para inclusão de artigos nesta revisão foram: 1) Ser um trabalho executado em campo com culturas agrícolas; 2) Estar publicado em revistas relevantes na área de física e manejo do solo; 3) Ter sido conduzido segundo métodos consolidados de análise da propriedades físicas e de análise estatística; 4) Preferencialmente ter sido conduzido no Brasil e por centros de excelência na pesquisa em física do solo.

Soil physical quality in the agricultural context

Soil physical quality refers to how plant growth is affected by properties such as texture, porosity, density, stability, aggregate size distribution and soil moisture retention curves (VIZIOLI *et al.*, 2021). These properties have a direct effect on the planning of fertilization methods, irrigation systems, plowing and harrowing, subsoiling and crop spacing (CRUZ, 2017).

From an agronomic point of view, it is essential that agroecosystems and their management practices preserve the soil's ability to perform essential physical functions for the growth and anchoring of roots, in addition to promoting the adequate supply of water, nutrients and oxygen to plants (ISLAM *et al.*, 2020). Soil losses through erosion, reduction in organic matter levels and soil compaction are some of the processes that contribute to the physical degradation of the soil (PINTO *et al.*, 2020; KUHWARD *et al.*, 2022). Cherubin *et al.* (2016) suggest that a soil with good physical quality favors root growth, provides water for plants and soil organisms, while facilitating gas exchange between the soil and the atmosphere.

By studying the soil in natural conditions, making its characteristics and the dynamics of the water in which the original vegetation develops known, this knowledge can be used to plan the restoration of degraded areas, based on the selection of native species adapted to the soil and environmental conditions of the sites intended for revegetation, in order to form a forest as close as possible to the native one and reestablish regional biodiversity and soil quality (JUHÁSZ *et al.*, 2006; LÔBO *et al.*, 2021 ; ALENCAR and ALMEIDA, 2024).

The impacts of use and management on the physical quality of the soil have been quantified, using different physical properties related to the shape and structural stability of the soil, such as soil density, soil porosity, soil resistance to penetration and infiltration rate, among others (NIERO, 2010; CRUZ *et al.*, 2014; ARNHOLD *et al.*, 2015; CASTELLINI *et al.*, 2020).

Qualidade física do solo no contexto agrícola

A qualidade física do solo refere-se à forma como o crescimento das plantas é afetado por propriedades como textura, porosidade, densidade, estabilidade, distribuição do tamanho de agregados e curvas de retenção de umidade do solo (VIZIOLI *et al.*, 2021). Essas propriedades tem efeito direto no planejamento de métodos de adubação, sistemas de irrigação, aração e gradagem, subsolagem e espaçamento das culturas (CRUZ, 2017).

Do ponto de vista agrônomo, é essencial que os agroecossistemas e suas práticas de manejo preservem a capacidade do solo de desempenhar funções físicas essenciais para o crescimento e ancoragem das raízes, além de promover o fornecimento adequado de água, nutrientes e oxigênio para as plantas (ISLAM *et al.*, 2020). As perdas de solo por erosão, a redução dos teores de matéria orgânica e a compactação do solo são alguns dos processos que concorrem para a degradação física do solo (PINTO *et al.*, 2020; KUHWARD *et al.*, 2022). Cherubin *et al.* (2016) sugerem que um solo com boa qualidade física favorece o crescimento das raízes, fornece água para as plantas e organismos do solo, ao mesmo tempo em que facilita as trocas gasosas entre o solo e a atmosfera.

Ao estudar o solo em condições naturais, tornando-se conhecidas suas características e a dinâmica da água, em que a vegetação original se desenvolve, pode-se usar este conhecimento para o planejamento da restauração de áreas degradadas, a partir da seleção de espécies nativas adaptadas ao solo e às condições ambientais dos locais destinados à revegetação, a fim de formar-se uma floresta mais próxima possível da nativa e restabelecer a biodiversidade regional e a qualidade do solo (JUHÁSZ *et al.*, 2006; LÔBO *et al.*, 2021; ALENCAR e ALMEIDA, 2024).

Os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo têm sido quantificados, utilizando diferentes propriedades físicas relacionadas com a forma e com a estabilidade estrutural do solo, tais como: densidade do solo, porosidade do solo, resistência do solo à penetração e taxa de infiltração, dentre outras (NIERO, 2010; CRUZ *et al.*, 2014; ARNHOLD *et al.*, 2015; CASTELLINI *et al.*, 2020).

The physical conditions of the soil directly and indirectly affect plant production, and the production system can also act on these same properties, causing improvements or losses to physical quality (FERREIRA *et al.*, 2020; PRAZERES *et al.*, 2020; HOU *et al.*, 2021; DA SILVA *et al.*, 2022). The aggregation of soil particles, for example, acts directly on the balance between air and water, on nutrient cycling and on the growth of the plant root system (REYNOLDS *et al.*, 2002; FERREIRA *et al.*, 2021; POLANÍA-HINCAPIÉ *et al.*, 2021). The aggregation processes of soil particles are dynamic and dependent on the pedogenic characteristics of the soil, as source material, texture, relief, and also strongly influenced by the conditions of use and management (TORMENA *et al.*, 2002; MUSTAFA *et al.*, 2020; TIAN *et al.*, 2022).

Soil compaction and loss of physical quality

Soil compaction is one of the main degradation processes in agricultural systems. An increase in soil compaction results in greater density, a decrease in total porosity and changes in hydraulic properties (PETRU *et al.*, 2013; PERALTA *et al.*, 2021; VOLTR *et al.*, 2021). Other effects can be seen in morphological aspects of the soil structure and the appearance and size of aggregates, as well as an increase in mechanical impediment to root growth (GIAROLA *et al.*, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2013; ACQUAH *et al.*, 2022). Compaction can be a result of soil preparation operations, traffic of agricultural machinery, the impact of water drops in poorly sized irrigation systems and animal (RICHART *et al.*, 2005; HÅKANSSON; VOORHEES, 2020; SHAHEB, VENKATESH; SHEARER, 2021; MILEUSNIĆ *et al.*, 2022)

For Conte *et al.* (2011) soil compaction can be aggravated when the soil has moisture in the range most favorable to plastic deformation, which occurs immediately above its friability limit. The pressures exerted by agricultural tires can be expressed more deeply in the soil profile, since the depth of action of this pressure is directly proportional to the area of contact with the soil and inversely proportional to the soil resistance (CONTE *et al.*, 2011; MILEUSNIĆ *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2024). On the other hand, it is not expected to find soil compaction due to animal trampling below 10 cm depth (MOREIRA *et al.*, 2014).

As condições físicas do solo afetam direta e indiretamente a produção vegetal, e o sistema de produção pode também atuar sobre essas mesmas propriedades, provocando melhorias ou prejuízos à qualidade física (FERREIRA *et al.*, 2020; PRAZERES *et al.*, 2020; HOU *et al.*, 2021; DA SILVA *et al.*, 2022). A agregação de partículas do solo, por exemplo, atua diretamente no balanço entre ar e água, na ciclagem de nutrientes e no crescimento do sistema radicular das plantas (REYNOLDS *et al.*, 2002; FERREIRA *et al.*, 2021; POLANÍA-HINCAPIÉ *et al.*, 2021). Os processos de agregação das partículas do solo são dinâmicos e dependentes das características pedogenéticas do solo, como material de origem, textura, relevo, além de fortemente influenciada pelas condições de uso e manejo (TORMENA *et al.*, 2002; MUSTAFA *et al.*, 2020; TIAN *et al.*, 2022).

Compactação do solo e a perda da qualidade física

A compactação do solo é um dos principais processos de degradação em sistemas agropecuários. Um incremento na compactação do solo resulta em maior densidade, diminuição da porosidade total e alteração nas propriedades hidráulicas (PETRU *et al.*, 2013; PERALTA *et al.*, 2021; VOLTR *et al.*, 2021). Outros efeitos podem ser verificados em aspectos morfológicos da estrutura do solo e no aspecto e tamanho dos agregados, bem como em aumento do impedimento mecânico ao crescimento radicular (GIAROLA *et al.*, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2013; ACQUAH *et al.*, 2022). A compactação pode ser decorrente de operações de preparo do solo, tráfego de máquinas agrícolas, do impacto de gotas de água em sistemas de irrigação mal dimensionados e do pisoteio animal (RICHART *et al.*, 2005; HÅKANSSON; VOORHEES, 2020; SHAHEB, VENKATESH; SHEARER, 2021; MILEUSNIĆ *et al.*, 2022)

Para Conte *et al.* (2011) a compactação do solo pode ser agravada quando o solo está com umidade na faixa mais favorável à deformação plástica, o que ocorre imediatamente acima do seu limite de friabilidade. As pressões exercidas por pneus agrícolas podem se expressar mais profundamente no perfil do solo, já que a profundidade de ação dessa pressão é diretamente proporcional à área de contato com o solo e inversamente proporcional à resistência do solo (CONTE *et al.*, 2011; MILEUSNIĆ *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2024).

It should be noted that the time and frequency of machine traffic in an agricultural year are reduced, when compared to animal trampling, when grazing is carried out for an extended period or when animals remain on the area throughout the entire growing season. grazing (CONTE *et al.*, 2011; BOTTA *et al.*, 2020; DAMME *et al.*, 2021; JORDON, 2021; SERRANO *et al.*, 2023).

As a result of compaction, there is structural change in the soil due to the reorganization of particles and their aggregates, which increases soil density and resistance and reduces macropores, inhibiting plant growth and root development (COLLARES *et al.*, 2006; HU *et al.*, 2021; HUANG *et al.*, 2022). As a result, the decrease in water content increases the soil's resistance to penetration, causing the expanding roots to encounter an increasingly greater mechanical impediment (GIAROLA *et al.*, 2007; HUANG *et al.*, 2022).

