

DINÂMICA DO CARBONO NOS SOLOS EM SISTEMAS AGRÍCOLAS

Data de aceite: 02/05/2024

Joana Rodas Alves

Bióloga, Mestranda Programa de Pós-graduação em Agroecologia da Universidade Estadual de Maringá (PROFAGROEC – UEM), Maringá, Pr. <http://lattes.cnpq.br/9952616447222621>

Murilo Fuentes Pelloso

Eng. Agr. Prof. Dr., Programa de Pós-graduação em Agroecologia (PROFAGROEC), Universidade Estadual de Maringá (UEM), Pr. <http://lattes.cnpq.br/0926959399074057>

Higo Forlan Amaral

Eng. Agr., Prof. Dr. do Programa de Pós-graduação em Agroecologia (PROFAGROEC), Universidade Estadual de Maringá (UEM). Prof. Dr. do curso de Agronomia do Centro Universitário Filadélfia (UniFil), Londrina, Pr. <http://lattes.cnpq.br/2040162561025228>

RESUMO: A dinâmica do carbono nos solos em sistemas de produção agrícola é essencial para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e pelo aumento de gases de efeito estufa. Este capítulo tem como objetivo de investigar e explicar sobre os impactos dos diferentes tipos de manejos agrícolas e sistemas de

produção no estoque de carbono no solo. Estratégias agrícolas que visam o aumento dos estoques de carbono no solo se mostram vitais, podendo ser implementadas por meio da conservação de florestas nativas, práticas de reflorestamento, adoção de sistemas integrados de lavoura, pecuária e floresta, além do manejo adequado de pastagens e cultivos. Essas ações não só contribuem para o sequestro de carbono, através de processos como humificação, agregação e sedimentação, mas também minimizam as perdas de carbono, que ocorrem por erosão, decomposição, volatilização e lixiviação. A promoção de práticas que preservem a cobertura vegetal, minimize a perturbação do solo e fomentem a diversidade biológica é fundamental para mitigar as mudanças climáticas, conservar os solos e manter a qualidade ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Agroecologia; Agroecossistemas; Sistema Agroflorestal, Nutrientes do Solo.

SOIL CARBON DYNAMICS IN AGRICULTURAL SYSTEMS

ABSTRACT: Carbon soil dynamics in agricultural systems are essential to face the challenges of climate change and the

increase in greenhouse gases. Agricultural strategies aimed at increasing soil carbon stocks are vital. This chapter aims to investigate and explain the impacts of different agricultural management and production systems on soil carbon stocks. They can be implemented through the conservation of native forests, reforestation practices, adoption of integrated crop, livestock, and forestry systems, and proper management of pastures and crops. These actions contribute to carbon sequestration through processes such as humification, aggregation and sedimentation and minimize carbon losses, which occur through erosion, decomposition, volatilization and leaching. Promoting practices that preserve vegetation cover, minimize soil disturbance, and foster biological diversity is vital to mitigating climate change, conserving soils, and maintaining environmental quality.

KEYWORDS: Agroecology; Agroecosystems; Agroforestry System; Soil Nutrients.

1 INTRODUÇÃO

O amplo diálogo global sobre as relações entre a alteração no uso do solo, as técnicas de gestão e manejo agrícola, o aumento na presença de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera e os fenômenos climáticos em escala mundial são assuntos abrangentes e alarmantes. Decorrente disso, há evidências de que essas transformações têm gerado efeitos adversos e nocivos ao meio ambiente, na segurança alimentar e no bem-estar humano, comprometendo, assim, a sustentabilidade e a vida no planeta Terra.

Ao longo das últimas décadas, as ações humanas têm promovido diversas modificações no cenário terrestre e, mais recentemente, na composição atmosférica. O aumento nas emissões GEE e o subsequente aquecimento global têm instigado a busca por estratégias que tenham como objetivo diminuir as emissões desses gases (CARVALHO, 2010). Os efeitos do aquecimento global sobre os sistemas nativos vegetais e humano já foram observados. Mudanças significativas foram observadas em diversos ecossistemas terrestres e oceânicos, resultando na alteração de alguns dos serviços que esses ecossistemas oferecem (serviços ecossistêmicos), tudo isso em decorrência do aquecimento global (IPCC, 2022).

É no ambiente que ao mesmo tempo é fonte de emissão como os grandes centros industriais é sumidouro de GEE, desempenhando uma função fundamental na troca de energia, água e gases entre a superfície terrestre e a atmosfera. Os ecossistemas do planeta e suas biodiversidades estão sujeitos a vulnerabilidades associadas às contínuas mudanças climáticas. O manejo sustentável da do solo, em especial em ambientes agrícolas e nativos, surge como uma estratégia eficaz para mitigar os impactos adversos, incluindo a mudança climática, tanto nos ecossistemas quanto na sociedade (IPCC, 2022).

Segundo o IPCC (2022), entre os anos de 2007 e 2016, as atividades relacionadas à Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU) foram responsáveis por aproximadamente 13% das emissões de dióxido de carbono (CO₂), 44% das emissões de metano (CH₄) e 81% das emissões de óxido nitroso (N₂O) provenientes de atividades humanas em escala global. Esse conjunto representou cerca de 23% (equivalente a 12,0

± 2,9 Gt CO₂ eq ano⁻¹) do total de emissões líquidas antropogênicas de GEE. A resposta natural da Terra às mudanças ambientais causadas pela atividade humana resultou em um sumidouro líquido de aproximadamente 11,2 Gt CO₂ por ano durante o mesmo período, equivalente a 29% do total de emissões de CO₂ – a continuidade desse sumidouro é incerta devido às mudanças climáticas. Se as emissões relacionadas às atividades de pré e pós-produção no sistema alimentar global forem consideradas, as emissões totais serão estimadas entre 21% e 37% do total de emissões líquidas antropogênicas de GEE.

As ações antrópicas têm contribuído para o aumento da concentração de GEE na atmosfera. A influência das atividades humanas na elevação da concentração de GEE na atmosfera tem sido destacada (LE QUÉRÉ et al., 2018). Uma parte importante, que decorre do aumento do GEE são as atividades agrícolas, especialmente sobre exploração do solo, que impactam a capacidade do solo em armazenar o CO₂ absorvido pelas plantas (DA SILVA SANTANA et al., 2019). Estratégias para enfrentar os problemas decorrentes das emissões de GEE incluem o controle dessas emissões (LE QUÉRÉ et al., 2018) e a adoção de medidas compensatórias, como o aumento do estoque de carbono (C) nos ecossistemas terrestres (PRIMIERY et al., 2017).

