



CAPÍTULO 14

O SOLO E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: ESTRATÉGIAS PARA ESTOQUE DE CARBONO

<https://doi.org/10.22533/at.ed.1981325180714>

Gabriela Gonçalves Vendite

Graduanda em Engenharia Agronômica

Universidade Federal de São Carlos – Centro de Ciências Agrárias (CCA-UFSCar)

<https://orcid.org/0009-0004-0593-5187>

Jackeline Silva Santos

Graduanda em Engenharia Agronômica

Universidade Federal de São Carlos – Centro de Ciências Agrárias (CCA-UFSCar)

<https://orcid.org/0009-0008-3198-4475>

Larissa Ayumi Kuninari Gasparino

Graduanda em Engenharia Agronômica

Universidade Federal de São Carlos – Centro de Ciências Agrárias (CCA-UFSCar)

<https://orcid.org/0009-0003-3520-2825>

Anna Hoffmann Oliveira

Profª. Drª.

Doutora Ciência do Solo

Universidade Federal de São Carlos – Centro de Ciências Agrárias (CCA-UFSCar)

<https://orcid.org/0000-0002-5479-8359>

RESUMO: O solo é um recurso essencial para a sustentação da vida na Terra e desempenha um papel crucial diante das mudanças climáticas globais. A capacidade do solo de fornecer serviços ecossistêmicos interligados à sociedade e ao meio ambiente com destaque para os serviços de regulação, que o tornam uma ferramenta essencial na mitigação das emissões de gases de efeito estufa, os principais responsáveis pelas mudanças climáticas globais, sendo um dos maiores reservatórios terrestres de carbono. Este trabalho, por meio de uma revisão bibliográfica, analisou o potencial do solo no sequestro de carbono, abordando estratégias de manejo sustentável que contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Foram destacadas práticas como o Sistema Plantio Direto, a rotação de culturas e a preservação de ecossistemas naturais, que não apenas aumentam os estoques

de carbono no solo, mas também promovem a saúde e a conservação do solo. Além disso, foram discutidas as metodologias para quantificação do carbono e os desafios relacionados à variabilidade espacial. A adoção de práticas agrícolas sustentáveis e políticas públicas direcionadas à gestão do solo mostra-se essencial para enfrentar os impactos das mudanças climáticas, promover a segurança alimentar e alcançar metas globais de sustentabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Sequestro de Carbono; Matéria Orgânica; Gases de Efeito Estufa.

INTRODUÇÃO

A intensificação das mudanças climáticas tem gerado uma série de desafios globais, sendo amplamente reconhecido que as atividades humanas desempenham um papel central nesse processo. As emissões de gases de efeito estufa (GEE), em particular o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), são apontadas como as principais responsáveis pela alteração no equilíbrio climático (IPCC, 2023). O CO_2 , em razão das suas elevadas emissões associadas à queima de combustíveis fósseis, ao desmatamento e à agricultura intensiva, tem se consolidado como o maior contribuidor para o aumento da concentração de GEE na atmosfera, acelerando o aquecimento global e provocando modificações no sistema climático (Souza; Corazza, 2017). A elevação das concentrações de CO_2 está diretamente relacionada ao aumento da temperatura média global, o que tem intensificado a ocorrência de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, inundações e tempestades severas. Nesse contexto, torna-se imperativa a implementação de estratégias eficazes para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, com especial atenção à redução das emissões de CO_2 (Zheng et al., 2021).

O solo, enquanto um dos componentes mais relevantes do ciclo global do carbono, desempenha um papel crucial na regulação das concentrações atmosféricas de CO_2 . Estima-se que o solo seja o maior reservatório de carbono terrestre, com quantidades que variam entre 1.500 e 2.400 gigatoneladas (Gt), significativamente superiores aos estoques de carbono presentes na vegetação, que totalizam cerca de 450 a 650 Gt (Machado, 2005). O carbono no solo é armazenado predominantemente sob a forma de húmus, um composto orgânico gerado pela decomposição da matéria vegetal e animal. Esse processo não apenas contribui para o armazenamento de carbono, mas também desempenha uma função vital na manutenção da fertilidade do solo, visto que o húmus é responsável por melhorar a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes essenciais para o crescimento das plantas (Bettoli et al., 2023). A fotossíntese, por sua vez, também contribui para a captura de CO_2 da atmosfera, reforçando a importância tanto do solo quanto das plantas como elementos-chave na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (Kluge; Tezotto-uliana; Silva, 2015).