Compacted soils also present lower nutrient utilization and higher N₂O emissions into the atmosphere (RUSER *et al.*, 2006; BUSSEL *et al.*, 2021; VOLTR *et al.*, 2021). For this reason, the growth of the plant root system is restricted, reducing access to water and nutrients, especially those that are not very mobile in the soil, such as Phosphorus (P) (BENGOUGH *et al.*, 2006; COLLARES *et al.*, 2008; ORZECH *et al.*, 2021; NGO-CONG *et al.*, 2021).

According to Bergamin *et al.* (2010) critical levels of soil resistance for plant growth vary with the type of soil and the species cultivated. Classic works carried out by Fernandez *et al.* (1995), Arshad and Martins (2002) and Foloni *et al.* (2003) demonstrated the effect of increasing Penetration Resistance (PR) on the yield of several crops. In turn, Cavalieri *et al.* (2006) stated that a soil with a PR greater than 4.9 MPa already presents physical problems, limiting the development of the root system of most plants.

Por outro lado, não é esperado encontrar compactação do solo por pisoteio animal abaixo de 10 cm de profundidade (MOREIRA *et al.*, 2014). Cabe a ressalva de que o tempo e a frequência de tráfego de máquinas em um ano agrícola são reduzidos, quando comparado ao pisoteio animal, isso quando o pastejo é realizado por um período estendido ou quando os animais permanecem sobre a área durante toda a estação de pastejo (CONTE *et al.*, 2011; BOTTA *et al.*, 2020; DAMME *et al.*, 2021; JORDON, 2021; SERRANO *et al.*, 2023).

Por consequência da compactação, há alteração estrutural do solo em razão da reorganização das partículas e de seus agregados, o que aumenta a densidade e resistência do solo e reduz os macroporos, inibindo o crescimento e o desenvolvimento radicular das plantas (COLLARES *et al.*, 2006; HU *et al.*, 2021; HUANG *et al.*, 2022). Com isso, a diminuição do teor de água aumenta a resistência do solo à penetração, fazendo com que as raízes em expansão encontrem um impedimento mecânico cada vez maior (GIAROLA *et al.*, 2007; HUANG *et al.*, 2022).

Solos compactados, também, apresentam menor aproveitamento dos nutrientes e maiores emissões de N₂O para a atmosfera (RUSER *et al.*, 2006; BUSSEL *et al.*, 2021; VOLTR *et al.*, 2021). Por essa razão, o crescimento do sistema radicular das plantas é restringido, reduzindo o acesso à água e aos nutrientes, principalmente àqueles que são pouco móveis no solo, como o fósforo (P) (BENGOUGH *et al.*, 2006; COLLARES *et al.*, 2008; ORZECH *et al.*, 2021; NGO-CONG *et al.*, 2021).

Segundo Bergamin *et al.* (2010) os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo e espécie cultivada. Trabalhos clássicos realizados por Fernandez *et al.* (1995), Arshad e Martins (2002) e Foloni *et al.* (2003) evidenciam o efeito do aumento da Resistência à Penetração (RP) no rendimento de diversas culturas. Por sua vez, Cavalieri *et al.* (2006) afirmam ainda que um solo com RP maior que 4,9 MPa já apresenta problemas físicos, limitando o desenvolvimento do sistema radicular da maioria das plantas.

For Leão *et al.*, (2004) RP values above 2.0 MPa are considered critical for root development, although values of 2.5 MPa for pastures, 3.0 MPa for forest and 3.5 MPa for direct planting (TORMENA *et al.*, 2007) have been considered as critical for these systems. The value of 2.0 MPa has been used as a critical PR limit since the work of Freitag *et al.* (1971), however this value has been questioned by other authors such as Beutler *et al.* (2004), Bergamin *et al.* (2010) and Secco *et al.* (2005) which suggests the need for more studies.

Influences of soil density (SD) and particle density (PD) on soil physical quality

Soil density (SD), also known as global or apparent density, expresses the ratio between the mass of solids (MS) and the total volume (V) (AMARO FILHO *et al.*, 2008). Soil density includes the space within the aggregates and between the aggregates, that is, it takes into account the pore space of the soil. In this way, the density reflects well the structural conditions of the soil, because, as solids are not compressible, the greater quantity of particles in the same total volume only occurs to the detriment of the pore space (KLEIN, 2006; AMARO FILHO *et al.*, 2008).

Soil density is the most sensitive attribute to the installation of production systems, however there is a complex relationship with other physical attributes of the soil that prevent a drastic change in SD, such as the increase in organic matter in no-till system (SPD) (CRUZ, 2017; OBOUR; UGARTE *et al.*, 2021; Furthermore, high soil density can compromise nutrient dynamics because it affects water movement (transport via mass flow), absorption by osmosis, as it depends on water content, and root interception, limiting root expansion. Losses of nutrients along with soil particles themselves are also part of the processes that create degraded areas resulting from the loss of physical soil quality (DHALIWAL *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2022).

DS is an indicator of how the soil structuring process works, reflecting compaction and the soil-water-plant-atmosphere relationship. SD influences soil solution flows, root growth and density and also seed germination (AJAYI *et al.*, 2021; SHAHEB *et al.*, 2021; REIS *et al.*, 2023).

Para Leão *et al.* (2004) valores de RP acima de 2,0 MPa são considerados críticos para o desenvolvimento radicular. Os valores de 2,5 MPa para pastagens, 3,0 MPa para floresta e 3,5 MPa para Sistema de plantio direto (TORMENA *et al.*, 2007) são crítico para esses sistemas. O valor de 2,0 MPa tem sido utilizado como limite crítico de RP desde os trabalhos de Freitag *et al.* (1971), porém esse valor vem sendo questionado por outros autores como Beutler *et al.* (2004), Bergamin *et al.* (2010) e Secco *et al.* (2005) o que sugere a necessidade de mais estudos.

Influências da Densidade do solo (DS) e densidade de partículas (DP) na qualidade física do solo

A densidade do solo (DS), também conhecida como densidade global ou aparente, expressa a razão entre a massa de sólidos (MS) e o volume total (V) (AMARO FILHO *et al.*, 2008). A densidade do solo inclui o espaço compreendido dentro dos agregados e entre os agregados, isto é, leva em consideração o espaço poroso do solo. Dessa forma, a densidade reflete bem as condições estruturais do solo, pois, como os sólidos não são compressíveis, a maior quantidade de partículas no mesmo volume total só ocorre em detrimento do espaço poroso (KLEIN, 2006; AMARO FILHO *et al.*, 2008).

A densidade do solo é o atributo mais sensível à instalação de sistemas produtivos, no entanto existe uma relação complexa com outros atributos físicos do solo que impedem uma alteração drástica na DS, como o aumento da matéria orgânica em sistema de plantio direto (SPD) (CRUZ, 2017; OBOUR; UGARTE *et al.*, 2021; REICHERT *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2022). Além disso, a alta densidade do solo pode comprometer a dinâmica dos nutrientes porque afeta o movimento da água (transporte via fluxo de massa), a absorção por osmose, pois depende do teor de água, e a interceptação radicular, limitando a expansão radicular. As perdas de nutrientes juntamente com as partículas do solo também fazem parte dos processos que criam áreas degradadas resultantes da perda da qualidade física do solo (DHALIWAL, *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2022).

A DS é um indicador do funcionamento do processo de estruturação do solo, refletindo na compactação e na relação solo-água-planta-atmosfera. A DS Influencia nos fluxos da solução do solo, no crescimento e na densidade das raízes e na germinação das sementes (AJAYI *et al.*, 2021; SHAHEB *et al.*, 2021; REIS *et al.*, 2023).

There is no consensus on a limiting SD value for plant development. Reynolds *et al.* (2002) considers a high SD value when greater than 1.25 g cm^{-3} . Richard *et al.* (2005), in turn, indicates that density varies according to soil characteristics, with clayey soils varying from 1.0 to 1.45 g cm^{-3} and sandy soils varying from 1.25 to 1.70 g cm^{-3} . Reichert *et al.* (2003) proposed a critical soil density for some textural classes: 1.30 to 1.40 g cm^{-3} for clay soils, 1.40 to 1.50 g cm^{-3} for clay loam soils and 1.70 to 1.80 g cm^{-3} for sandy loam soils. Neves Júnior (2013), associates the value of 1.80 g cm^{-3} as critical density, indicating that the soil no longer presents favorable conditions for plant development. According to Goedert and Lobato (1985), DS is normally between 1.00 and 1.25 g cm^{-3} and 1.25 and 1.40 g cm^{-3} for clayey and sandy soils, respectively, with the latter being able to reach to 1.6 g cm^{-3} , or even up to 1.8 g cm^{-3} .

Bergamin *et al.* (2010) carried out research on the influence of compaction on corn cultivation on Red Oxisol, in the state of Mato Grosso do Sul, observing that Ds at layers of 0.0–0.05 and 0.05–0.10 m increased from the pressure applied to the ground by traffic in two passes of a 5 Mg tractor.

Particle Density (PD) or density of solids is the ratio between the total mass and the volume of solids in the sample. It differs from soil density in that it does not include the volume of pores and water contained in a known volume of soil. This property gives, approximately, the mineralogical composition of the soil as well as its organic matter content (AMARO FILHO *et al.*, 2008; RUEHLMANN, 2020; AMOOZEGAR *et al.*, 2023). It is a static attribute, considering that changes are only noticeable over a very considerable period of time, that is, it is practically constant over time and does not depend on the structure. The most frequent values are clay minerals (2.00 to 2.65 g cm^{-3}), quartz and feldspars (2.5 to 2.6 g cm^{-3}), kaolinite (2.60 to 2.68 g cm^{-3}) and organic horizons (1.1 to 1.4 g cm^{-3}) (AMARO FILHO *et al.*, 2008; AMOOZEGAR *et al.*, 2023).