Diante do contexto, aumentar o estoque de C pode ser alcançado através da preservação de florestas nativas, práticas de reflorestamento, implementação de sistemas integrados de lavoura, pecuária e floresta, bem como pelo manejo adequado de pastagens e agricultura (COOK et al., 2016; VICENTE et al., 2019; MAGALHÃES et al., 2016). Essas estratégias têm o potencial de retirar significativas quantidades de CO₂ da atmosfera por meio do processo de fotossíntese (CASSOL et al., 2019) e de armazenar esse C na biomassa aérea, subterrânea e, principalmente, no solo (ZELARAYÁN et al., 2015).

Este capítulo tem como objetivo de investigar e explicar sobre os impactos dos diferentes tipos de manejos agrícolas e sistemas de produção no estoque de carbono no solo.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Agricultura: Produção, Impactos e Desafios

A produção agrícola e pecuária brasileira desempenha um papel estratégico no cenário econômico do país, impulsionando o agronegócio e contribuindo significativamente para o crescimento econômico nas últimas duas décadas. Em 2017, o setor registrou um notável crescimento de 13%, representando a maior taxa desde 1997. Com 27% do Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio e 40% das exportações totais do país, a importância desse setor é incontestável (BRASIL, 2018). Apesar dos notáveis avanços produtivos, o setor enfrenta desafios significativos de ordem estrutural, abrangendo tanto aspectos econômicos quanto sociais (VIEIRA et al., 2019) e ambientais, comprometendo

a sustentabilidade, isto porque o modelo convencional de agricultura, caracterizado pela Mecanização e Revolução Verde, causou impacto significativo no meio rural, afetando a relação dos trabalhadores com a terra (MARQUES et al., 2011, p.1). É importante destacar que o aumento das áreas de monocultura foi decorrente de abertura de áreas através desmatamento de florestas e à fragmentação dos ecossistemas. De maneira que a exploração agropecuária desempenha um papel importante na alteração da paisagem, resultando em processos erosivos, perda de vegetação e diversidade da fauna, bem como perda de solo (BERTRAND, 1971).

Os impactos nos ecossistemas devido às interferências antrópicas ligadas as atividades agrícolas são reconhecidas e requerem alterações por dos sistemas agrícolas para que previnam ou reduzam os impactos negativos ao ambiente. Ciente que a preservação dos ambientes naturais é essencial para a manutenção da biodiversidade na Terra e reconhecendo a intervenção humana no ecossistema natural, torna-se necessário um olhar sobre a conservação dos ambientes agrícolas (NORRIS, 2008). Visto que a maioria das áreas protegidas está inserida em uma paisagem agrícola, essas áreas além de sofrerem o efeito da fragmentação, sofrem com a contaminação por agrotóxicos (NORRIS, 2008).

Desta forma, a biodiversidade das áreas protegidas está ligada ao contexto da paisagem mais ampla, incluindo o modo como as áreas agrícolas do entorno são projetadas e manejadas (WALLACE et al., 2005). Harvey et al. (2008), evidencia que a principal dificuldade no manejo das terras tropicais é atender a demanda cada vez maior por produtos agrícolas e ao mesmo tempo conservar a biodiversidade.

O manejo inadequado e a utilização imprópria do solo são identificados como os fatores catalisadores dos impactos resultantes da atividade agrícola. O desmatamento e a queima da vegetação, associados ao preparo convencional (com intenso revolvimento) do solo que envolve a intensa utilização de máquinas agrícolas, comprometem não só as propriedades do solo como também afetam os serviços ambientais e, de maneira significativa, contribuem para as alterações climáticas (BERNOUX et al., 2005; RANGEL; SILVA, 2007).

O termo serviços ambiental (SA), apresenta várias definições na literatura especializada, sendo também conhecido como serviços ecossistêmicos ou serviços ecológicos. Atualmente, a definição mais comumente usada é aquela estabelecida pela Avaliação Ecossistêmica do Milênio (AEM), uma iniciativa promovida pela ONU, que define os serviços ecossistêmicos ou ambientais como os benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas.

Tendo em vista as consequências sociais e ambientais do modelo atual de produção agrícola é necessário investigar possibilidades que tornem a transição agroecológica atrativa para os produtores. O programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC), lançado em 2010 e atualizado em 2021, é uma iniciativa do Ministério da Agricultura, Pecuária

e Abastecimento (MAPA) que visa incentivar os produtores rurais a adotarem práticas sustentáveis que reduzam as emissões de gases de efeito estufa na agropecuária. O programa oferece alternativas para financiar sistemas produtivos que contribuam para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas, como o plantio direto, a recuperação de pastagens degradadas, adoção de SAFs, o tratamento de dejetos animais, as florestas plantadas e o uso de bioinsumos.

A ONU declarou em 2010 que a vida na Terra depende da valorização, conservação, restauração e uso racional da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos. Ela alertou para a urgência de mudar as atitudes em relação à natureza (KOK et al., 2018). Em 2015, a ONU propôs os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são 169 metas para garantir um futuro melhor para todos até 2030.

No âmbito legislativo, no mês de janeiro de 2021, entrou em vigor a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, por meio da LEI Nº 14.119, DE 13 DE JANEIRO DE 2021, que estabelece os conceitos, os objetivos, as modalidades, as formas e as condições para o pagamento pelos serviços ambientais, além de definir os critérios de elegibilidade e as responsabilidades dos pagadores e dos provedores desses serviços. Porém, desde o fim dos anos 1990, os Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) têm ganhado destaque como uma ferramenta de mercado que busca viabilizar a preservação do meio ambiente (WUNDER, 2005). Segundo Muradian et al. (2010), o PSA são estruturas institucionais que buscam promover a transferência de recursos entre diferentes atores sociais, com o objetivo de criar incentivos econômicos e alinhar as decisões de uso da terra de indivíduos e/ou comunidades com os interesses sociais de preservação do capital natural. Além de compor as estratégias das políticas públicas brasileiras, os SAFs são contemplados no mercado de carbono global, dentro do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL).