A perda de carbono do solo, frequentemente associada à degradação do solo e a práticas agrícolas inadequadas, tem sido uma das principais causas do aumento desproporcional de CO₂ na atmosfera, exacerbando as mudanças climáticas (Souza Filho, 2017). Historicamente, a conversão de ecossistemas naturais, como florestas, para áreas agrícolas ou pastagens tem contribuído para a liberação significativa de carbono armazenado no solo (Zomer *et al.*, 2017). Esse processo resulta na emissão de grandes quantidades de CO₂, intensificando os efeitos do aquecimento global. Contudo, é importante destacar que o solo é um reservatório dinâmico de carbono, e práticas agrícolas sustentáveis podem reverter essa tendência, promovendo o sequestro de carbono e aumentando os estoques de carbono no solo.

O aquecimento global tem impactado o carbono do solo de diversas maneiras, destacando-se a aceleração da decomposição da matéria orgânica e a liberação de carbono sob a forma de CO₂. Estudos recentes, como o realizado por pesquisadores da Universidade de Zurique na Floresta Nacional de Sierra Nevada, evidenciam que o aquecimento das camadas mais profundas do solo tem levado à degradação acelerada de compostos orgânicos estáveis, como lignina e compostos cerosos, os quais desempenham um papel fundamental no armazenamento de carbono nas plantas. O estudo indicou que, com o aumento das temperaturas, a decomposição desses compostos, antes considerados estáveis, tem se intensificado, resultando na liberação de carbono para a atmosfera. Esse fenômeno representa uma ameaça à capacidade do solo de funcionar como um sumidouro de carbono, o que pode, por sua vez, intensificar ainda mais o aquecimento global (Zosso *et al.*, 2023).

O conceito de sequestro de carbono no solo envolve a adoção de práticas de manejo que visam aumentar a quantidade de carbono armazenada nas camadas mais profundas do solo. Dentre as abordagens mais eficazes, destaca-se a agricultura conservacionista, que inclui o uso de técnicas como o plantio direto e a rotação de culturas. Essas práticas minimizam a perturbação do solo e asseguram a manutenção da cobertura vegetal, o que favorece o aumento da matéria orgânica no solo e, consequentemente, contribui para o armazenamento de carbono. A agricultura conservacionista não apenas promove o sequestro de carbono, mas também aprimora a saúde do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água, sua fertilidade e sua resistência à erosão (Telles *et al.*, 2021). Dessa forma, o manejo sustentável do solo, em vez de reduzir os estoques de carbono, pode ajudar a aumentar o armazenamento de carbono, com benefícios tanto para a mitigação das mudanças climáticas quanto para a adaptação dos sistemas agrícolas às novas condições climáticas.

Além das práticas agrícolas conservacionistas, o manejo adequado do solo também envolve a preservação e restauração de ecossistemas naturais, como florestas e pradarias, que são essenciais para o sequestro de carbono. A manutenção de áreas

florestais intactas e a recuperação de ecossistemas degradados podem contribuir substancialmente para o aumento dos estoques de carbono no solo, além de melhorar a qualidade do ar e da biodiversidade. A restauração de florestas, por exemplo, não apenas favorece o sequestro de carbono, mas também melhora a qualidade do solo e dos recursos hídricos, beneficiando, assim, tanto as comunidades locais quanto a agricultura (Faria, 2016).

A crescente importância do solo no contexto das mudanças climáticas tem sido reconhecida globalmente, com a implementação de políticas públicas e iniciativas internacionais voltadas para a promoção do manejo sustentável do solo e o aumento do sequestro de carbono. Iniciativas como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), o Programa Neutralidade na Degradação das Terras da UNCCD, a Aliança Mundial para os Solos da FAO e a Iniciativa 4 por 1000 têm incentivado o desenvolvimento de estratégias para melhorar a gestão do carbono no solo, com ênfase em práticas que promovam a sustentabilidade ambiental, social e econômica. Essas iniciativas reconhecem a agricultura e o manejo do solo como ferramentas-chave na luta contra as mudanças climáticas, sendo a promoção de boas práticas agrícolas fundamental para alcançar as metas globais de mitigação (Le Quéré *et al.*, 2018).