Não há consenso sobre um valor de DS limitante para o desenvolvimento vegetal. Reynolds *et al.* (2002) consideram um valor elevado de DS quando superior a $1,25 \text{ g cm}^{-3}$. Richard *et al.* (2005), por sua vez, indicam que a densidade varia de acordo com as características do solo, sendo solos argilosos variando de 1,0 a $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ e solos arenosos variando de $1,25$ a $1,70 \text{ g cm}^{-3}$. Reichert *et al.*, (2003) propuseram uma densidade crítica do solo para algumas classes texturais: $1,30$ a $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ para solos argilosos, $1,40$ a $1,50 \text{ g cm}^{-3}$ para solos franco-argilosos e de $1,70$ a $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ para solos franco-arenoso. Neves Júnior (2013), associa o valor de $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ como densidade crítica, indicando que o solo não apresenta condições favoráveis ao desenvolvimento das plantas. Segundo Goedert e Lobato (1985), a DS normalmente se apresenta entre 1,00 a $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,25$ a $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ para solos argilosos e arenosos, respectivamente, podendo, os últimos, chegarem a $1,6 \text{ g cm}^{-3}$, ou mesmo, até $1,8 \text{ g cm}^{-3}$.

Bergamin *et al.* (2010) realizaram pesquisa sobre a influência da compactação na cultura do milho sobre Latossolo Vermelho, no estado do Mato Grosso do Sul, observando que a Ds nas camadas de 0,0–0,05 e 0,05–0,10 m aumentou a partir da pressão aplicada no solo pelo tráfego em duas passadas de um trator de 5 Mg.

A Densidade de Partículas (DP) ou densidade dos sólidos é a razão entre a massa total e o volume dos sólidos da amostra. Difere da densidade do solo por não incluir o volume de poros e de água contido em um volume conhecido de solo. Esta propriedade dá, de modo aproximado, a composição mineralógica do solo como também o conteúdo de matéria orgânica (AMARO FILHO *et al.*, 2008; RUEHLMANN, 2020; AMOOZEGAR *et al.*, 2023). É um atributo estático, tendo em vista que mudanças só são perceptíveis em um tempo bastante considerável, ou seja, é praticamente constante ao longo do tempo e independe da estrutura. Os valores mais frequentes são argilominerais ($2,00$ a $2,65 \text{ g cm}^{-3}$), quartzo e feldspatos ($2,5$ a $2,6 \text{ g cm}^{-3}$), caulinita ($2,60$ a $2,68 \text{ g cm}^{-3}$) e horizontes orgânicos ($1,1$ a $1,4 \text{ g cm}^{-3}$) (AMARO FILHO *et al.*, 2008; AMOOZEGAR *et al.*, 2023).

Soil resistance to penetration (RP) and its influence on root growth

RP represents the resistance that a root faces when penetrating the soil and is measured in pressure units such as pascals or kgf cm^{-2} . It is a property that is related to soil texture (of pedogenetic origin), as well as compaction caused by human activities (CRUZ 2017; FERNANDES *et al.*, 2020; SOUZA *et al.*, 2021). Sandy soils with a simple grain structure present little or no resistance to the penetrometer, while clayey soils tend to present greater resistance to this instrument, which is a consequence of their state of aggregation (DEXTER *et al.*, 2007; ARGENTON *et al.*, 2005; NEGIŞ *et al.*, 2020).

In the state of Goiás, Souza *et al.* (2005) found that the area under native cerrado presented lower resistance values, when compared to the area under direct planting. RP together with SD are attributes that are directly related to the speed of water infiltration into the soil, because if a horizon has higher RP and SD, there will be a reduction in pore volume. This reduction interferes with the soil's water retention and infiltration capacity.

In a test of water infiltration speed and penetration resistance (RP), carried out in Yellow Argisol under savannah in Roraima, Vale Júnior and Schaefer (2010), found that the infiltration speed is higher on the surface, with a reduction at the top of Bt, due to the abrupt textural change whose values were found to be above 45.0 cm h^{-1} while the RP was greater than 5.8 MPa .

For physical quality, soil resistance to penetration is considered the most appropriate property to express the degree of soil compaction and, consequently, the ease of root penetration (BENEVENUTE *et al.*, 2020; SOUZA *et al.*, 2021). Therefore, its quantification represents an important indicator of the dynamics of growth and development of the plant root system, in addition to making it possible to predict the behavior of porosity in soil aeration and moisture retention (SILVEIRA *et al.*, 2010; GABRIEL *et al.*, 2021).

Resistência do solo à penetração (RP) e sua influência no crescimento radicular

A RP representa a resistência que uma raiz enfrenta ao penetrar no solo, sendo mensurada em unidades de pressão como pascal ou kgf cm^{-2} . Ela é uma propriedade que está relacionada com a textura do solo (origem pedogenética), bem como com a compactação provocada pelas atividades humanas (CRUZ 2017; FERNANDES *et al.*, 2020; SOUZA *et al.*, 2021). Solos arenosos com estrutura do tipo grãos simples apresentam pouca ou nenhuma resistência ao penetrômetro, ao passo que os mais argilosos tendem a apresentar maior resistência a este instrumento, o que é consequência do seu estado de agregação (DEXTER *et al.*, 2007; ARGENTON *et al.*, 2005; NEGIŞ *et al.*, 2020; SAFFARI *et al.*, 2021).

No estado de Goiás, Souza *et al.* (2005) verificaram que a área sob cerrado nativo apresentou menores valores de resistência, quando comparado à área sob plantio direto. A RP juntamente com a DS são atributos que apresentam relação direta com a velocidade de infiltração de água no solo, pois se um horizonte tem maior RP e DS, haverá redução no volume de poros. Essa redução interfere na capacidade de retenção e infiltração de água no solo.

Em um teste de velocidade de infiltração de água e resistência à penetração (RP), realizados em Argissolo Amarelo sob savana em Roraima, Vale Júnior e Schaefer (2010), verificaram que a velocidade de infiltração é mais elevada em superfície, havendo redução no topo do Bt, em face da mudança textural abrupta cujos valores encontrados estão acima de $45,0 \text{ cm h}^{-1}$ enquanto a RP foi superior a $5,8 \text{ MPa}$.

Para a qualidade física, a resistência do solo à penetração é considerada a propriedade mais adequada para expressar o grau de compactação do solo e, conseqüentemente, a facilidade de penetração das raízes (BENEVENUTE *et al.*, 2020; SOUZA *et al.*, 2021). Por isso, sua quantificação representa importante indicativo da dinâmica de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas, além de permitir prever o comportamento da porosidade na aeração e retenção de umidade do solo (SILVEIRA *et al.*, 2010; GABRIEL *et al.*, 2021).

Importance of total porosity in the dynamics of air and water in the soil

For Amaro Filho *et al.* (2008) porosity is defined as the total voids in the soil occupied by air and water. It is an index of great importance for understanding soil environmental conditions in plant development and production. Allows you to evaluate the volume of voids in relation to the total volume; to estimate the water depth needed to irrigate an area; necessary when calculating drainage projects; an important parameter for evaluating the structure; useful in soil mechanics studies; influences water infiltration and retention, and soil temperature (AMARO FILHO *et al.*, 2008; NGO-CONG, *et al.*, 2021).

When evaluating pore size distribution, Santana *et al.* (2006) observed a loss in the physical quality of the soil where macroporosity was reduced in the cohesive horizons in Yellow Oxisol and Yellow Argisol, averaging 46.1%, for the two soils together, and 57.3%, in the AB horizon in LA, and 33.9% in BA. It should be noted that macroporosity can be considered an integration of granulometry, clay dispersed in water, soil density, total porosity and aggregation, all important attributes involved in cohesion. Authors, such as Cavenage (1999), indicate that a total porosity of 50% would be ideal for root development. However, authors such as Shaheb *et al.*, (2021) and Baretta Júnior *et al.* (2022), indicate that values below 10% are critical for most roots.

Aggregate stability and its contribution as an indicator of physical quality

Aggregate stability represents the resistance of a soil aggregate to mechanical actions. This property also makes it possible to evaluate the dynamics of aggregate formation in the soil (MUSTAFA *et al.*, 2020). If a given management allows the accumulation of organic matter, promotes biological life and does not destroy the connections between soil particles, it can be inferred that aggregates will be formed (DIAZ-ZORITA *et al.*, 2002). From an agricultural point of view, the formation of aggregates is desired because more pore spaces will be formed and this soil will be less susceptible to erosion (CRUZ, 2017). Studying this property can also mitigate or prevent the processes involved in soil degradation, as it influences infiltration, water retention, aeration and resistance to root penetration and surface sealing, water and wind erosion (REICHERT *et al.*, 1993; MENON *et al.*, 2020; RIVERA; BONILLA, 2020).

Importância da Porosidade total na dinâmica do ar e da água no solo

Para Amaro Filho *et al.* (2008) a porosidade é definida como sendo o total de vazios do solo ocupados pelo ar e água. É um índice de grande importância para o conhecimento das condições ambientais do solo no desenvolvimento e na produção vegetal. Permite avaliar o volume de vazios em relação ao volume total; estimar a lâmina de água necessária a irrigação de uma área; necessário no cálculo de projetos de drenagem; importante parâmetro de avaliação da estrutura; útil nos estudos de mecânica do solo e influencia na infiltração, retenção de água e temperatura do solo (AMARO FILHO *et al.*, 2008; NGO-CONG, *et al.*, 2021).