2.2 Carbono (C): A Ambivalência na Crise Climática

O C é um elemento químico presente em abundância na natureza e é considerado a base fundamental da vida. Sua versatilidade e capacidade de formar uma ampla variedade de compostos orgânicos o tornam essencial para a existência e funcionamento dos organismos vivos. Desde sua descoberta e descrição por Antoine Lavoisier em 1779, o carbono tem sido objeto de intenso estudo e investigação científica.

Diferentes fontes contribuem para a emissão de C na atmosfera, tanto por processos naturais quanto por atividades humanas. Vulcões liberam cerca de 2 gigatoneladas (Gt) de C. A respiração de animais, fungos e bactérias é responsável pela emissão de aproximadamente 35 Gt. Por sua vez, a queima de combustíveis fósseis é uma fonte não tão natural que contribui com 5 Gt de emissões. No entanto, equilibrando essa equação entre emissão e sequestro de C, as algas nos oceanos e as plantas juntas conseguem sequestrar cerca de 40 Gt de C por ano (RICKLEFS, 2003).

Ainda segundo o autor, durante a Era Paleozóica, cerca de 550 e 400 milhões de anos atrás, a atmosfera comportava de 15 a 20 vezes mais CO₂ do que no presente. Somente no final da Era Mesozóica, entre 241 e 65 milhões de anos atrás, após vários ciclos de aquecimento e resfriamento, o planeta atingiu níveis semelhantes aos atuais. Atuando como um sistema em equilíbrio de longo prazo, o ciclo do C naturalmente capturaria o CO₂ da atmosfera, reduzindo assim a concentração de dióxido de C na atmosfera. Portanto, o efeito estufa é um fenômeno natural que foi equilibrado ao longo do tempo, principalmente pela formação das grandes florestas e sedimentações nos oceanos.

As interações humanas entre si e com o meio ambiente têm causado mudanças abruptas em nível regional. As emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) após a industrialização global são apontadas como o principal fator responsável por essas mudanças (SCHMIDT, 2018). O desmatamento exerce influência direta no efeito estufa, uma vez que as florestas tropicais armazenam vastas quantidades de C, desempenhando um papel crucial no controle e na redução dos efeitos do aquecimento global (SAMPAIO, 2023). Dessa maneira, questiona-se: o problema é realmente o C? Compreender o ciclo do C e as diferentes formas de intervenção em seus processos, torna-se necessário para desenvolver estratégias abrangentes de mitigação das mudanças climáticas, ações coletivas e políticas sustentáveis.

2.3 Presença de C no ambiente e Matéria orgânica do solo

A importância do tema relacionado à matéria orgânica no solo (MOS), à dinâmica e reatividade do C (C) no solo, aos aspectos estruturais da MOS e a outros fatores que regulam os teores de C no solo tem crescido consideravelmente. Isso ocorre devido à capacidade do solo de sequestrar C e mitigar as emissões antropogênicas de gases do efeito estufa. Iniciativas de painéis e associações internacionais, como o IPCC (COP/ONU), “Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases (GRA)”, 4 per 1000 “initiative” e outras ações globais, têm justificado o renovado interesse pelo C no solo ao longo de mais de uma década (MARTIN-NETO et al., 2023).

Os oceanos representam o principal reservatório de C no planeta, junto com os depósitos encontrados em formações geológicas (BRADY; WEIL, 1999). Nos ecossistemas terrestres, o solo desempenha um papel fundamental como um reservatório relativamente temporário de C. O estoque global de C no solo de 2.500 gigatoneladas (Gt) inclui cerca de 1.550 Gt de C orgânico do solo (SOC) e 950 Gt de C inorgânico do solo (SIC). O estoque de C no solo é 3,3 vezes maior que o tamanho do estoque atmosférico (760 Gt) e 4,5 vezes maior que o tamanho do estoque biótico (560 Gt) (LAL et al., 2004). Estima-se que a quantidade de C armazenada no solo, até uma profundidade de um metro, seja de aproximadamente 1.576 Pg (1 Pg = 10¹⁵ g), distribuída em 12,8 bilhões de hectares nos continentes (ESWARAN et al., 1993). Essa quantidade equivale a cerca de três vezes o

C presente na vegetação e duas vezes o contido na atmosfera terrestre (CERRI; CERRI, 2007; HOUGHTON, 2003). Portanto, o solo surge como uma alternativa significativa para o sequestro do C atmosférico, tornando-se um elemento central nas estratégias para mitigar o aumento das concentrações e emissões de gases de efeito estufa, e para reduzir os impactos das mudanças climáticas globais (IPCC, 2001).

De acordo com Machado (2005), os processos que desempenham um papel fundamental no sequestro de C nos solos incluem a humificação, agregação e sedimentação. Geralmente, observa-se que as concentrações de C são mais elevadas nas camadas superficiais e diminuem exponencialmente à medida que a profundidade aumenta (MACHADO, 2005). Em contrapartida, os processos que contribuem para a perda de C no solo envolvem erosão, decomposição, volatilização e lixiviação (LAL et al., 1997).

Uma das estratégias para abordar os problemas decorrentes das emissões de gases de efeito estufa (GEE) é o controle ativo dessas emissões (LE QUÉRÉ et al., 2018). Além disso, a implementação de medidas compensatórias, como o aumento do estoque de C nos ecossistemas terrestres, surge como uma alternativa viável (PRIMIERY et al., 2017). A preservação de florestas nativas, o reflorestamento, a adoção de sistemas integrados de lavoura, pecuária e floresta, juntamente com o manejo adequado de pastagens e agricultura, são meios eficazes para aumentar esse estoque de C (COOK et al., 2016; VICENTE et al., 2019; MAGALHÃES et al., 2016). Essas medidas têm o potencial de retirar significativas quantidades de CO₂ da atmosfera por meio do processo de fotossíntese (Cassol et al., 2019) e de armazenar esse C na biomassa aérea, subterrânea e, principalmente, no solo (ZELARAYÁN et al., 2015).

