

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

QUALIDADE DO SOLO: UM COMPONENTE-CHAVE DAS ESTRATÉGIAS PARA SUSTENTABILIDADE AGROPECUÁRIA

Luciana Ventura Machado¹, Lidiane Gomes dos Santos², Renan da Silva
Fonseca³.

¹Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, 1080, Mata da Praia - 29066-380 - Vitória-ES, Brasil, luvetmac@gmail.com.

²Centro Universitário Estácio de Santa Catarina/Polo Coqueiro, Rua Duarte Peixoto, 195, Loja 7, Coqueiro - 36900-371 - Manhuaçu-MG, Brasil, lidizoo@yahoo.com.br.

³Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural/Fazenda Experimental Bananal do Norte, Pacotuba - 29323-000 - Cachoeiro de Itapemirim-ES, Brasil, renan.fonseca@incaper.es.gov.br.

Resumo

É crescente o interesse da comunidade científica em buscar soluções e tecnologias para alcançar a gestão sustentável do solo e, assim, promover sistemas de manejo que associem melhorias na produtividade agropecuária com o equilíbrio dos serviços ecossistêmicos. O objetivo deste estudo é apresentar uma revisão literária sobre qualidade do solo e conceitos relacionados: definição, indicadores da qualidade, e sua importância como componente-chave das estratégias para sustentabilidade agropecuária. Esse estudo foi desenvolvido por meio do levantamento de informações técnicas e científicas acerca da qualidade do solo em bases de dados de literatura científica e periódicos nacionais e internacionais. A qualidade do solo está associada à qualidade ambiental e à sustentabilidade agrícola. O conhecimento sobre a qualidade do solo é condição primária e fundamental para o desenvolvimento de modelos sustentáveis de produção agropecuária. A Integração Lavoura-Pecuária-Floresta pode promover efeitos positivos na qualidade do solo e, conseqüentemente, favorecer a capacidade dos solos em fornecer serviços ecossistêmicos.

Palavras-chave: Atributos edáficos. Manejo de solos. Sequestro de carbono. Sistemas integrados.

Área do Conhecimento: Engenharia Agrônoma/Agroecologia

Introdução

Os sistemas agrícolas que associam a monocultura contínua ao uso de equipamentos inadequados de preparo do solo resultam em rápida degradação do solo (FREITAS *et al.*, 2017). Nas últimas décadas, tem havido uma crescente atenção no uso de sistemas conservacionistas de manejo para reduzir a erosão do solo, melhorar a qualidade do solo, manter e/ou aumentar a produção vegetal e manter a qualidade ambiental em sistemas agrícolas (RAIESI; KABIRI, 2016). Um solo com qualidade deve considerar pelo menos três componentes: o ambiente, a produção agropecuária e o bem-estar humano (EMBRAPA, 2013).

Quantificar a qualidade do solo não é tarefa fácil, pois a dificuldade advém do fato de que para isso depende das propriedades intrínsecas do solo, de suas interações com o ecossistema e, ainda, de prioridades de uso, influenciadas inclusive, por aspectos socioeconômicos e políticos (COSTA; GOEDERT; SOUZA, 2006). Um componente importante da avaliação é a identificação de um conjunto de atributos sensíveis que refletem a capacidade de um solo desempenhar suas funções e podem ser utilizados como indicadores de qualidade (BÜNEMANN *et al.*, 2018). Por serem sensíveis, esses atributos são capazes de indicar se houve degradação ou melhoria da qualidade do solo em relação a um sistema de manejo determinado (FREITAS *et al.*, 2017). Conforme descrito por Simon *et al.* (2022), a avaliação da qualidade do solo segue três etapas: (i) seleção de indicadores (químicos, físicos e biológicos); (ii) interpretação dos indicadores (curvas de pontuação); e (iii) integração dos escores indicadores individuais em um índice global de qualidade do solo (IQS).