Ao avaliar a distribuição do tamanho dos poros, Santana *et al.* (2006) observaram perda na qualidade física do solo onde a macroporosidade foi reduzida nos horizontes coesos em Latossolo Amarelo e Argissolo Amarelo, sendo em média de 46,1 %, para os dois solos em conjunto, de 57,3 %, no horizonte AB do LA, e de 33,9 %, no BA. Deve-se ressaltar que a macroporosidade pode ser considerada uma integração de granulometria, argila dispersa em água, densidade do solo, porosidade total e agregação, todos atributos importantes envolvidos na coesão. Autores, como Cavenage (1999), indicam que a porosidade total de 50% seria a ideal para o desenvolvimento radicular. Contudo, Shaheb *et al.*, (2021) e Baretta Júnior *et al.* (2022) indicam que valores abaixo de 10% são críticos para a maioria das raízes.

A Estabilidade de agregados e sua contribuição como indicador de qualidade física

A estabilidade de agregados representa a resistência de um agregado de solo à ações mecânicas. Esta propriedade também permite avaliar as dinâmicas de formação de agregados no solo (MUSTAFA *et al.*, 2020). Se um dado manejo permite o acúmulo de matéria orgânica, promove a vida biológica e não destrói as ligações entre partículas do solo, assim pode-se inferir que haverá a formação de agregados (DIAZ-ZORITA *et al.*, 2002). Do ponto de vista agrícola, a formação de agregados é desejada porque haverá formação de mais espaços porosos e que este solo estará menos susceptível à erosão (CRUZ, 2017). Estudar esta propriedade pode também mitigar ou prevenir os processos envolvidos na degradação do solo, pois influencia a infiltração, retenção de água, aeração e resistência à penetração de raízes e selamento superficial, erosão hídrica e eólica (REICHERT *et al.*, 1993; MENON *et al.*, 2020; RIVERA; BONILLA, 2020).

The aggregate formation process can be influenced by several soil properties, such as texture, iron and aluminum oxide content, organic matter content and microbial activity, as well as soil management. Organic matter plays an important role in aggregation due to its cementing action on soil particles (FERREIRA *et al.*, 2010; WITZGALL *et al.*, 2021; KAN *et al.*, 2022). In aggregation, the union between free and aggregated primary particles of silt size first occurs through persistent binding agents, such as humified organic matter or complexes with polyvalent cations, oxides and aluminosilicates, forming microaggregates (20 to 250 μm). Afterwards, these stable microaggregates are joined by temporary binding agents (fungal roots or hyphae) and polysaccharides derived from microorganisms or plants, resulting in macroaggregates ($> 250 \mu\text{m}$) (TISDALL; OADES, 1982; FERREIRA *et al.*, 2020; LAVELLE *et al.*, 2020).

Keeping the soil “alive” means increasing the flow of energy in the system, which culminates in the physical quality of the soil. This flow of energy results from the growth activity of roots and fungal hyphae, together with residues from plants, insects and other organisms, stimulating the formation of more complex and diverse structures, such as stable macroaggregates (HALLAM and HODSON, 2020; DIJKSTRA *et al.*, 2021; HAN *et al.*, 2021). The occurrence of reduced energy flows results in a low level of organization, in which the soil structure is simple, with a predominance of microaggregates (HALLAM and HODSON, 2020; DIJKSTRA *et al.*, 2021; HAN *et al.*, 2021). On the other hand, with a high flow of energy and matter, the level of organization achieved is higher, with larger aggregates occurring and forming large and complex structures. Therefore, from an agricultural point of view, soils with greater aggregation can be considered in a higher order state than similar soils with less aggregation (FERREIRA *et al.*, 2010).

Changes in the stability of aggregates and other physical attributes of the soil, resulting from liming and fertilization, can be linked to two main mechanisms. The first of these refers to the direct effect of such practices, which modify the chemical composition of the soil solution. Thus, changes in pH, ionic strength of the solution and types of ions present would significantly influence the dispersion or flocculation of colloids, consequently interfering with the aggregation of soil particles (SETA; KARATHANASIS, 1997; CONRADI JÚNIOR *et al.*, 2020; GETAHUN *et al.*, 2021; BLOMQUIST *et al.*, 2022).

O processo de formação de agregados pode ser influenciado por diversas propriedades do solo, como textura, teor de óxidos de ferro e alumínio, teor de matéria orgânica e atividade microbiana e pelo manejo do solo. A matéria orgânica atua de maneira importante na agregação devido à sua ação cimentante sobre as partículas do solo (FERREIRA *et al.*, 2010; WITZGALL *et al.*, 2021; KAN *et al.*, 2022). Na agregação, ocorre primeiramente a união entre as partículas primárias livres e agregadas de tamanho do silte por meio de agentes ligantes persistentes, como matéria orgânica humificada ou complexos com cátions polivalentes, óxidos e aluminossilicatos, formando microagregados (20 a 250 μm). Após isso, esses microagregados estáveis são unidos por agentes ligantes temporários (raízes ou hifas de fungos) e polissacarídeos derivados de microrganismos ou plantas, resultando em macroagregados ($> 250 \mu\text{m}$) (TISDALL; OADES, 1982; FERREIRA *et al.*, 2020; LAVELLE *et al.*, 2020).

Manter o solo “vivo” significa elevar o fluxo de energia no sistema, o que culmina na qualidade física do solo. Esse fluxo de energia é resultante da atividade de crescimento de raízes e hifas de fungos, juntamente com resíduos de vegetais, insetos e outros organismos, estimulando a formação de estruturas mais complexas e diversificadas, como macroagregados estáveis (HALLAM e HODSON, 2020; DIJKSTRA *et al.*, 2021; HAN *et al.*, 2021). A ocorrência de fluxos de energia reduzidos resulta em nível de organização baixo, em que a estrutura do solo é simples, com predomínio de microagregados (HALLAM e HODSON, 2020; DIJKSTRA *et al.*, 2021; HAN *et al.*, 2021). Por outro lado, com elevado fluxo de energia e matéria o nível de organização atingido é mais elevado, ocorrendo agregados maiores e formando grandes e complexas estruturas. Portanto, do ponto de vista agrícola, solos com maior agregação podem ser considerados em estado de ordem superior ao de solos semelhantes com menor agregação (FERREIRA *et al.*, 2010).

As mudanças na estabilidade de agregados e outros atributos físicos do solo, decorrentes da calagem e da adubação, podem estar ligadas a dois mecanismos principais. O primeiro deles refere-se ao efeito direto de tais práticas, que modificam a composição química da solução do solo. Assim, as alterações no pH, na força iônica da solução e nos tipos de íons presentes, influenciariam significativamente a dispersão ou floculação dos colóides, interferindo, por consequência, na agregação das partículas do solo (SETA; KARATHANASIS, 1997; CONRADI JÚNIOR *et al.*, 2020; GETAHUN *et al.*, 2021; BLOMQUIST *et al.*, 2022).

The second mechanism refers to the indirect effect of adding limestone and fertilizers to the soil, which would favor the production of crop biomass, leading to a greater addition of organic matter, which would increase microbial activity and the stability of aggregates (SETA; KARATHANASIS, 1997; CONRADI JÚNIOR *et al.*, 2020; GETAHUN *et al.*, 2021; BLOMQUIST *et al.*, 2022).

Water-dispersed clay (WDC) and degree of flocculation (DF)

The composition of exchangeable ions in the soil solution causes changes in the interactions between mineral particles in the soil, consequently affecting the dispersion and flocculation of clay. As clay becomes more dispersed, aggregate stability decreases and crust formation becomes more common (SKOPP, 2002; ABBASLOU *et al.*, 2020; AWEDAT *et al.*, 2021). The pores are filled with clay and, ultimately, affect the hydraulic conductivity of the soil (SKOPP, 2002).

The increase in ADA may be directly related to the decrease in water infiltration in some Brazilian soils (MELO *et al.*, 2016). Therefore, the great mobility of ADA can provide means for transporting poorly soluble substances over unpredictable distances (MELO *et al.*, 2016; NUNES *et al.*, 2021).

WDC can also be used to assess soil susceptibility to water erosion, however interest in this fraction of soil has increased due to its interference with the mobility of toxic substances in the soil (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004). This is because the dispersion of colloids is related to the interaction of electrical charges on their surface in a polar medium (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004).

Flocculation, on the other hand, is caused by van der Waals forces of attraction that arise from variations in the electromagnetic fields of mineral atoms. Van der Waals forces are weak and short-range. Flocculation occurs when there is a high electrolyte concentration and/or high valence of ions, which result in the dominance of attraction forces over repulsion forces (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004; ABBASLOU *et al.*, 2020; ALEMAYEH; TESHOME, 2021).

O segundo mecanismo refere-se ao efeito indireto da adição de calcário e adubos ao solo, que favoreceria a produção de fitomassa das culturas, levando a uma maior adição de matéria orgânica, que incrementaria a atividade microbiana e a estabilidade dos agregados (SETA; KARATHANASIS, 1997; CONRADI JÚNIOR *et al.*, 2020; GETAHUN *et al.*, 2021; BLOMQUIST *et al.*, 2022).

Argila dispersa em água (ADA) e grau de flocculação (GF)

A composição de íons trocáveis na solução do solo provoca alterações nas interações entre as partículas minerais do solo, afetando, consequentemente a dispersão e flocculação da argila. Conforme a argila fica mais dispersa, diminui-se a estabilidade de agregados e a formação de crostas se torna mais comum (SKOPP, 2002; ABBASLOU *et al.*, 2020; AWEDAT *et al.*, 2021). Os poros são preenchidos por argila e, por fim, afetam a condutividade hidráulica do solo (SKOPP, 2002).