Além disso, a MOS desempenha um papel fundamental na configuração dos sistemas agrícolas e no desenvolvimento das plantas, exercendo influência nos processos físicos, químicos e biológicos do solo. Caracterizada como um sistema complexo de substâncias, sua dinâmica é moldada pela introdução contínua de resíduos orgânicos de diversas origens, sujeita a transformações constantes (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), podendo interagir com outros componentes, afetando a retenção de água no solo (BEUTLER et al., 2002), a formação de agregados (SALTON et al., 2008), a densidade do solo (COSTA et al., 2006), o pH, a capacidade de troca catiônica (CIOTTA et al., 2003), a disponibilidade de nutrientes para as plantas, a infiltração e a aeração (SOUZA et al., 2004) e a atividade microbiana (D'ANDRÉA et al., 2004).

O C (C) constitui, em termos quantitativos, a fração mais significativa da MOS. As flutuações nos níveis de C no solo têm sido empregadas na análise da qualidade do solo, uma vez que influenciam as propriedades determinantes da fertilidade do solo, além de desempenharem um papel na capacidade de aumentar ou reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) (BERNOUX et al., 2002; RESCK et al., 2008).

2.4 Estoque de C e uso do solo

A humificação, agregação e sedimentação são os principais processos responsáveis pelo sequestro de C nos solos. Em contrapartida, a erosão, decomposição, volatilização e lixiviação são os processos que contribuem para as perdas de C no mesmo ambiente. Características do solo, como topografia, classes de solo, drenagem, mineralogia e textura, têm impacto na capacidade de sequestro de C. Além das propriedades do solo, fatores como o tipo de cobertura vegetal, condições climáticas locais - especialmente temperatura e precipitação - e o manejo adotado também influenciam no sequestro de C no solo (CORADO NETO et al., 2015; COSTA et al., 2008).

A substituição de um ecossistema por outro pode ocorrer de maneira natural ou por intervenção humana, especialmente para o cultivo de alimentos (GUO; GIFFORD, 2002). Segundo Carvalho et al. (2010) a modificação do uso da terra, além de ocasionar mudanças na cobertura do solo, está relacionada às variações no estoque de C (EC) do solo. Em áreas com maior intensidade de pastejo, há uma maior liberação de C e nitrogênio do sistema, devido às perdas causadas pela respiração microbiana e pelo pastejo animal. Como resultado, ocorre uma redução no estoque desses elementos no solo, juntamente com a degradação da qualidade da MO. No entanto, em intensidades de pastejo moderadas e na integração pastagem-lavoura, observa-se um aumento em todos os componentes avaliados. Nesses casos, a susceptibilidade da matéria orgânica, de decomposição, se equipara à área sem pastejo, resultando em melhorias na qualidade do solo (SOUZA et al., 2009).

Cerri et al. (2006) confirmam que alterações no uso e ocupação da terra resultam em desequilíbrios na dinâmica do ecossistema, pois as entradas de MO são inferiores às saídas. Esse desequilíbrio é atribuído à intensidade dos processos de decomposição, à perda de nutrientes por lixiviação e à emissão de C para a atmosfera. Isso culmina em uma redução tanto na quantidade quanto na qualidade dos teores armazenados no solo, impactando negativamente o estoque de C, o qual pode diminuir para níveis significativos. Também, segundo Cerri et al. (1996), ao examinarem a dinâmica do C após desmatamento e conversão para pastagem na região de Manaus, notaram uma redução de 20 a 30% no C total nos primeiros anos após o desmatamento e queima, seguida por uma recuperação progressiva. Após 20 anos de uso com pastagem bem manejada, o C total ultrapassou os níveis iniciais em 5 a 15%. Uma estimativa realizada por Dias Filho et al. (2001) sugere que a conversão da Floresta Amazônica em pastagens pode resultar na emissão de aproximadamente 100 a 200 Mg ha⁻¹ de C para a atmosfera, devido ao processo de desmatamento e queima da vegetação.

A preservação da cobertura vegetal na superfície do solo, juntamente com a prática de evitar o revolvimento do solo, princípios fundamentais do sistema de plantio direto (SPD), não apenas diminui a emissão de CO₂ para a atmosfera, mas também reduz a

degradação da matéria orgânica, resultando em um aumento do EC no solo (FONTANA et al., 2006). Diversos estudos destacaram o aumento nos níveis de C em áreas sob o sistema de plantio direto (CORAZZA et al., 1999; LEITE et al., 2003). Além disso, ao longo de duas décadas de cultivo na Mata Atlântica (com 10 anos dedicados ao cultivo convencional e 10 anos ao Sistema de Plantio Direto - SPD), Sá et al. (2001) evidenciaram uma perda de C no solo de $1,1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. No mesmo estudo, após 22 anos de práticas agrícolas, os pesquisadores observaram um acréscimo de $16,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C para o SPD, enquanto houve uma diminuição de $1,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ para o cultivo convencional, quando comparados com a vegetação nativa.

As atividades silviculturais, além de sequestrar C da atmosfera, contribuem para a redução da erosão do solo e da perda de C no sistema, que poderia ser lixiviado. De acordo com Albrecht e Kandji (2003), sistemas agrícolas nos quais espécies arbóreas são reintroduzidas e gerenciadas em conjunto com outras culturas e/ou animais apresentam um elevado potencial de absorção de CO_2 . Com uma extensão estimada em 7,74 milhões de hectares no país (IBÁ, 2015), o setor de floresta plantada tem a capacidade de manter o EC no solo em níveis comparáveis aos da vegetação nativa (MAFRA et al., 2008).

Um estudo conduzido por Rufino (2022) examinou o EC em diferentes sistemas de cultivo na região do município de Remígio-PB. As áreas analisadas incluíram aquelas com cultivo convencional, implantação de pastagem, sistema agroflorestal (SAF) e vegetação secundária. Os resultados revelaram que o estoque de C foi maior no agroecossistema SAF, alcançando 44,0 toneladas por hectare, em comparação com os outros sistemas, em todas as profundidades do solo (0-20; 20-40 e 40-60 cm). A área com pastagem também apresentou um estoque considerável de C, totalizando 31,4 toneladas por hectare, enquanto a área com cultivo convencional apresentou 25,4 toneladas por hectare.

Os Sistemas Agroflorestais (SAFs), devido à presença de componentes florestais e a uma ampla diversidade de espécies, favorecem uma deposição contínua e mais significativa de resíduos vegetais no solo. Esse processo facilita a acumulação e a manutenção da MO (SMILEY; KROSCHEL, 2008), exercendo uma influência direta nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (NORGROVE et al., 2009). Além disso, os SAFs proporcionam benefícios ambientais, como a conservação da biodiversidade, o sequestro de C e a melhoria da qualidade da água (NAIR, 2008).