A intensificação do uso da terra em áreas agrícolas e o aumento da eficiência dos sistemas de produção por meio da integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) têm sido apontados como

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

alternativa que possibilita a melhoria da produtividade, da qualidade dos produtos e aumento da renda das atividades agropecuárias, integrando as explorações de lavoura, pecuária e/ou floresta (HORST *et al.*, 2017). Há efeito interativo entre o potencial de sequestro de carbono (C) (pelos elevados acúmulos de biomassa forrageira, biomassa florestal, acúmulo de matéria orgânica do solo (MOS), maior eficiência de fertilizantes) e, conseqüentemente, a capacidade desses sistemas de compensar as emissões de metano oriundas da fermentação entérica de bovinos (CORDEIRO *et al.*, 2015). Entretanto, informações sobre os efeitos dos sistemas ILPF, em regiões de Mata Atlântica, ainda são escassas, sobretudo, no que tange ao potencial dos sistemas ILPF no sequestro de C no solo e na biomassa vegetal, e efeitos na manutenção e/ou aumento da qualidade do solo.

Em face do exposto, o objetivo deste estudo é apresentar uma revisão literária sobre qualidade do solo e conceitos relacionados: definição, indicadores da qualidade, e sua importância como componente-chave das estratégias para sustentabilidade agropecuária.

Metodologia

Esse estudo foi desenvolvido por meio do levantamento de informações técnicas e científicas acerca da qualidade do solo em bases de dados de literatura científica e periódicos nacionais e internacionais. Essa revisão literária compreende conceitos relacionados à qualidade do solo; indicadores (físicos, químicos e biológicos) utilizados e recomendados para sua avaliação; e a importância do monitoramento da qualidade do solo como ferramenta estratégica para modelos alternativos e sustentáveis de produção agropecuária.

Resultados

A qualidade do solo ou saúde do solo é uma temática relevante, sendo que 50% dos artigos científicos da área foram publicados nos últimos 5 anos (CHERUBIN; SCHIEBELBEIN, 2022). Os principais temas abordados nos artigos científicos sobre qualidade do solo são a qualidade ambiental e a sustentabilidade agrícola. O uso do termo qualidade do solo está aumentando substancialmente na literatura brasileira, mas ainda são poucos os pesquisadores que trabalham especificamente com avaliação da qualidade do solo, em sua concepção completa, ou seja, integrando indicadores químicos, físicos e biológicos (SIMON *et al.*, 2022).

A sustentabilidade agrícola é um tema relevante, pois a produção de alimentos e fibras depende de um solo capaz de fornecer nutrientes e suporte a processos biológicos (MAIA, 2013). Além disso, a degradação do solo causada por práticas agrícolas inadequadas é um problema que afeta a produtividade e a sustentabilidade do sistema de produção agrícola. A Integração Lavoura-Pecuária-Floresta é uma estratégia de agricultura sustentável que tem ganhado importante destaque na pesquisa científica. Os dados de Souza *et al.* (2019) demonstram que o ILPF implantado, numa densidade de 417 árvores/ha, em apenas 15% da área total de pastagem seria suficiente para neutralizar todas as emissões de metano (CH₄) oriundas da fermentação entérica dos bovinos, e de óxido nitroso (N₂O), proveniente do solo e das excreções dos animais, deixando ainda um saldo positivo de C na propriedade rural. Quanto maior o tempo de adoção de sistemas integrados, maiores serão seus efeitos benéficos nas diferentes propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (REGO *et al.*, 2023).

Discussão

A qualidade do solo é definida como a capacidade do solo exercer várias funções, dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema, para sustentar a produtividade biológica, manter ou melhorar a qualidade ambiental e contribuir para a saúde das plantas, dos animais e humana (DORAN; PARKIN, 1994). Esse conceito pode ser complementado enfatizando a relação direta com fatores externos, como as práticas de uso e manejo, interações com o ecossistema e com prioridades socioeconômicas (BATISTA *et al.*, 2018). Identificar bons indicadores de qualidade do solo e manejá-lo de acordo com sua aptidão é uma forma de garantir a manutenção da sua capacidade produtiva e do seu potencial de prestação de serviços ambientais (RACHWAL *et al.*, 2015). Os principais indicadores físicos do solo que têm sido utilizados e recomendados são textura; espessura (horizonte A); densidade do solo; resistência à penetração; porosidade; capacidade de retenção de água; condutividade hidráulica e