Este estudo tem como objetivo explorar o papel fundamental do carbono do solo na mitigação das mudanças climáticas, com especial enfoque nas estratégias de manejo que promovem o aumento do estoque de carbono no solo e sua relevância no enfrentamento dos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

CICLO DO CARBONO

O carbono desempenha um papel indispensável para a existência da vida na Terra, em grande parte por sua capacidade de formar até quatro ligações covalentes, característica que o torna um componente-chave de inúmeras moléculas essenciais, como proteínas, carboidratos, lipídios e pigmentos. Além disso, gases como dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), presentes na atmosfera, contribuem para o efeito estufa, regulando a temperatura do planeta e possibilitando condições favoráveis para a evolução da vida. Sem esses gases, a Terra teria uma temperatura média cerca de 33°C mais baixa do que a atual, provavelmente completamente congelada (Cerri, 2023).

Com isso, o ciclo do carbono é um processo fundamental para a regulação climática da Terra. Ele descreve o movimento de carbono entre os diversos compartimentos do planeta, que incluem a atmosfera, os oceanos, os ecossistemas terrestres (biota e solos) e as formações geológicas contendo carbono fóssil e mineral (Bessa, 2019). Na atmosfera, o carbono se apresenta principalmente como dióxido de carbono (CO_2), que, embora represente apenas 0,001% do carbono total no planeta, desempenha um papel crucial no equilíbrio climático e na manutenção da vida na Terra (Rocha *et al.*, 2005).

Compartimentos de Carbono no Sistema Terrestre

De acordo com Machado (2005), a atmosfera armazena cerca de 850 Pg C (pentagramas de carbono). Os oceanos, predominantemente contêm carbono inorgânico dissolvido (Pilson, M. E. Q., 1998), somando aproximadamente 38.000 Pg C. Nos ecossistemas terrestres, compostos pela biota (vegetação) e o solo, o total estimado de carbono é de cerca de 2.500 Pg C. O solo representa o maior reservatório dentro desses ecossistemas, com 1.500 Pg C em forma de carbono orgânico e 1.000 Pg C como carbono mineral. Por fim, as formações geológicas, que incluem o carbono fóssil e mineral, armazenam cerca de 5.000 Pg C, sendo 4.000 Pg C no carvão, 500 Pg C no petróleo e 500 Pg C no gás natural.

O EFEITO ESTUFA E SUAS IMPLICAÇÕES

O Papel dos Gases de Efeito Estufa

Através do Protocolo de Kyoto, os gases de efeito estufa (GEE) definidos incluem, além do dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), os hidrofluorcarbonetos (HFCs), os perfluorcarbonetos (PFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF_6). Esses gases, que podem ter origem tanto natural quanto antropogênica, são componentes da atmosfera capazes de absorver e emitir radiação em comprimentos de onda específicos do espectro infravermelho. Essa radiação é refletida pela superfície terrestre, pela atmosfera e pelas nuvens. Os GEE retém uma parcela significativa dessa radiação, devolvendo parte ao espaço e resultando em um efeito líquido de aprisionamento de energia. Esse fenômeno, denominado efeito estufa, tende a aumentar a temperatura da superfície do planeta (Dalcin, Mangini, Godoi, 2021; IPCC, 2023).

No ano de 1990, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) publicou seu Primeiro Relatório de Avaliação, no qual se confirmou que as alterações climáticas constituem uma ameaça real. Esse documento instigou as negociações para um acordo global que enfrentasse a questão, analisando os elementos climáticos que influenciarão a vida humana no século XXI e a viabilidade de sua previsão. Os cientistas envolvidos no relatório destacaram com convicção que as emissões resultantes das atividades humanas estavam elevando substancialmente as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, o que, por sua vez, contribui para o aumento adicional da temperatura da superfície terrestre (IPCC, 1990).