Em uma revisão bibliográfica sobre a dinâmica do C na transição de florestas para cultivos agrícolas em todo o mundo, Murty et al. (2002) demonstraram que essa conversão resultou em uma perda média de 30% do C do solo. Eles notaram que, quando a pastagem foi introduzida, não houve resultados significativos. Em contraste, Guo e Gifford (2002) observaram um aumento no EC de até 19% quando a pastagem foi implementada. No entanto, esses autores ressaltaram que o EC dos solos geralmente diminui sempre que há uma mudança no uso da terra, com perdas máximas de 59% ao substituir pastagens por cultivos e 42% ao substituir floresta nativa por cultivos.

2.5 Mudanças climáticas e a Agricultura

Conforme o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2018, p. 544), o clima refere-se à “Descrição estatística em termos da média e variabilidade de variáveis como temperatura e precipitação ao longo de um período de tempo que varia de meses a milhares ou milhões de anos”. Desse modo, o clima representa o “padrão de longo prazo” das condições atmosféricas. Nesse contexto, a mudança climática é (IPCC, 2018, p. 544):

“Uma alteração no estado do clima que pode ser identificada (por exemplo, usando testes estatísticos) por mudanças na média e, ou, na variabilidade de suas propriedades e que persiste por um período prolongado, normalmente décadas ou mais. As mudanças climáticas podem ser resultantes de processos internos naturais ou forçantes externos, como modulações dos ciclos solares, erupções vulcânicas, e mudanças antropogênicas persistentes na composição da atmosfera ou no uso do solo”.

Conforme o mais recente relatório do IPCC (2021), desde o período pré-industrial, a temperatura do ar na superfície terrestre aumentou quase o dobro da média global. As alterações climáticas, que incluem aumento na frequência e intensidade de eventos extremos, têm tido impactos negativos significativos na segurança alimentar e nos ecossistemas terrestres, contribuindo também para a desertificação e degradação da terra em diversas regiões. Os dados disponíveis desde 1961 indicam que o crescimento populacional global e as alterações nos padrões de consumo per capita de alimentos, ração animal, fibras, madeira e energia resultaram em níveis sem precedentes de uso da terra e de água doce. Atualmente, a agricultura é responsável por cerca de 70% do uso da água doce em todo o mundo.

A expansão das áreas destinadas à agricultura tem favorecido o consumo e a disponibilidade de alimentos para uma população em crescimento, porém tais mudanças, com uma grande variação regional, têm contribuído para o aumento das emissões líquidas de GEE, a perda de ecossistemas naturais, como florestas, savanas, campos naturais e áreas alagadas, e a diminuição da biodiversidade.

As atividades relacionadas à Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU) foram responsáveis por aproximadamente 13% das emissões de CO₂, 44% das emissões de metano (CH₄) e 81% das emissões de óxido nitroso (N₂O) provenientes de atividades humanas em todo o mundo entre os anos de 2007–2016, totalizando 23% (12,0 ± 2,9 Gt CO₂ eq ano⁻¹) das emissões antrópicas líquidas de gases de efeito estufa (GEE). A resposta natural da terra às mudanças ambientais antrópicas resultou em um sumidouro líquido de cerca de 11,2 Gt CO₂ ano⁻¹ durante o período de 2007–2016, equivalente a 29% do total de emissões de CO₂; contudo, a permanência desse sumidouro é incerta devido às mudanças climáticas. Se considerarmos as emissões associadas às atividades de pré e pós-produção no sistema alimentar global, as emissões estimadas correspondem a 21–37% do total de emissões antrópicas líquidas de GEE (IPCC, 2021).

Modelos globais indicam que as emissões líquidas de CO₂ provenientes do uso da terra e da mudança no uso da terra foram estimadas em 5,2 ± 2,6 Gt CO₂ ano⁻¹ durante o período de 2007–2016. Essas emissões líquidas são predominantemente atribuíveis ao desmatamento, parcialmente compensado por atividades de florestamento/reflorestamento, além de emissões e remoções de outras atividades relacionadas ao uso da terra. No mesmo período, as emissões globais de metano (CH₄) associadas à AFOLU totalizaram 161 ± 43 Mt CH₄ ano⁻¹ (equivalente a 4,5 ± 1,2 Gt CO₂ eq ano⁻¹).

A concentração atmosférica média global de CH₄ apresentou um aumento contínuo desde meados da década de 1980 até o início da década de 1990, seguido por um crescimento mais lento até 1999, um período de estabilidade entre 1999–2006, e um retorno ao crescimento em 2007. Fontes biogênicas desempenham um papel mais significativo nas emissões desde antes de 2000, sendo os ruminantes e a expansão do cultivo de arroz fatores relevantes que contribuem para esse aumento. No que diz respeito às emissões de óxido nitroso (N₂O) em AFOLU, observa-se um aumento, atingindo 8,7 ± 2,5 Mt N₂O ano⁻¹ (equivalente a 2,3 ± 0,7 Gt CO₂ eq ano⁻¹) durante o período de 2007–2016. Essas emissões antropogênicas de N₂O, provenientes principalmente da aplicação de nitrogênio, incluindo ineficiências como aplicação excessiva ou descoordenada com as necessidades das culturas, são uma fonte significativa. Os solos de cultivo agrícola foram responsáveis por cerca de 3 Mt N₂O ano⁻¹ (aproximadamente 795 Mt CO₂ eq ano⁻¹) no mesmo período. Desde o período pré-industrial, as alterações na cobertura da terra resultantes das atividades humanas ocasionaram uma liberação líquida de CO₂, contribuindo para o fenômeno do aquecimento global (IPCC, 2021).

As alterações climáticas têm gerado diversos impactos adversos, sendo notáveis os efeitos prejudiciais na saúde da população, na infraestrutura urbana, na biodiversidade e na produtividade agrícola. Esses impactos resultam em perdas significativas tanto do ponto de vista social quanto econômico, tendendo a se agravar à medida que o processo se intensifica (TOL, 2018).