O aumento da ADA pode estar diretamente relacionado com o decréscimo da infiltração de água em alguns solos brasileiros (MELO *et al.*, 2016). Com isso, a grande mobilidade da ADA pode prover meios para o transporte de substâncias pouco solúveis por distâncias imprevisíveis (MELO *et al.*, 2016; NUNES *et al.*, 2021).

A ADA também pode ser usada para avaliar a susceptibilidade do solo à erosão hídrica, porém o interesse nessa fração do solo tem aumentado devido à sua interferência na mobilidade de substâncias tóxicas no solo (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004). Isso porque a dispersão de colóides está relacionada à interação das cargas elétricas em sua superfície em um meio polar (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004).

A flocculação, por outro lado, é causada por forças de atração de van der Waals que surgem de variações nos campos eletromagnéticos dos átomos dos minerais. As forças de van der Waals são fracas e de curto alcance. A flocculação ocorre quando há uma grande concentração eletrolítica e/ou alta valência de íons, que resultam em dominância de forças de atração sobre forças de repulsão (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004; ABBASLOU *et al.*, 2020; ALEMAYEHU; TESHOME, 2021).

Fertilization management can affect the way particles disperse or flocculate, due to the forces resulting from the adsorption of polymers on colloidal surfaces, causing charge inversion. Inverse charges can also result from specific adsorption, for example, of the phosphate ion by iron and kaolinite oxides (SOJKA *et al.*, 1998; WANG *et al.*, 2020; CONRADI JÚNIOR *et al.*, 2020; BATISTA *et al.*, 2022). In this sense, lime applied to soils increases pH and exchangeable calcium and magnesium levels, promoting chemical quality, resulting in increased productivity. An increase in pH results in an increase in negative electrical charges at the expense of positive ones. Furthermore, divalent cations such as Ca^{2+} and Mg^{2+} replace aluminum (trivalent), which is the main ion in the double layer in most tropical soils under native conditions (NGUETNKAM and DULTZ, 2014).

Soil organic matter and its correlation with physical properties

Organic matter is the ideal indicator of soil quality due to its importance in the physical, chemical and biological processes that occur in the soil. Among these processes are: nutrient cycling and retention, soil aggregation and water dynamics, and primary source of energy for soil biological activities (TIRLONI *et al.*, 2012; LAL, 2020; MESELE *et al.*, 2024).

Soil Organic Matter (SOM) is composed of living and non-living components. The first are roots, fauna and soil microorganisms. Non-living components include macroorganic matter (decomposing plant residues, humified and non-humified substances). Non-humified substances include carbohydrates, lipids, amino acids, proteins, lignins, nucleic acids, pigments, and a variety of organic acids. In turn, humified substances are composed of the fractions fulvic acid, humic acid and humin (PASSOS *et al.*, 2007; LAL, 2020; MESELE *et al.*, 2024).

Microorganisms are the SOM components most affected by soil use and management, as they play an important role in soil aggregation. The intense use and preparation of the soil, with the disturbance of the surface layer, favors the exposure of the labile fraction of SOM to oxidizing agents, causing its mineralization (RIGOLIN *et al.*, 2013; KRAUT-COHEN *et al.*, 2020; NIEWIADOMSKA *et al.*, 2020).

O manejo da adubação pode afetar a maneira como as partículas se dispersam ou floculam, devido às forças resultantes da adsorção de polímeros nas superfícies coloidais, causando inversão de carga. Cargas inversas podem também resultar da adsorção específica, por exemplo, do íon fosfato por óxidos de ferro e caulinita (SOJKA *et al.*, 1998; WANG *et al.*, 2020; CONRADI JÚNIOR *et al.*, 2020; BATISTA *et al.*, 2022). Neste sentido, o calcário aplicado nos solos eleva o pH, os teores de cálcio e de magnésio trocáveis promovendo qualidade química com reflexo no aumento de produtividade. O aumento do pH resulta em aumento nas cargas elétricas negativas em detrimento das positivas. Além disso, cátions bivalentes como o Ca^{2+} e o Mg^{2+} substituem o alumínio (trivalente), que é o principal íon na dupla camada na maioria dos solos tropicais em condições nativas (NGUETNKAM e DULTZ, 2014).

Matéria orgânica do solo e sua correlação com as propriedades físicas

A matéria orgânica é o indicador ideal da qualidade do solo devido à sua importância nos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no solo. Dentre esses processos estão: ciclagem e retenção de nutrientes, agregação do solo e dinâmica da água, e fonte primária de energia para as atividades biológicas do solo (TIRLONI *et al.*, 2012; LAL, 2020; MESELE *et al.*, 2024).

A Matéria Orgânica do Solo (MOS) é composta por componentes vivos e não-vivos. Os primeiros são raízes, fauna e os microrganismos do solo. Os componentes não-vivos incluem a matéria macrorgânica (resíduos de vegetais em decomposição, as substâncias humificadas e as não-humificadas). As substâncias não-humificadas incluem carboidratos, lipídeos, aminoácidos, proteínas, ligninas, ácidos nucleicos, pigmentos e uma variedade de ácidos orgânicos. Por sua vez, as substâncias humificadas são compostas pelas frações ácido fúlvico, ácido húmico e humina (PASSOS *et al.*, 2007; LAL, 2020; MESELE *et al.*, 2024).

Os microrganismos são os componentes da MOS mais afetados pelo uso e manejo do solo, pois exercem ação importante na agregação dos solos. A utilização e o preparo intenso do solo, com revolvimento da camada superficial, favorecem a exposição da fração lábil da MOS a agentes oxidantes, causando sua mineralização (RIGOLIN *et al.*, 2013; KRAUT-COHEN *et al.*, 2020; NIEWIADOMSKA *et al.*, 2020).

SOM also interacts with minerals in the soil, forming organomineral complexes through different interaction mechanisms, resulting in secondary particles of different sizes and shapes, from micro to macroaggregates of a few millimeters in size (TISDALL; OADES, 1982). Organic matter influences practically all chemical and physical attributes of the soil, providing a greater state of aggregation/structuring, porosity, moisture retention and lower density and resistance to penetration. This indicates that agricultural systems must have the accumulation of SOM as their main objective (NEVES JÚNIOR, 2008; PROUT *et al.*, 2021; WITZGALL *et al.*, 2021; GERJKE, 2022).

Well-managed pasture systems, crop-livestock-forest integration systems and direct planting systems (SPD) have been successful in increasing SOM levels. These systems have been cited as conservation methods that mitigate greenhouse gas emissions from agriculture, in addition to improving the physical quality of the soil (CRUZ, 2017; FREITAS *et al.*, 2020; TEAGUE and KREUTER, 2020; DALAL *et al.*, 2021; PROUT *et al.*, 2021).

CONCLUSIONS

The physical quality of the soil plays a preponderant role in the planning of agricultural activities and in the political guidelines for land occupation. Breeding or planting systems must aim to maintain this quality, not only physical, but also chemical and biological, so that an optimum point can be reached between environmental conservation and food production;

Soil physics studies have focused mainly on conventional management systems for crops such as soybeans, sugarcane, cotton and corn;

There is a lack of studies in sensitive biomes such as the Amazon and the caatinga. Soil degradation in these biomes has a negative impact on various ecosystem services. Therefore, it is necessary to encourage more research aimed at soil physics, in addition to establishing institutional partnerships to train specialist researchers in this area for the most fragile biomes.

A MOS também interage com minerais no solo formando complexos organominerais por meio de diversos mecanismos de interação, resultando em partículas secundárias de diversos tamanhos e formas, desde micro até macroagregados de alguns milímetros de tamanho (TISDALL; OADES, 1982). A matéria orgânica influencia em praticamente todos os atributos químicos e físicos do solo, conferindo maior estado de agregação/estruturação, porosidade, retenção de umidade e menor densidade e resistência à penetração. Isso indica que os sistemas agrícolas devem ter o acúmulo de MOS como principal objetivo (NEVES JÚNIOR, 2008; PROUT *et al.*, 2021; WITZGALL *et al.*, 2021; GERJKE, 2022).

Os sistemas de pastagem bem manejados, os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta e o sistema de plantio direto (SPD) tem logrado êxito ao conseguir aumentar os teores de MOS. Estes sistemas têm sido citados como métodos conservacionistas que mitigam as emissões de gases de efeito estufa pela agricultura, além de conseguirem melhorar a qualidade física do solo (CRUZ, 2017; FREITAS *et al.*, 2020; TEAGUE e KREUTER, 2020; DALAL *et al.*, 2021; PROUT *et al.*, 2021).

CONCLUSÕES

A qualidade física do solo assume papel preponderante no planejamento de atividades agrícolas e nas diretrizes políticas de ocupação das terras. Os sistemas de criação ou plantio devem visar a manutenção dessa qualidade, não só física, mas também química e biológica, para que se alcance um ponto ótimo entre conservação ambiental e produção de alimentos;

Os estudos de física do solo têm focado principalmente nos sistemas de manejo convencionais de culturas como soja, cana, algodão e milho;

Há carência de estudos nos biomas sensíveis como os da Amazônia e da caatinga. A degradação do solo nesses biomas tem um impacto negativo sobre os diversos serviços ecossistêmicos. Desta forma, faz-se necessário o fomento de mais pesquisas direcionadas à física do solo, além do estabelecimento de parcerias institucionais para a formação de pesquisadores especialistas nesta área para os biomas mais frágeis.