O PAPEL DO CARBONO DO SOLO NAS TRANSFORMAÇÕES CLIMÁTICAS GLOBAIS

Alterações nos estoques de carbono do solo podem exercer influência relevante nas flutuações do ciclo global de carbono ao longo de períodos que variam de poucos anos a várias décadas. Assim, o manejo do carbono no contexto de transformações no uso da terra possui grande relevância para atender compromissos climáticos em âmbito regional e nacional. As florestas tropicais intactas da Amazônia, por exemplo, são amplamente reconhecidas como importantes sumidouros de carbono, capazes de mitigar, em grande parte, as emissões associadas ao desmatamento (Sena; Morgado, 2023). Entretanto, cenários de mudanças climáticas futuras sugerem que florestas, como a Amazônia, podem sofrer perdas significativas de carbono armazenado no solo. Devido ao desmatamento e às mudanças climáticas globais, a Amazônia tem reduzido sua capacidade de atuar como sumidouro de carbono e, em algumas regiões, passou a se tornar uma fonte líquida de carbono para a atmosfera, intensificando o aquecimento global (Gatti et al., 2021). Assim, torna-se crucial investigar a capacidade dos solos amazônicos de armazenar ou liberar carbono, o que exige compreender a quantidade de carbono, analisando sua estabilidade ou desestabilidade.

Os ecossistemas terrestres, que incluem tanto a vegetação quanto os solos, desempenham papel essencial como esses sumidouros de carbono, sendo os solos particularmente importantes nesse contexto. A adoção de práticas sustentáveis de manejo da biosfera terrestre, sobretudo dos solos, pode contribuir de maneira significativa para mitigar o aumento das emissões de gases de efeito estufa. De acordo com o estudo de Scholz (2020), solos de diferentes biomas, como as florestas boreais (zonas frias) e os campos das regiões temperadas, apresentam estoques de carbono superiores aos da vegetação. Contudo, a conversão de áreas florestais para uso agrícola tem causado impactos expressivos, elevando a liberação de gases de efeito estufa para a atmosfera.

No sistema de preparo do solo convencional na agricultura, por exemplo, influencia três processos fundamentais, impactando vários fluxos no ciclo do carbono. O primeiro, considerado o mais relevante, é a mineralização da matéria orgânica do solo (MOS), que intensifica a liberação de carbono do solo para a atmosfera. O segundo é o consumo de combustíveis fósseis durante as operações de preparo, contribuindo para a emissão de carbono da litosfera, como o petróleo, para a atmosfera. O terceiro processo é a erosão, que transfere carbono do solo para a hidrosfera e pode indiretamente aumentar a emissão de carbono da hidrosfera para a atmosfera, caso a matéria orgânica presente nos sedimentos seja mineralizada (Simon et al., 2019; Dieckow et al., 2004).

Histórico e Impactos da Mudança Climática

Durante a segunda metade do século XX foi registrado um aumento médio de 0,6°C na temperatura global, evidenciando o aquecimento do planeta. Esse fenômeno tem provocado mudanças significativas nos padrões climáticos, incluindo alterações nos regimes de precipitação, com maior frequência de chuvas intensas e eventos climáticos extremos (IPCC, 2007). Além disso, o aumento das emissões de gases de efeito estufa, originadas predominantemente pela crescente industrialização e urbanização, tem intensificado o aquecimento global e seus impactos adversos (Barboza et al., 2019). Entre as principais consequências desse fenômeno destaca-se o aumento das temperaturas médias globais, o derretimento das calotas polares, a elevação do nível do mar e a intensificação de eventos climáticos extremos, além de impactar diretamente os ecossistemas locais e o fornecimento de água para centenas de milhões de pessoas que dependem desses corpos de gelo (BBC News, 2021; Zheng et al., 2021).

Um estudo recente realizado a partir da análise de amostras de núcleos de gelo da Antártica revelou que, em 2023, o aquecimento global causado por atividades humanas atingiu 1,49°C acima dos níveis pré-industriais. A pesquisa mostrou que os níveis de CO₂ aumentaram em 142 ppm em comparação com o período anterior a 1700, confirmando que o impacto humano no clima elevou a temperatura em 1,49°C (Jarvis; Forster, 2024).

De acordo com um relatório do IPCC de 2022, um aumento de 1,5°C na temperatura global colocaria aproximadamente 350 milhões de pessoas em risco de escassez de água devido a secas intensas. Caso o aquecimento atingisse 2°C, esse número poderia subir para 420 milhões. Além disso, estimativas indicam que, em um cenário de aquecimento de 1,5°C, a frequência de chuvas extremas e furacões poderia crescer em torno de 7%. Se o aumento fosse de 2°C esse percentual poderia alcançar 15% (Andrade, 2023).