Com a intensificação do aquecimento global, há projeções indicando que a frequência, intensidade e duração de eventos relacionados ao calor, incluindo ondas de calor, tendem a aumentar ao longo do século XXI, com uma alta confiança nessa previsão. Além disso, é projetado um aumento na frequência e intensidade de eventos extremos de chuva em várias regiões. Os níveis atuais de aquecimento global estão associados a riscos de escassez de água em áreas áridas, erosão do solo, perda de vegetação, danos causados por incêndios, degelo do permafrost, degradação costeira e redução da produtividade das culturas tropicais. Ademais, prevê-se que esses riscos, se tornem mais severos à medida que as temperaturas continuem a aumentar, afetando a estabilidade no fornecimento de alimentos. Vale ressaltar que níveis elevados de CO₂ atmosférico também podem impactar negativamente a qualidade nutricional das culturas agrícolas.

O setor agropecuário, ao depender diretamente das condições climáticas, destaca-se como um dos mais suscetíveis a esse fenômeno, conferindo-lhe um elevado potencial de vulnerabilidade (TOL, 2018). Plantas e animais apresentam níveis limitados de tolerância ao estresse térmico e/ou à instabilidade da precipitação, resultando em perdas de produção e produtividade. Essas perdas, por sua vez, culminam na redução dos níveis de renda agrícola, gerando efeitos negativos em cascata. A vulnerabilidade às mudanças climáticas é diretamente proporcional à capacidade de realizar “ajustes a danos potenciais e aproveitar oportunidades de sistemas, instituições, populações humanas e outros organismos” (IPCC, 2018, p. 542). Nesse contexto, a agricultura familiar destaca-se como um exemplo paradigmático, enfrentando impactos negativos mais expressivos quando comparada à produção agropecuária tradicional. Essa disparidade ocorre devido à menor capacidade adaptativa da agricultura familiar, tanto em termos financeiros quanto no acesso a políticas públicas de financiamento e crédito rural. Nesse sentido, a agricultura desempenha um papel duplo, sendo uma emissora de gases de efeito estufa e, ao mesmo tempo, sensível às mudanças climáticas.

2.6 Estratégias de Mitigação de Emissões de GEE

As transformações climáticas têm se tornado cada vez mais evidentes na sociedade, acarretando implicações significativas para o processo de desenvolvimento. Entre as atividades mais suscetíveis a essas mudanças, encontram-se aquelas que dependem intensamente de recursos naturais, destacando-se, de maneira notória, a produção agropecuária. Apesar de ser reconhecida como uma das principais fontes de emissões de GEE, desempenhando um papel significativo no aquecimento global e nas transformações climáticas, a agropecuária desempenha funções fundamentais na segurança alimentar, no fornecimento de matérias-primas, na produção de bioenergia, na ocupação de uma parcela expressiva da população, no sequestro de C e no equilíbrio da balança comercial, tanto do Brasil quanto de outros países (GARCIA, 2022).

No contexto do acelerado desenvolvimento tecnológico e suas consequências, é pertinente uma breve reflexão sobre a definição de desenvolvimento sustentável, que se manifestou de diversas formas ao longo da história, muitas vezes contraditórias. Primeiramente, é essencial perceber o meio ambiente para além de seus componentes estruturais, como os recursos naturais (solo, água, ar e etc.), uma vez que o meio ambiente se estabelece por meio de inúmeras e variáveis interações. Portanto, é importante compreendê-lo de maneira integral, considerando aspectos ecológicos, sociais, legais, políticos, culturais, científicos, econômicos e éticos. Proteger o meio ambiente, nesse sentido, resulta na preservação das condições necessárias para a vida acontecer (JAPIASSÚ, 2017).

A definição oficial do desenvolvimento sustentável foi consagrada em 1987 pela Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento, no Relatório Brundtland, sendo

conceituado como aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades (BRUNDTLAND, 1987). Desde então, houve várias conferências mundiais que destacaram a preocupação entre crescimento econômico e desenvolvimento sustentável, incluindo a II Conferência da ONU sobre meio ambiente no Rio de Janeiro em 1992 e a Conferência de Johannesburgo sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento em 2002. No entanto, desafios persistem, especialmente no que se refere à desigualdade social e ao modelo de desenvolvimento atual (JAPIASSÚ, 2017; FERNANDES, 2010).

As principais estratégias para reduzir a emissão de GEE provenientes de atividades humanas incluem a minimização do consumo de combustíveis fósseis, a diminuição das taxas de desmatamento e queima de material vegetal, o manejo apropriado do solo, e, por fim, iniciativas para maximizar o sequestro de C no solo e na vegetação (CARVALHO et al., 2010).

De acordo com Lal (1997), os processos gerais de sequestro de C nos solos ocorrem em conjunto via humificação, agregação e sedimentação. A humificação define-se como decomposição/transformação de detritos vegetais e animais por ação de microrganismos em húmus, um estágio mais resistente à decomposição pelas ações microbianas (processo bioquímico), gerando conseqüentemente um acúmulo de C no solo (KIEHL, 1979). A agregação do solo ou estruturação do substrato edáfico é o resultado do arranjo das partículas primárias do solo, o qual é conseqüência dos processos de floculação e cimentação (DUIKER et al., 2003). A sedimentação é o processo de acúmulo de materiais provenientes da área fonte onde o ambiente perdeu a capacidade de transporte desse material. Esses materiais podem ser provenientes de outras áreas (alóctones) ou da própria área (autóctones) (SUGUIO; BIGARELLA, 1990).

No Brasil, a modificação no uso da terra tem gerado significativas alterações nas estruturas e no funcionamento dos ecossistemas naturais, tornando-se a principal fonte de emissões de GEE para a atmosfera. Segundo Seeg (2018), entre 1990 e 2016, esse setor emitiu aproximadamente 39 bilhões de toneladas brutas de CO₂, representando 62% do total das emissões antropogênicas de CO₂ no país. Grande parte dessas emissões resultaram do desmatamento, queimadas, degradação ou conversão do solo para atividades agrícolas. A mudança do uso do solo ocorre mediante algumas ações antrópicas, com a remoção de áreas de vegetação nativa para a introdução de sistemas agropecuários, sendo uma prática comum no setor agrícola do Brasil, ocupando cerca de 28,6% do território nacional até 2017 (MAPBIOMAS, 2018). A alteração no uso da terra, originada pela conversão de florestas em áreas agrícolas ou de pecuária, impacta as propriedades físicas e biológicas da superfície terrestre, tendo potenciais repercussões no clima, tanto em âmbito regional quanto global, conforme indicado por Baede et al. (2001).