CITED SCIENTIFIC LITERATURE

- ABBASLOU, H.; HADIFARD, H.; GHANIZADEH, A. R. Effect of cations and anions on flocculation of dispersive clayey soils. **Heliyon**, v. 6, p. 1-8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03462>
- ACQUAH, K.; CHEN, Y. Soil compaction from wheel traffic under three tillage systems. **Agriculture**, v. 12, p. 219, 2022.
- AJAYI, A. E.; FALOYE, O. T.; REINSCH, T.; HORN, R. Changes in soil structure and pore functions under long term/continuous grassland management. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 314, p. 107-407, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107407>
- ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MAFRA, A. L.; FONTANA, E. C. Aplicação de Calcário e Fósforo e Estabilidade da Estrutura de um Solo Ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 799-806, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500004>
- ALEMAYEHU, B.; TESHOME, H. Soil colloids, types and their properties: A review. **Open Journal of Bioinformatics and Biostatistics**, v. 5, p. 008-013, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17352/ojbb.000010>
- ALEMINNEW, A. Impacts of Land Degradation on Crop Yields and its Management Options: A Review. **Agricultural Reviews**, v. 45, n. 1, p. 52-69, 2024. DOI: <https://doi.org/10.18805/ag.RF-263>
- ALENCAR, A. C. F.; ALMEIDA, C. M. J. Potencial de macrófitas aquáticas no desenvolvimento de plantas e sua contribuição na restauração de áreas degradadas, Petrolina/Pernambuco. **Brazilian Journal of Development**, v. 10, n. 1, p. 837-849, 2024. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv10n1-053>
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Física do Solo: Conceitos e Aplicações. Fortaleza. **Imprensa Universitária**, 2008. 290 p.
- AMOOZEGAR, A.; HEITMAN, J. L.; KRANZ, C. N. Comparison of soil particle density determined by a gas pycnometer using helium, nitrogen, and air. **Soil Science Society of America Journal**, v. 87, n. 1, p. 1-12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20476>
- ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; WILDNER, L. P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 425-435, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000300013>
- ARNHOLD, S.; OTIENO, D.; ONYANGO, J.; KOELLNER, T.; HUWE, B.; TENHUNEN, J. Soil properties along a gradient from hillslopes to the savanna plains in the Lambwe Valley, Kenya. **Soil and Tillage Research**, v. 154, p. 75-83, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.021>
- ARSHAD, M. A.; MARTINS, S. Identifying Critical Limits for Soil Quality Indicators in Agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 88, p. 153-160, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00252-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00252-3)
- ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; OLIVEIRA, J. M. WRUCK, F. J.; MADARI, B. E.; HEINEMANN, A. B. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Agrarian**, v. 12, p. 57-70, 2019. DOI: <https://doi.org/10.30612/agrarian.v12i43.8520>
- AWEDAT, A. M.; ZHU, Y.; BENNETT, J. M.; RAINE, S. R. The impact of clay dispersion and migration on soil hydraulic conductivity and pore networks. **Geoderma**, v. 404, p. 115-297, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115297>
- AZEVEDO, A. C.; BONUMÁ, A. S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Ciência Rural**, v. 34, p. 609-617, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000200046>
- BARBOSA, F. A.; COSTA, P. M.; ANDRADE, V. J.; MAIA FILHO, G. H. B.; MACIEL, I. C. F.; LOPES, S. Q. Avaliação econômica e produtiva dos sistemas integrados de lavoura-pecuária-floresta. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 7, p. 151-165, 2015.
- BARBOSA, L. C.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. A.; ROSSI NETO, J.; CARVALHO, J. L. N. Untrafficked furrowed seedbed sustains soil physical quality in sugarcane mechanized fields. **European Journal of Soil Science**, v. 72, n. 5, p. 2150-2164, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13107>

- BARETA JUNIOR, E.; GENÚ, A. M.; RAMPIM, L.; UMBURANAS, R. C.; POTT, C. A. Critical limits of soil physical attributes for corn and black oat in a Xanthic Hapludox. **Revista Ciência Agronômica**, v. 53, p. 20-75, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220003>
- BATISTA, A. M.; LIBARDI, P. L.; ALVES, M. E.; PRATAVIERA, F.; GIAROLA, N. F. B. Electrochemical Effects on Clay Dispersion in Rhizo-and Non-rhizospheric Soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 3518-3526, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00906-9>
- BENEVENUTE, P. A.; MORAIS, E. G.; SOUZA, A. A.; VASQUES, I. C.; CARDOSO, D. P.; SALES, F. R.; SILVA, B. M. Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures. **Ecological Indicators**, v. 117, p. 106-147, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106647>
- BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 681-691, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300009>
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Compactação do Solo e Intervalo Hídrico Ótimo na Produtividade de Arroz de Sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 575-580, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000600009>
- BLOMQUIST, J.; ENGLUND, J. E.; BERGLUND, K. Soil characteristics and tillage can predict the effect of 'structure lime' on soil aggregate stability. **Soil Research**, v. 60, n. 4, p. 373-384, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR21022>
- BOTTA, G. F.; ANTILLE, D. L.; BIENVENIDO, F.; RIVERO, D.; AVILA-PEDRAZA, E. A.; CONTESSOTTO, E. E.; CANALEJO, A. E. Effect of cattle trampling and farm machinery traffic on soil compaction of an Entic Haplustoll in a semiarid region of Argentina. **Agronomy Research**, v. 18, p. 1163-1176, 2020. DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.20.063>
- BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, coordenação da Casa Civil da Presidência da República. Brasília: MAPA/ACS, 2012. 173 p.
- BUSSELL, J.; CROTTY, F.; STOATE, C. Comparison of compaction alleviation methods on soil health and greenhouse gas emissions. **Land**, v. 10, n. 12, p. 1397, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10121397>
- CASTELLINI, M.; GIGLIO, L.; MODUGNO, F. Sampled soil volume effect on soil physical quality determination: A case study on conventional tillage and no-tillage of the soil under winter wheat. **Soil Systems**, v. 4, n. 4, p. 72, 2020.
- CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 137-147, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000100014>
- CAVENAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C. CARVALHO, M. A. C.; FREITAS, M. L. M.; BUZETTI, S. Alterações nas Propriedades Físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob Diferentes Culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 997-1003, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000400027>
- CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, p. 156-168, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>
- COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1663-1674, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006001100013>

- COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 933-942, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300003>
- CONRADI JUNIOR, E.; JR, A. C. G.; SEIDEL, E. P.; ZIEMER, G. L.; ZIMMERMANN, J.; DE OLIVEIRA, V. H. D.; ZENI, C. D. Effects of liming on soil physical attributes: a review. **Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v12n10p278>
- CONTE, O.; FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; LEVIEN, R.; WESP, C. L. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1301-1309, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000026>
- CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARTHA JUNIOR, G. B. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, v. 32, p. 15-53, 2015.
- CRUZ, D. L. S. Influência de sistemas integrados de produção nas características físicas e químicas de um Argissolo. 2017, 127 p. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Roraima, Boa Vista.
- CRUZ, D. L. S.; VALE JÚNIOR, J. F.; CRUZ, P. L. S.; CRUZ, A. B. S.; NASCIMENTO, P. P. R. R. Atributos físico-hídricos de um Argissolo Amarelo sob floresta e savana naturais convertidas para pastagem em Roraima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 307-314, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100031>
- DA SILVA, G. F.; CALONEGO, J. C.; LUPERINI, B. C. O.; CHAMMA, L.; ALVES, E. R.; RODRIGUES, S. A.; SILVA, M. A. Soil-Plant relationships in soybean cultivated under conventional tillage and long-term no-Tillage. **Agronomy**, v. 12, n. 3, p. 697, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomia12030697>
- DALAL, R. C.; THORNTON, C. M.; ALLEN, D. E.; OWENS, J. S.; KOPITTKKE, P. M. Long-term land use change in Australia from native forest decreases all fractions of soil organic carbon, including resistant organic carbon, for cropping but not sown pasture. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 311, p. 107-326, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107326>
- DAMME, L.; SCHJØNNING, P.; MUNKHOLM, L. J.; GREEN, O.; NIELSEN, S. K.; LAMANDÉ, M. Soil structure response to field traffic: Effects of traction and repeated wheeling. **Soil and Tillage Research**, v. 213, p. 105-128, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105128>
- DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A.; GATE, O. P. A. Method for prediction of soil penetration resistance. **Soil and Tillage Research**, v.93, p. 412-419, 2007.
- DHALIWAL, S. S.; RAM, H.; WALIA, S. S.; WALIA, M. K.; KUMAR, B.; DHALIWAL, M. K. Long-term influence of nutrient management on carbon and nutrients in Typic-Ustochrept soils. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 50, p. 2420-2428, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1659308>
- DIAZ-ZORITA, M.; PERFECT, E.; GROVE, J. H. Disruptive methods for assessing soil structure. **Soil and Tillage Research**, v. 64, p. 3-22, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00254-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00254-9)
- DIJKSTRA, F. A.; ZHU, B.; CHENG, W. Root effects on soil organic carbon: a double-edged sword. **New Phytologist**, v. 230, n. 1, p. 60-65, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.17082>
- EYUBOGLU, K.; UZAR, U. Examining the roles of renewable energy consumption and agriculture on CO2 emission in lucky-seven countries. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 36, p. 45031-45040, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10374-2>
- FERNANDES, M. M. H.; COELHO, A. P.; DA SILVA, M. F.; BERTONHA, R. S.; DE QUEIROZ, R. F.; FURLANI, C. E. A.; FERNANDES, C. Estimation of soil penetration resistance with standardized moisture using modeling by artificial neural networks. **Catena**, v. 189, p. 104-155, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104505>