O mundo tem se conscientizado cada vez mais da urgência de adotar medidas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), uma vez que os impactos das mudanças climáticas tornam-se cada vez mais evidentes. O Protocolo de Kyoto, como citado anteriormente, foi adotado em dezembro de 1997 durante a Terceira Sessão da Conferência das Partes (COP 3) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), e definiu metas específicas para a redução das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. Estabeleceu compromissos legalmente vinculantes para que países desenvolvidos reduzam suas emissões de gases de efeito estufa, com o objetivo de combater o aquecimento global e estabilizar as concentrações desses gases na atmosfera. O protocolo também incentiva a cooperação internacional e a implementação de mecanismos de mercado, como o comércio de créditos de carbono, para atingir suas metas de forma eficiente.

No período entre 2008 e 2012, por exemplo, a Europa comprometeu-se a diminuir suas emissões em 8% abaixo dos níveis de 1990, enquanto os Estados Unidos e o Japão assumiram metas de redução de 7% e 6%, respectivamente. Instituições públicas e privadas de pesquisa têm desenvolvido uma série de tecnologias para reduzir as concentrações de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, atuando no sequestro de carbono em sistemas energéticos, formações geológicas, oceanos e ecossistemas terrestres (Maciel; Khan; Rocha, 2020). Um ponto essencial a ser analisado é a eficácia dessas tecnologias em cenários de crescimento econômico, nos quais a demanda por combustíveis fósseis aumenta significativamente nos setores industrial e de transportes. Também é fundamental avaliar até que ponto essas iniciativas podem, de fato, contribuir para reduzir os níveis de CO_2 atmosférico, conforme estipulado pelas políticas governamentais.

Adicionalmente, é importante destacar que o Protocolo de Kyoto concentra-se principalmente nos fluxos de carbono, isto é, nas alterações nos níveis de carbono, em vez de nos teores e estoques presentes em compartimentos específicos do solo (Pereira et al., 2020). Contudo, a análise dos diferentes compartimentos de carbono no solo e de suas dinâmicas é indispensável para identificar práticas de manejo do solo que favoreçam o sequestro de carbono, contribuindo, assim, para mitigar os efeitos das mudanças climáticas.

Cenários Futuros e Consequências

De acordo com o trabalho de Moura et al. (2015), o cenário de altas emissões é considerado pessimista, projetando um aumento da temperatura entre 2°C e 5,4°C até o ano de 2100. Já o cenário de baixas emissões é otimista, com uma previsão de aumento de temperatura variando entre 1,4°C e 3,8°C até 2100. A comunidade científica internacional converge na avaliação de que, sem a implementação de estratégias de mitigação, os impactos das mudanças climáticas serão severos, caracterizados por eventos climáticos extremos mais frequentes, como tempestades intensas e longos períodos de seca. De acordo com Ferreira et al., (2017), o setor agrícola destaca-se como um dos mais afetados pelos efeitos do aquecimento global. Assim, a crise climática desponta como um dos maiores e mais complexos desafios ambientais que a humanidade terá de enfrentar no século XXI.

Os países signatários do Acordo de Paris devem apresentar o segundo ciclo de suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), que vigorarão de 2031 a 2035 (Tsai et al., 2024). Essas novas metas são cruciais para determinar se o aquecimento global poderá ser limitado a menos de 2°C, conforme previsto no Acordo de Paris, ou se será possível alcançar o objetivo mais ambicioso de 1,5°C, reforçado pelo Balanço Global (GST) da COP28 em 2023. Para isso, as emissões globais

precisam cair 60% até 2035 em relação a 2019, com um corte de pelo menos 42% até 2030. No entanto, as NDCs atuais, se totalmente implementadas, resultariam em uma redução de apenas 5,9% até 2030, evidenciando a necessidade de maior ambição e ação climática (IPCC, 2024).

O Brasil, como anfitrião da COP30 em 2025, comprometeu-se a ser um dos primeiros países a apresentar sua nova NDC. Atualmente, o país tem metas absolutas de redução de emissões de 48% até 2025 e 53% até 2030, em relação aos níveis de 2005. A nova NDC será baseada em trajetórias de mitigação do Plano Clima Mitigação, visando zerar as emissões líquidas até 2050 (Brasil, 2025). O Observatório do Clima (2024) propôs uma NDC mais ambiciosa, sugerindo que o Brasil alcance emissões líquidas de 400 milhões de toneladas de CO₂e até 2030 e 200 milhões até 2035, o que exigiria zerar o desmatamento e ampliar ações em setores como energia, agropecuária e resíduos.