Segundo Lal (1997) o tipo de manejo exerce uma influência direta na dinâmica do C no solo, podendo ter impactos positivos na retenção do C atmosférico (CO₂) ou,

inversamente, emitir CO₂ ou CH₄, uma vez que, se manejo adotado envolve a conservação do solo com o mínimo de revolvimento, aliado a uma cobertura contínua do solo, proporciona uma proteção eficaz ao solo, combinando fatores como temperatura, aeração e adição de resíduos vegetais, resultando no aumento da MOS e no acúmulo de C no solo.

Nesse cenário, o Brasil estabeleceu em 2009 o Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de C na Agricultura (Plano ABC), implementado de 2010 a 2020 (Brasil, 2012b). Após a conclusão desse período, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) delineou uma nova etapa com o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de C na Agropecuária (ABC+), que está programado para vigorar de 2020 a 2030 (Brasil, 2021a, 2021b). Desde sua concepção, o ABC marcou uma trajetória inovadora para as políticas e a sociedade, concentrando-se no enfrentamento das mudanças climáticas e contribuindo para a promoção de uma agricultura mais sustentável, caracterizada por baixas emissões de C.

Em face do cenário atual, a transição para a agricultura agroecológica e conservacionista emerge como uma estratégia altamente promissora na adaptação às mudanças climáticas. A adoção de práticas e manejo agroecológicos, como rotação e consórcios de culturas, implementação de cobertura do solo, redução de insumos químicos, sistemas agroflorestais e utilização de bioinsumos, não apenas favorece a restauração dos ecossistemas, mas também aprimora a segurança alimentar. Além disso, essa abordagem desempenha um papel significativo na mitigação dos impactos climáticos, ao se concentrar na promoção da resiliência dos sistemas agrícolas e na redução da pegada ambiental associada à produção de alimentos.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A discussão global sobre as interações entre a alteração no uso do solo, as práticas agrícolas, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e os fenômenos climáticos revela uma preocupação abrangente devido aos impactos adversos observados no meio ambiente, na segurança alimentar e no bem-estar humano. As ações humanas, especialmente nas últimas décadas, têm contribuído significativamente para alterações no cenário terrestre e na composição atmosférica, resultando em efeitos tangíveis do aquecimento global.

A dinâmica do C nos solos é influenciada por uma série de processos complexos, sendo a humificação, agregação e sedimentação responsáveis pelo sequestro de C, enquanto a erosão, decomposição, volatilização e lixiviação contribuem para as perdas desse elemento no ambiente. A intervenção humana, especialmente na modificação do uso da terra para a agricultura, está intrinsecamente ligada às variações no Estoque de C (EC) do solo. A intensidade do pastejo, por exemplo, pode resultar em liberação de C e nitrogênio, contribuindo para a degradação da qualidade da matéria orgânica. Alterações no uso e

ocupação da terra, como desmatamento para pastagem, podem levar a desequilíbrios na dinâmica do ecossistema, com entradas de matéria orgânica inferiores às saídas. Isso resulta em perda tanto na quantidade quanto na qualidade dos teores de C armazenados no solo.

No entanto, práticas agrícolas sustentáveis, como o sistema de plantio direto, preservam a cobertura vegetal e reduzem a emissão de CO₂, promovendo aumento do EC no solo ao longo do tempo. Atividades silviculturais e a adoção de Sistemas Agroflorestais (SAFs) emergem como estratégias eficazes para o sequestro de C, mantendo níveis comparáveis aos da vegetação nativa. Em conclusão, a compreensão dos processos que afetam o sequestro e a perda de C no solo é essencial para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis. A promoção de sistemas que conservem a cobertura vegetal, reduza a perturbação do solo e incentivem a diversidade biológica pode desempenhar um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas, na conservação do solo e na manutenção da qualidade ambiental.

REFERÊNCIAS

ALBRECHT, A.; KANDJI, S. T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 99, n. 1-3, p. 15-27, 2003.

BAEDE, A. P. M.; AHLONSOU, E.; DING, Y.; SCHIMEL, D. E. **Climate Change 2001: The Scientific Basis**; Houghton, J. T.; Ding, Y.; Griggs, D. J.; Noguier, M.; Van der Linden, P. J.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C. A., eds.; Cambridge University Press: Cambridge, 2001.

BERNOUX, M. et al. **Brazil's soil carbon stocks**. Soil Science Society of America Journal, v. 66, p. 888-896, 2002.

BERNOUX, M. et al. Gases de efeito estufa e estoque de carbono nos solos: Inventário do Brasil. **Caderno de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 22, n. 1, pp. 235-246, 2005.

BERTRAND, G. **Paisagem e geografia física global, esboço metodológico**. trad. CRUZ, O. São Paulo: ed. Universidade de São Paulo, Caderno de ciências da terra, 1971.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 685 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio: Brasil 2017/18 a 2027/28 – projeções de longo prazo**. Brasília: Mapa, 2018.

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)**. Brasília, 2012b. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/download.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária, com vistas ao desenvolvimento sustentável: plano operacional: ABC+: 2020-2030**. Brasília, 2021b. Consulta pública. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/arquivos/po-abc_final_port.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2023.