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

estabilidade de agregados (ARAÚJO *et al.*, 2012). Os indicadores físicos estão envolvidos no suporte ao crescimento radicular; armazenagem e suprimento de água e nutrientes, trocas gasosas e atividade biológica (EMBRAPA, 2013). Os indicadores químicos são, normalmente, agrupados em parâmetros relacionados com o teor de MOS, acidez do solo, teor de nutrientes, elementos fitotóxicos (Al^{3+} , por exemplo), saturação por bases e saturação por alumínio (ARAÚJO *et al.*, 2012), e estão relacionados à atividade química e biológica, fertilidade, potencial de perda de nutrientes (EMBRAPA, 2013). Os principais indicadores microbiológicos e bioquímicos correspondem aos grupos microbianos funcionais (amonificadores, celulolíticos, desnitrificadores, fixadores de N_2 , nitrificadores, proteolíticos e solubilizadores de fosfato), o C e os nutrientes contidos na biomassa microbiana do solo, a taxa respiratória do solo (evolução de CO_2) e a atividade de enzimas envolvidas na ciclagem de C e nutrientes (BATISTA *et al.*, 2018), sendo importantes tanto no que se refere à ciclagem de nutrientes, quanto na estimativa da capacidade do solo para o crescimento vegetal (ARAÚJO *et al.*, 2012). Por consequência, a qualidade do solo precisa estar correlacionada à multifuncionalidade dos solos, combinando atributos químicos, físicos e biológicos do solo, que refletem coletivamente as mudanças induzidas pelo uso e manejo dos solos (SIMON *et al.*, 2022).

De acordo com Balbino *et al.* (2012), o termo “agricultura sustentável” diz respeito ao modelo de agricultura que conserva o solo, a água e os recursos genéticos animais, vegetais e microrganismos, não degrada o meio ambiente; é tecnicamente apropriada, economicamente viável e socialmente aceitável. Somado a isso, o solo constitui o maior repositório de C da Terra, armazenando (~) aproximadamente 1500 Gigatoneladas (Gt) de carbono, que é tanto quanto a vegetação (~ 560 Gt) e a atmosfera (~ 750 Gt) combinadas (CROWTHER *et al.*, 2019), conseqüentemente, é capaz de afetar o clima global (FAO, 2017). Portanto, mudanças no uso da terra que alteram a biomassa vegetal e a biodiversidade acima e abaixo do solo são capazes de alterar as propriedades do solo e, assim, afetar as perdas e armazenamento de C (GARCIA; NANNIPIERI; HERNANDEZ, 2018). À medida que se exploram os recursos dos ecossistemas de modo pouco racional, há perda da qualidade ambiental e da biodiversidade (SILVA *et al.*, 2020). A conversão de sistemas naturais em agroecossistemas pode causar redução do C orgânico em cerca de 60% em solos de regiões temperadas e de 75% ou mais em solos cultivados nos trópicos (LAL, 2004). Sistemas de uso intensivo podem causar maior degradação em solos mais arenosos e/ou com menor quantidade de matéria orgânica, principalmente, em regiões com temperaturas elevadas (RACHWAL *et al.*, 2015). A erosão do solo acelerada ou induzida pela atividade humana inapropriada representa uma grande ameaça à manutenção da vida no planeta (FAO, 2019; HERNANI *et al.*, 2002). A preocupação com o aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEE) para a atmosfera tem impulsionado estudos acerca do potencial papel dos solos como sumidouros de C e da relação entre o turnover da matéria orgânica e a retenção de C nos solos (GARCIA; NANNIPIERI; HERNANDEZ, 2018). Outrossim, as práticas sustentáveis de sequestro de C no solo precisam ser rapidamente ampliadas e implementadas para contribuir para a mitigação das mudanças climáticas (AMELUNG *et al.*, 2020). Nesse sentido, avaliar a qualidade do solo é uma importante estratégia para definir práticas e sistemas de manejo capazes de manter ou melhorar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (CHERUBIN *et al.*, 2015).