- FERNANDEZ, E. M.; CRUSCIOL, C. A. C.; THIMOTEO, C. M. S.; ROSOLEM, C. A. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. **Científica**, v. 23, p. 117-132, 1995.
- FERREIRA, C. J. B.; TORMENA, C. A.; SEVERIANO, E. D. C.; ZOTARELLI, L.; BETIOLI JÚNIOR, E. Soil compaction influences soil physical quality and soybean yield under long-term no-tillage. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 67, n. 3, p. 383-396, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1733535>
- FERREIRA, C. R.; DA SILVA NETO, E. C.; PEREIRA, M. G.; GUEDES, J. N.; ROSSET, J. S.; DOS ANJOS, L. H. C. Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. **Soil and Tillage Research**, v. 198, p. 104-133, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/10.1016/j.still.2019.104533>
- FERREIRA, R. R. M.; FILHO, J. T.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, p. 913-932, 2010.
- FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 947-953, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000800007>
- FREITAG, D. R. Methods of measuring soil compaction. In: BARNES, K.K.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.; VAN DEN BERG, G. E. Compaction of agricultural soils. Madison: American Society of Agricultural Engineers, 1971. cap. 4, p.47-105.
- FREITAS, I. C.; RIBEIRO, J. M.; ARAÚJO, N. C. A.; SANTOS, M. V.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A.; FRAZÃO, L. A. Agrosilvopastoral systems and well-managed pastures increase soil carbon stocks in the Brazilian Cerrado. **Rangeland Ecology & Management**, v. 73, p. 776-785, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.08.001>
- GABRIEL, J. L.; GONZÁLEZ, I. G.; QUEMADA, M.; LAMMERDING, D. M.; AYUSO, M. A.; HONTORIA, C. Cover crops reduce soil resistance to penetration by preserving soil surface water content. **Geoderma**, v. 386, p. 114-191, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114911>
- GERKE, J. The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage. **Soil Systems**, v. 6, p. 33-65, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems6020033>
- GETAHUN, G. T.; ETANA, A.; MUNKHOLM, L. J.; KIRCHMANN, H. Liming with CaCO₃ or CaO affects aggregate stability and dissolved reactive phosphorus in a heavy clay subsoil. **Soil and Tillage Research**, v. 214, p. 105-162, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105162>
- GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; DUTRA, A. C. Degradação Física de um Latossolo Vermelho Utilizado para Produção Intensiva de Forragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 863-873, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500004>
- GOEDERT, W. J.; LOBATO, E. Eficiência Agronômica de fosfato em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 97-102, 1985.
- HÅKANSSON, I.; VOORHEES, W. B. Soil compaction. Methods for assessment of soil degradation. 1. ed. CRC Press, 2020. 576 p.
- HALLAM, J.; HODSON, M. E. Impact of different earthworm ecotypes on water stable aggregates and soil water holding capacity. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 5, p. 607-617, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01432-5>
- HAN, S.; BAQUERIZO, M. D.; LUO, X.; LIU, Y.; VAN NOSTRAND, J. D.; CHEN, W.; HUANG, Q. Soil aggregate size-dependent relationships between microbial functional diversity and multifunctionality. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 154, p. 108-143, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108143>
- HOU, T.; FILLEY, T. R.; TONG, Y.; ABBAN, B.; SINGH, S.; PAPANICOLAOU, A. T.; CHAUBEY, I. Tillage-induced surface soil roughness controls the chemistry and physics of eroded particles at early erosion stage. **Soil and Tillage Research**, v. 207, p. 104-807, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104807>
- HU, W.; DREWRY, J.; BEARE, M.; EGER, A.; MÜLLER, K. Compaction induced soil structural degradation affects productivity and environmental outcomes: a review and New Zealand case study. **Geoderma**, v. 395, p. 115-335, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115035>

- HUANG, X.; HORN, R.; REN, T. Soil structure effects on deformation, pore water pressure, and consequences for air permeability during compaction and subsequent shearing. **Geoderma**, v. 406, p. 115-452, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115452>
- ISLAM, W.; NOMAN, A.; NAVEED, H.; HUANG, Z.; CHEN, H. Y. Role of environmental factors in shaping the soil microbiome. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 41225-41247, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10471-2>
- JORDAN, M. W. Does mixed vs separate sheep and cattle grazing reduce soil compaction?. **Soil Use and Management**, v. 37, n. 4, p. 822-831, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12659>
- JUHÁSZ, C. E. P.; CURSI, P. R.; COOPER, M.; OLIVEIRA, T. C.; RODRIGUES, R. R. Dinâmica Físico – Hídrica de uma Topossequência de Solos Sob Savana Florestada (Cerradão) em Assis SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p.401-412, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000300002>
- KAN, Z. R.; LIU, W. X.; LIU, W. S.; LAL, R.; DANG, Y. P.; ZHAO, X.; ZHANG, H. L. Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective. **Global Change Biology**, v. 28, n. 3, p. 693-710, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15968>
- KLEIN, V. A. Densidade relativa - Um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 5, p. 26-32, 2006.
- KRAUT-COHEN, J.; ZOLTI, A.; SHALTIEL-HARPAZ, L.; ARGAMAN, E.; RABINOVICH, R.; GREEN, S. J.; MINZ, D. Effects of tillage practices on soil microbiome and agricultural parameters. **Science of the Total Environment**, v. 705, p. 135-191, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135791>
- KUHWALD, M.; BUSCHE, F.; SAGGAU, P.; DUTTMANN, R. Is soil loss due to crop harvesting the most disregarded soil erosion process? A review of harvest erosion. **Soil and Tillage Research**, v. 215, p. 105-213, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105213>
- LAL, R. Soil organic matter content and crop yield. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 75, p. 27-32, 2020. DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.75.2.27A>
- LAVELLE, P.; SPAIN, A.; FONTE, S.; BEDANO, J. C.; BLANCHART, E.; GALINDO, V.; ZANGERLÉ, A. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. **Acta Oecologica**, v. 105, p. 103-161, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103561>
- LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 415-423, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300002>
- LIU, H.; COLOMBI, T.; JÄCK, O.; KELLER, T.; WEIH, M. Effects of soil compaction on grain yield of wheat depend on weather conditions. **Science of the Total Environment**, v. 807, p. 150-763, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150763>
- LÔBO, R. L. L.; SIQUEIRA, T. M. V.; MARTINS, E. S.; DE LIMA, A. S. T. Sistemas agroflorestais na recuperação de áreas degradadas. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 38127-38142, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n4-326>
- MELO, T. R.; TELLES, T. S.; MACHADO, W. S.; TAVARES FILHO, J. Factors affecting clay dispersion in Oxisols treated with vinasse. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, p. 3997-4004, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n6p3997>
- MENDONÇA, V. Z.; MELLO, L. M. M.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, F. C. B. L.; LIMA, R. C.; FILHO, W. V. V.; YANO, E. H. Avaliação dos atributos físicos do solo em consórcio de forrageiras e milho em sucessão com soja em região de cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 251-259, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100026>
- MENON, M.; MAWODZA, T.; RABBANI, A.; BLAUD, A.; LAIR, G. J.; BABAEI, M.; BANWART, S. Pore system characteristics of soil aggregates and their relevance to aggregate stability. **Geoderma**, v. 366, p. 114-259, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114259>
- MESELE, S. A.; OCANSEY, C. M.; BOUGMA, A.; AZEEZ, J. O.; AJIBOYE, G. A.; LOGAH, V.; LLOYD, J. Emerging ecological trends in West Africa: implications on soil organic matter and other soil quality indicators. **Plant and Soil**, p. 1-18, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06568-z>

- MILEUSNIĆ, Z. I.; SALJNIKOV, E.; RADOJEVIĆ, R. L.; PETROVIĆ, D. V. Soil compaction due to agricultural machinery impact. **Journal of Terramechanics**, v. 100, p. 51-60, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.12.002>
- MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; BETIOLI JUNIOR, E.; PETEAN, L. P.; ALVES, S. J. Influência da altura de pastejo de azevém e aveia em atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférrico, após sete anos sob integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1315-1326, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400027>
- MUSTAFA, A.; MINGGANG, X.; SHAH, S. A. A.; ABRAR, M. M.; NAN, S.; BAOREN, W.; NÚÑEZ-DELGADO, A. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110-194, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110894>
- NEGIŞ, H.; ŞEKER, C.; GÜMÜŞ, I.; MANIRAKIZA, N.; MÜCEVHER, O. Effects of biochar and compost applications on penetration resistance and physical quality of a sandy clay loam soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n. 1, p. 38-44, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1695819>
- NGO-CONG, D.; ANTILLE, D. L.; TH. VAN GENUCHTEN, M.; NGUYEN, H. Q.; TEKESTE, M. Z.; BAILLIE, C. P.; GODWIN, R. J. A modeling framework to quantify the effects of compaction on soil water retention and infiltration. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, p. 1931-1945, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20328>
- NGUETNKAM, J. P.; DULTZ, S. Clay dispersion in typical soils of north cameroon as a function of pH and electrolyte concentration. **Land degradation & development**, v. 25, p. 153-162, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.1155>
- NIERO, L. A. C.; DECHEN, S. C. F.; COELHO, R. M.; MARIA, I. C. Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um Latossolo Vermelho distroférrico com usos e manejos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1271-1282, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400025>
- NIEWIADOMSKA, A.; MAJCHRZAK, L.; BOROWIAK, K.; WOLNA-MARUWKA, A.; WARACZEWSKA, Z.; BUDKA, A.; GAJ, R. The influence of tillage and cover cropping on soil microbial parameters and spring wheat physiology. **Agronomy**, v. 10, p. 200-210, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomia10020200>
- NUNES, M. R.; VAZ, C. M.; PESSOA, T. N.; DENARDIN, J. E.; KARLEN, D. L.; GIAROLA, N. F.; LIBARDI, P. L. Inherent and dynamic effects on the structural stability of Brazilian Oxisols. **Geoderma**, v. 27, p. 04-26, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoder.2021.e00426>
- OBOUR, P. B.; UGARTE, C. M. A meta-analysis of the impact of traffic-induced compaction on soil physical properties and grain yield. **Soil and Tillage Research**, v. 211, p. 105-119, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105019>
- OLIVEIRA, P. R.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; ROSSETTI, K. V.; FERRAUDO, A. S.; FRANCO, H. B. J.; PEREIRA, F. S.; JÚNIOR, L. S. B. Qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho submetido à compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 604-612, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300006>
- ORZECH, K.; WANIC, M.; ZAŁUSKI, D. The effects of soil compaction and different tillage systems on the bulk density and moisture content of soil and the yields of winter oilseed rape and cereals. **Agriculture**, v. 11, n. 7, p. 598-666, 2021.
- PASSOS, R. R.; RUIZ, H. A.; MENDONÇA, E. S.; CANTARUTTI, R. B.; SOUZA, A. P. Substâncias húmicas, atividade microbiana e carbono orgânico lábil em agregados de um Latossolo Vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1119-1129, 2007.
- PERALTA, G.; ALVAREZ, C. R.; TABOADA, M. A. Soil compaction alleviation by deep non-inversion tillage and crop yield responses in no tilled soils of the Pampas region of Argentina. A meta-analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 211, p. 105-122, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105022>
- PETRU, B. J.; AHN, C.; CHESCHEIR, G. Alteration of soil hydraulic properties during the construction of mitigation wetlands in the Virginia Piedmont. **Ecological engineering**, v. 51, p. 140-150, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.073>