- BEUTLER, A. N. et al. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 829-834, 2002.
- CARVALHO, J. L. N. et al. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 277-290, 2010.
- CASSOL, P. C. et al. Alterações no carbono orgânico do solo de campo natural submetido ao plantio de Pinus taeda em três idades. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 2, p. 545-558, 2019.
- CERRI, C. C. et al. **Challenges and opportunities of soil carbon sequestration in Latin America**. LAL, R.; Cerri, CC; Bernoux, M.; Etchevers, J. & Cerri, CEP Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth, p. 41-47, 2006.
- CERRI, C.C.; CERRI, C. E. P. **Agricultura e aquecimento global**. Boletim Informativo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 23, p. 40-44, 2007.
- CIOTTA, M. N. et al. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1161-1164, 2003.
- COOK, R. L. et al. Soil carbon stocks and forest biomass following conversion of pasture to broadleaf and conifer plantations in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 324, p. 37-45, 2014.
- COSTA, E. A.; GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. S. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n.7, p. 1185-1191, 2006.
- COSTA, F. S. et al. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 323-332, 2008.
- CORAZZA, E. J. et al. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 425-432, 1999.
- D'ANDRÉA, A. F. et al. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 179-186, 2004.
- DA SILVA SANTANA, M. et al. Carbon and nitrogen stocks of soils under different land uses in Pernambuco state, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 16, p. e00205, 2019.
- DIAS-FILHO, M. B.; DAVIDSON, E. A.; CARVALHO, C. J. R. **Linking biogeochemical cycles to cattle pasture management and sustainability**. The Biogeochemistry of the Amazon Basin. Oxford University Press, New York, p. 84-105, 2001.
- ESWARAN, H., VAN DEN BERG, E.; REICH, P. Organic carbon in soils of the world. **Soil Science of America Journal**, v. 57, p. 192-194, 1993.
- FONTANA, A. et al. Atributos de fertilidade e frações húmicas de um Latossolo Vermelho no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 847-853, 2006.
- GARCIA, J. R. et al. Agricultura familiar de baixa emissão de carbono no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 31, n. 4, p. 119, 2022.

- GUO, L. B.; GIFFORD, R. M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. **Global Change Biology**, v. 8, n. 4, p. 345-360, 2002.
- HARVEY, C, A. et al. Integrating agricultural landscapes with biodiversity conservation in the Mesoamerican hotspot. **Conservation Biology**, v. 22, n. 1, p. 8-15, 2008.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2001: The scientific basis**. Cambridge, Cambridge University, 2001, 881p.
- LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, p. 1623-1627, 2004.
- LEITE, L. F. C. et al. Total C and N storage and organic C pools of a Red-Yellow Podzolic under conventional and no tillage at the Atlantic Forest Zone, south-eastern Brazil. **Soil Research**, v. 41, n. 4, p. 717-730, 2003.
- LE QUÉRÉ, C. et al. **Global carbon budget 2018**. Earth System Science Data Discussions, v. 2018, p. 1-3, 2018.
- MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.
- MAGALHAES, S. S. de A.; RAMOS, F. T.; WEBER, O. L. dos S. Estoques de carbono em Latossolo após trinta e oito anos sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 85-91, 2016.
- MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomass** – Coleção 6.0 da série anual de qualidade da pastagem do Brasil, disponível em: https://mapbiomas.org/colecoesmapbiomas1?cama_set_language=pt-BR. Acesso em: 26 nov. 2023.
- MARQUES, A. C. de O.; et al. **A contribuição da agricultura familiar na produção agropecuária do Brasil a partir do censo agropecuário do ano de 2006**. In: JORNADA DO TRABALHO, 21. “A Dimensão Espacial da Expropriação Capitalista sobre os Mundos do Trabalho: cartografando os conflitos, as resistências e as alternativas à sociedade do capital”, São Paulo, 2011.
- MARTIN-NETO, Ladislau et al. Estrutura e natureza química da matéria orgânica do solo. In: BETTIOL, Wagner. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília: Embrapa, 2023. Cap. 5. p. 145-184. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1153147>. Acesso em: 25 fev. 2024.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2003. 729 p.
- MURTY, D. et al. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. **Global Change Biology**, v. 8, n. 2, p. 105-123, 2002.
- NAIR, P.K. R. Agroecosystem management in the 21st century: it is time for a paradigm shift. **Journal of Tropical Agriculture**, v. 46, p. 1-12, 2008.
- NORNGROVE, L. et al. Shifts in soil faunal community structure in shaded cacao agroforests and consequences for ecosystem function in Central Africa. **Tropical Ecology**, v. 50, n. 1, p. 71-78, 2009.
- RIBEIRO, Bruno Teixeira; JUNQUEIRA, Bárbara Rodrigues; RODRIGUES, Gabrielly Isaac. Extração de fósforo disponível em um Latossolo assistida por irradiação ultrassônica. **Revista de Ciências Agrárias: Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, [S.L.], v. 57, n. 4, p. 382-387, 2014. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.1622>.

- NORRIS, K. Agriculture and biodiversity conservation: opportunity knocks. **Conservation Letters**, v. 1, n. 1, p. 2-11, 2008.
- PRIMIERY, S.; MUNIZ, A. W.; LISBOA, H. de M. Dinâmica do carbono no solo em ecossistemas nativos e plantações florestais em Santa Catarina. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.
- ONU. Organização das Nações Unidas. ‘Code red for humanity’. Climate and Environment. 2021. Disponível em: <<https://news.un.org/en/story/2021/08/1097362>>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1609-1623, 2007.
- RESCK, D. V. S. et al. **Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado**. In: SANTOS, G.A. et al., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2 ed. Porto Alegre, Metrópole, p. 359-417, 2008.
- RUFINO, D. C. et al. Estoque de carbono do solo em agroecossistemas e vegetação secundária. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 11, 2022.
- SALTON, J. C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.11-21, 2008.
- SILVA, R. R. Qualidade do solo em função de diferentes sistemas de manejo na região Campos das Vertentes, Bacia Alto Rio Grande-MG. Lavras. 97 p. (**Dissertação de Mestrado**) Universidade Federal de Lavras, 2001.
- SMILEY, G. L.; KROSCHER, J. Temporal change in carbon stocks of cocoa–glicírcia agroforests in Central Sulawesi, Indonesia. **Agroforestry Systems**, v. 73, p. 219-231, 2008.
- SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, p. 51-58, 2004.
- SOUZA, E. D. de et al. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1829-1836, 2009.
- TOL, R. S. J. The economic impacts of climate change. **Review of Environmental Economics and Policy**, 2018.
- VICENTE, L. C. et al. Organic carbon within soil aggregates under forestry systems and pasture in a southeast region of Brazil. **Catena**, v. 182, p. 104139, 2019.
- VIEIRA FILHO, J. E. R. et al. **Diagnóstico e desafios da agricultura brasileira**. 2019.
- WALLACE, G. N.; BARBORAK, J. R.; MACFARLAND, C. **Land use planning and regulation in and around protected areas: A study of legal frameworks, best practices and capacity building needs in Mexico and Central America**. 2005.
- ZELARAYÁN, M. L. C. et al. Impacto da degradação sobre o estoque total de carbono de florestas ripárias na Amazônia Oriental, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 45, p. 271-282, 2015.