Um dos usos da palavra “Integração” no Brasil é para identificar sistemas de produção agropecuária que combinam as atividades agrícola, pecuária e/ou florestal na mesma área ou gleba, constituindo um sistema de produção. Isso pode ser feito de diferentes formas, como, por exemplo, pela adoção da consorciação, da sucessão e/ou da rotação de culturas (CORDEIRO *et al.*, 2015). Sistemas integrados são sistemas conservacionistas e sustentáveis que ganham destaque no cenário nacional, uma vez que reduzem o risco financeiro e produtivo no setor agropecuário e causam menores danos à natureza (ASSIS *et al.*, 2019). Esses sistemas podem ser classificados em quatro modalidades distintas, sendo (1) Integração Lavoura-Pecuária (ILP) ou Sistema Agropastoril; (2) Integração Pecuária-Floresta (IPF) ou Sistema Silvopastoril; (3) Integração Lavoura-Floresta (ILF) ou Sistema Silviagrícola; (4) Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) ou Sistema Agrossilvipastoril (BALBINO *et al.*, 2012). Os sistemas de integração desempenham papel importante no 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+), que é um mecanismo de política com alto potencial de mitigação das emissões de GEE e combate ao aquecimento global apoiado por uma iniciativa de crédito, conforme indicado em Brasil (2021). Entre os benefícios dos sistemas ILPF destacam-se o aumento da produção em uma mesma área, diversificação de fontes de renda, melhor aproveitamento dos insumos, melhoria

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, melhoria do bem-estar animal e geração de emprego e renda no campo; além disso, reduzem a pressão pela abertura de novas áreas, recuperam áreas degradadas ou com baixa capacidade produtiva e mitigam as emissões de GEE, aumentando o sequestro de carbono no solo e na biomassa (EMBRAPA, 2021).

Aumentar o sequestro de C no solo é um meio de neutralizar a crescente emissão de CO₂ na atmosfera a médio prazo, contribuindo para atenuar os impactos ambientais do efeito estufa (GARCIA; NANNIPIERI; HERNANDEZ, 2018; SWIFT, 2001). Conceição *et al.* (2017) observaram que o ILPF, na região de transição Cerrado/Amazônia, apresentou maior estoque de C no solo, após três anos de estabelecimento, representando um aumento de 5,5 Mg ha⁻¹. Entretanto, Santos *et al.* (2011) registraram que, a pastagem em rotação no ILP, mesmo após quatro anos, não favoreceu a qualidade física do solo quando comparada à pastagem contínua. Estudos indicam que os sistemas ILPF apresentam bons resultados em áreas de Mata Atlântica, tanto do ponto de vista técnico-econômico quanto do ponto de vista ambiental (MULLER *et al.*, 2021). Entretanto, esses estudos ainda são insuficientes, sendo necessário expandir o conhecimento sobre a qualidade dos solos sob sistemas ILPF no bioma Mata Atlântica, principalmente, no que tange ao entendimento dos processos que regulam a disponibilidade de nutrientes e sequestro de C no solo, a fim de estimular agricultores e pecuaristas à adoção de práticas agropecuárias sustentáveis.

Conclusão

A qualidade do solo deve ser monitorada por meio de um conjunto apropriado de atributos do solo que refletem alterações no uso e manejo dos solos. O conhecimento sobre a qualidade do solo é condição primária e fundamental para o desenvolvimento de modelos sustentáveis de produção agropecuária. A qualidade do solo desempenha um importante papel na segurança alimentar, pois afeta a produção, a nutrição e a sustentabilidade dos sistemas alimentares. A integração lavoura-pecuária-floresta pode promover efeitos positivos na qualidade do solo e, conseqüentemente, favorecer a capacidade dos solos em fornecer serviços ecossistêmicos.