- PINTO, G. S.; SERVIDONI, L. E.; LENSE, G. H. E.; MOREIRA, R. S.; MINCATO, R. L. Estimativa das perdas de solo por erosão hídrica utilizando o Método de Erosão Potencial. **Revista do departamento de geografia**, v. 39, p. 62-71, 2020. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v39i0.160233>
- POLANÍA-HINCAPIÉ, K. L.; OLAYA-MONTES, A.; CHERUBIN, M. R.; HERRERA-VALENCIA, W.; ORTIZ-MOREA, F. A.; SILVA-OLAYA, A. M. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. **Geoderma**, v. 386, p. 114-120, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114900>
- POLIDORO, J. C.; FREITAS, P. L.; HERNANI, L. C.; ANJOS, L. H. C. D.; RODRIGUES, R. D. A. R.; CESÁRIO, F. V.; RIBEIRO, J. L. Potential impact of plans and policies based on the principles of conservation agriculture on the control of soil erosion in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 12, p. 3457-3468, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3876>
- PRAZERES, M. S.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; FEHLAUER, T. V. Scarification in no-tillage: soil physics and plant development. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 12, p. 151-160, 2020.
- PROUT, J. M.; SHEPHERD, K. D.; MCGRATH, S. P.; KIRK, G. J.; HAEFELE, S. M. What is a good level of soil organic matter? An index based on organic carbon to clay ratio. **European Journal of Soil Science**, v. 72, p. 2493-2503, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13012>
- REICHERT, J. M.; FONTANELA, E.; AWE, G. O.; FASINMIRIN, J. T. Is cassava yield affected by inverting tillage, chiseling or additional compaction of no-till sandy-loam soil?. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. 134-200, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20200134>
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**, v. 27, p. 29-48, 2003.
- REIS, A. M. H. D.; TEIXEIRA, W. G.; FONTANA, A.; BARROS, A. H. C.; VICTORIA, D. D. C.; VASQUES, G. M.; MONTEIRO, J. E. B. D. A. Hierarchical pedotransfer functions for predicting bulk density in Brazilian soils. **Scientia Agricola**, v. 81, p. 220-255, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0255>
- REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S. e LU, X. Indicators of Good Soil Physical Quality: Density and Storage Parameters. **Geoderma**, v. 110, p.131-146, 2002.
- RICHART, A.; FILHO, J. T.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, p. 321-344, 2005.
- RIGOLIN, I. M.; DOS SANTOS; C. H.; CALONEGO, J. C.; TIRITAN, C. S. Estoque de carbono do solo em sistemas vegetais com manejo agrícola diferenciado no oeste paulista. **Colloquium Agrariae**, v. 9, p. 16-29, 2013.
- RIVERA, J. I.; BONILLA, C. A. Predicting soil aggregate stability using readily available soil properties and machine learning techniques. **Catena**, v. 187, p. 104408, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104408>
- RUEHLMANN, J. Soil particle density as affected by soil texture and soil organic matter: 1. Partitioning of SOM in conceptual fractions and derivation of a variable SOC to SOM conversion factor. **Geoderma**, v. 375, p. 114-142, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114542>
- RUFINO, D. C.; NETO, M. A. D.; DE SOUSA MELO, T.; BANDEIRA, L. B.; DA SILVA, M. D. P.; DE BULHÕES, L. A.; DE MESQUITA, E. F. Estoque de carbono do solo em agroecossistemas e vegetação secundária. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 11, p. 545-584, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i11.33840>
- RUSER, R.; FLESSA, H.; RUSSOW, R.; SCHMIDT, G.; BUEGGER, F.; MUNCH, J. C. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil moisture and rewetting. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, p. 263-274, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.05.005>
- SAFFARI, N.; HAJABBASI, M. A.; SHIRANI, H.; MOSADDEGHI, M. R.; OWENS, G. Influence of corn residue biochar on water retention and penetration resistance in a calcareous sandy loam soil. **Geoderma**, v. 383, p. 114-734, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114734>

- SANTANA, M. B.; SILVA SOUZA, L.; DUARTE SOUZA, L.; FONTES, L. E. F. Atributos Físicos do Solo e Distribuição do Sistema Radicular de Citros como Indicadores de Horizontes Coesos em Dois Solos de Tabuleiros Costeiros do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 1-12, 2006.
- SECCO, D.; ROS, C. O.; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 407-414, 2005.
- SERRANO, J.; MARQUES, J.; SHAHIDIAN, S.; CARREIRA, E.; MARQUES DA SILVA, J.; PAIXÃO, L.; SALES-BAPTISTA, E. Sensing and mapping the effects of cow trampling on the soil compaction of the montado Mediterranean ecosystem. **Sensors**, v. 23, n. 2, p. 888, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23020888>
- SETA, A. K.; KARATHANASIS, A. D. Water dispersible colloids and factors influencing their dispersibility from soil aggregates. **Geoderma**, v. 74, p. 255-266, 1997.
- SHAHEB, M. R.; VENKATESH, R.; SHEARER, S. A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 4, p. 1-23 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>
- SILVA, F. L.; SILVA, M. H. E.; LÓPEZ-ALONSO, M.; PIERANGELI, M. A. Fertility and carbon stock in pasture and forest environments in the Southern Amazon. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 1, p. 270-288, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n1e270888>
- SILVA, G. F. D.; MATUSEVICIUS, A. P. O.; CALONEGO, J. C.; CHAMMA, L.; LUPERINI, B. C. O.; ALVES, M. D. S.; PUTTI, F. F. Soil-plant relationships in soybean cultivated under crop rotation after 17 years of no-tillage and Occasional Chiseling. **Plants**, v.11, p. 26-57, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plantas11192657>
- SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S. do; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 659-667, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300007>
- SKOPP, J. M. Physical Properties of Primary Particles. In: WARRIK, A. W. 1. ed. **Soil Physics Companion**. United States of America, 2002, 403 p.
- SOJKA, R. E.; LENTZ, R. D.; WESTERMANN, D. T. Water and erosion management with multiple applications of polyacrylamide in furrow irrigation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, p. 1672-1680, 1998.
- SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 1, p. 1135-1139, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005001100012>
- SOUZA, R.; HARTZELL, S.; FERRAZ, A. P. F.; DE ALMEIDA, A. Q.; DE SOUSA LIMA, J. R.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S. Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104-168, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104768>
- TAHAT, M. M.; ALANANBEH, M. K.; OTHMAN, A. Y.; LESKOVAR, I. D. Soil health and sustainable agriculture. **Sustainability**, v. 12, n. 12, p. 48-59, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su121248590>
- TEAGUE, R.; KREUTER, U. Managing grazing to restore soil health, ecosystem function, and ecosystem services. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 534-587, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.534187>
- TIAN, S.; ZHU, B.; YIN, R.; WANG, M.; JIANG, Y.; ZHANG, C.; LIU, M. Organic fertilization promotes crop productivity through changes in soil aggregation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 165, p. 108-533, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108533>
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and waterstable aggregates in soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.
- TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo de solo. **Scientia Agrícola**, v. 59, n. 4. p. 795-801, 2002.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico em sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.1, p. 211-219, 2007.

VALE JÚNIOR, J. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Solos Sob Savanas de Roraima: gênese, classificação e relações ambientais. 1.ed. Boa Vista: Gráfica Ioris, 2010. 219p.

VIZIOLI, B.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; BARTH, G. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104-135, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104935>

VOLTR, V.; WOLLNEROVÁ, J.; FUKSA, P.; HRUŠKA, M. Influence of tillage on the production inputs, outputs, soil compaction and GHG emissions. **Agriculture**, v. 11, n. 5, p. 456-481, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agricultura11050456>

WANG, X.; SALE, P.; HAYDEN, H.; TANG, C.; CLARK, G.; ARMSTRONG, R. Plant roots and deep-banded nutrient-rich amendments influence aggregation and dispersion in a dispersive clay subsoil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 141, p. 107-164, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107664>

WITZGALL, K.; VIDAL, A.; SCHUBERT, D. I.; HÖSCHEN, C.; SCHWEIZER, S. A.; BUEGGER, F.; MUELLER, C. W. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. **Nature communications**, v. 12, n. 1, p. 1-10, 2021.

ZHANG, B.; JIA, Y.; FAN, H.; GUO, C.; FU, J.; LI, S.; MA, R. Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic review. **Land Degradation & Development**, v. 18, p. 108-197, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.5144>