Referências

AMELUNG, W.; BOSSIO, D.; VRIES, W.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; AMUNDSON, R.; BOL, R.; COLLINS, C.; LAL, R.; LEIFELD, J.; MINASNY, B.; PAN, G.; PAUSTIAN, K.; RUMPEL, C.; SANDERMAN, J.; GROENIGEN, J. W. van; MOONEY, S.; WESEMAEL, B. van; WANDER, M.; CHABBI, A. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. **Nat. Commun.**, v. 11, p. 1-10, 2020.

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v. 5, n.1, p. 187-206, 2012.

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, n. 43, p. 57-70, 2019.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; OLIVEIRA, P.; KLUTHCOUSKI, J.; GALERANI, P. R.; VILELA, L. Agricultura Sustentável por meio da Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). IPNI, International Plant Nutrition Institute. **Informações Agronômicas**, n. 138, 2012.

BATISTA, E. R.; ZANCHI, C. S.; FERREIRA, D. A.; SANTIAGO, F. L. A.; PINTO, F. A.; SANTOS, J. V.; PAULINO, H. B.; CARNEIRO, M. A. C. **Atributos biológicos do solo em sistema integrado de produção agropecuária**. In: SOUZA, E. D. de *et al.* (Org.). Sistemas Integrados de produção agropecuária no Brasil. Tubarão: Copiart, v. 1, p. 71-90, 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária 2020-2030: plano operacional. 2021. 133 p.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKELE, W.; GROENIGEN, J. W. van; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biol. Biochem.**, v. 120, p. 105–125, 2018.

CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T.; FABBRIS, C.; WEIRICH, S. W.; SILVA, R. F.; SILVA, W. R.; BASSO, C. J. Qualidade física, química e biológica de um latossolo com diferentes manejos e fertilizantes. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, v. 39, p. 615-625, 2015.

CHERUBIN, M. R.; SCHIEBELBEIN, B. E. Saúde do solo: múltiplas perspectivas e percepções [recurso eletrônico]. Piracicaba: ESALQ-USP. 2022, 126 p.

CONCEIÇÃO, M. C. G.; MATOS, E. S.; BIDONE, E. D.; RODRIGUES, R. A. R.; CORDEIRO, R. C. Changes in Soil Carbon Stocks under Integrated Crop-Livestock-Forest System in the Brazilian Amazon Region. **Agricultural Sciences**, v. 8, n. 9, p. 904-913, 2017.

CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARTA JÚNIOR, G. B. Integração Lavoura-Pecuária e Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 15-43, 2015.

COSTA, E. A.; GOEDERT, W. J.; SOUZA, D. M. G. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 41, n. 7, p. 1185-1191, 2006.

CROWTHER, T. W.; HOOGEN, J. van den; WAN, J.; MAYES, M. A.; KEISER, A. D.; MO, L.; AVERILL, C.; D. S. MAYNARD, D. S. The global soil community and its influence on biogeochemistry. **Science**, v. 365, n. 6455, p. 1-10, 2019.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. **Defining and assessing soil quality**. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA, Madison, WI, p. 3–21, 1994.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **PORTFÓLIO integração lavoura-pecuária-floresta: intensificação sustentável da produção agropecuária**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. 2 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Qualidade do Solo**. 2013, 6 p.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Soil Organic Carbon: the hidden potential**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 2017, 77 p.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management**. Rome, 2019. 100 p.

FREITAS, L.; OLIVEIRA, I. A.; SILVA, L. S.; FRARE, J. C. V.; FILLA, V. A.; GOMES, R. P. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **UNIMAR**, v. 26, p. 8-25, 2017.

GARCIA, C.; NANNIPIERI, P.; HERNANDEZ, T. **The Future of Soil Carbon**. In: GARCIA, C.; NANNIPIERI, P.; HERNANDEZ, T. (Eds.). *The Future of Soil Carbon: Its Conservation and Formation*, 2018. Chapter 9, p. 239-261.

HERNANI, L. C.; FREITAS, P. L.; PRUSKI, F. F.; MARIA, I. C.; CASTRO FILHO, C.; LANDERS, J. N. **A erosão e seu impacto**. In: MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J. R. R. (Eds.). *Uso agrícola dos solos brasileiros*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. Capítulo 5, p. 47-60.

HORST, R.; MATHEOS, P. H. de A.; CRUZ, R. M. S da.; GONÇALVES, C. H. de S.; ALMAS, L. R. M das.; PACCOLA-MEIRELLES, L. D.; ALBERTON, O. Indicadores de qualidade do solo cultivado com

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

café, pastagem e integração pastagem e eucalipto. **Arq. Ciênc. Vet. Zool. UNIPAR**, v. 20, n. 4, p. 183-188, 2017.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.

MAIA, C. E. Qualidade ambiental em solo com diferentes ciclos de cultivo do meloeiro irrigado. **Cienc. Rural**, v. 43, n. 4, p. 603-609, 2013.

MULLER, M. D.; MARTINS, C. E.; BRIGHENTI, A. M.; ROCHA, W. S. D.; CALSAVARA, L. H. F.; PEZZOPANE, J. R. M.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V. **O Eucalipto em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) na Mata Atlântica**. In: OLIVEIRA, E. B.; PINTO JUNIOR, J. E. (Eds.). O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento. Brasília, DF: Embrapa, 2021, p. 1087-1103.

RACHWAL, M. F. G.; DEDECEK, R. A.; MAIA, C. M. B. F.; PARRON, L. M. **Uso e manejo da terra e aspectos pedológicos na avaliação de serviços ambientais**. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (Eds.). Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica. Brasília, DF: EMBRAPA, Capítulo 4, p. 57-70, 2015.

RAIESI, F.; KABIRI, V. Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment. **Ecol. Indic.**, v. 71, p. 198–207, 2016.

REGO, C. A. R. M.; OLIVEIRA, P. S. R.; MUNIZ, L. C.; ROSSET, J. S.; MATTEI, E.; COSTA, B. P.; PEREIRA, M. G. Chemical, physical, and biological soil properties of soil with pastures recovered by integration crop-livestock system in Eastern Amazon. **Rev. Bras. Cienc. Solo**. 2023; 47nspe:e0220094

SANTOS; G. G.; MARCHÃO, R. L.; SILVA, E. M.; SILVEIRA, P. M.; BECQUER, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 46, n. 10, p. 1339-1348, 2011.

SOUZA, K. W.; PULROLNIK, K. GUIMARÃES JUNIOR, R.; MARCHÃO, R. L.; VILELA, L.; CARVALHO, A. M.; MACIEL, G. A.; MORAES NETO, S. P.; OLIVEIRA, A. D. **Integração lavoura-pecuária-floresta como estratégia para compensação das emissões de gases de efeito estufa**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados. Circular Técnica 39. 2019. 12 p.

SILVA, D. C.; PEREIRA, J. M.; ORTIZ, D. C.; OLIVEIRA FILHO, L. C. I.; PINTO, L. V. A.; BARETTA, D. Fauna edáfica como indicadora de qualidade do solo em fragmentos florestais e área sob cultivo do cafeeiro. **Braz. J. Dev.**, v. 6, n. 3, p. 14795-14816, 2020.

SIMON, C. P.; GOMES, T. F.; PESSOA, T. N.; SOLTANHHEISI, A.; BIELUCZYK, W.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A.; CHERUBIN, M. R. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Rev. Bras. Cienc. Solo**. 2022; 46:e0210103.

SWIFT, R. S. Sequestration of carbon by soil. **Soil Sci.**, v. 166, n. 11, p. 858–871, 2001.

Agradecimentos

À Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca do Espírito Santo (SEAG) pelo generoso apoio financeiro.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Espírito Santo (FAPES) por seu papel fundamental em fomentar a pesquisa com transparência e eficácia.

Ao Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper) pela infraestrutura essencial e colaboração fundamental neste estudo.