A RELAÇÃO ENTRE O USO AGRÍCOLA DO SOLO E SEQUESTRO DE CARBONO

O Sistema Plantio Direto (SPD) e seus Benefícios

O Sistema de Plantio Direto (SPD) apresenta-se como uma alternativa eficaz, promovendo a estabilidade dos agregados do solo por meio da rotação de culturas, da manutenção da cobertura permanente, na forma de palhada, e do mínimo revolvimento solo, minimizando práticas agressivas de preparo do solo. Esse sistema utiliza a matéria orgânica produzida pelo resíduo vegetal das culturas anteriores para melhorar a estrutura do solo (Salomão *et al.*, 2020). A cobertura contínua do solo e a busca por recuperar a fertilidade solo visam a sua conservação (Adams, 2016). A matéria orgânica desempenha papel crucial nesse processo, sendo considerada um dos principais indicadores de qualidade e conservação do solo, contribuindo diretamente para o aumento da produtividade agrícola e a preservação ambiental em regiões tropicais e subtropicais (Bettoli *et al.*, 2023).

Estudos indicam que, quando manejado de forma eficiente, o SPD pode reduzir a perda do perfil do solo em até cinco vezes em comparação ao sistema convencional. Além disso, sua eficiência é maximizada em regiões com climas quentes, como o sudeste, centro-oeste e nordeste do Brasil, onde a produção de biomassa vegetal é superior à observada no sul do país (Luiz, 2016; Júnior, Araújo & L., 2012).

A prática de Sistema Plantio Direto promove uma dinâmica ecológica sustentável, permitindo a reciclagem de compostos orgânicos de forma similar à serapilheira nas florestas (Ferreira, 2016). A rotação de culturas é particularmente benéfica, pois aumenta a concentração de carbono no solo devido à decomposição dos resíduos das

plantas de cobertura, o que, por sua vez, reduz as perdas de nutrientes por lixiviação (Savioli, 2024). Os estudos de Stumpf (2015) destacam que a biomassa oriunda de gramíneas tem um impacto significativo na agregação do solo, pois apresenta uma alta relação C/N, resultando em uma decomposição gradual e prolongada da matéria orgânica. Esse processo contribui para a incorporação de macro e micronutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio, boro e molibdênio, promovendo a reciclagem dos nutrientes contidos na cobertura do solo.

Tecnologias para Mitigação: captura e sequestro de carbono

Existem diversas tecnologias em desenvolvimento para mitigar as emissões de CO₂, incluindo a captura e armazenamento de carbono (CCS) em plantas industriais e o sequestro de carbono através dos oceanos e dos ecossistemas terrestres. A mudança de uso da terra, como a adoção de práticas agrícolas sustentáveis, pode ser uma das estratégias mais eficazes para sequestro de carbono. Caso não sejam adotadas medidas corretivas, é esperado um aumento substancial dessas emissões nos próximos anos (Climate Chance Association, 2018).

O solo é essencial para a produção de alimentos, a regulação da água e a captura de carbono, desempenhando um papel crucial no combate às mudanças climáticas (FAO, 2024). Iniciativas como o SOILFER, que mapeia solos na América Central para promover sistemas agroalimentares resilientes, e o SOILCARE, que restaura terras degradadas no Caribe, exemplificam esforços concretos para preservar os solos. A LATSOLAN impulsiona inovações na análise de solos, enquanto o Protocolo para o Manejo Sustentável de Solos adapta práticas agrícolas em diferentes países. O Programa Global de Doutores do Solo, por sua vez, capacita agricultores para adotarem práticas sustentáveis. Esses projetos evidenciam a importância de adotar práticas agrícolas responsáveis e de promover a conservação e recuperação dos solos, fundamentais para a segurança alimentar, a resiliência dos ecossistemas e o enfrentamento das crises climáticas.

A Criação da RECSOIL

Focado na iniciativa de recarbonização dos solos, a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) também criou a RECSOIL, com o objetivo de promover a melhoria da saúde do solo por meio da reposição de carbono orgânico. A referida iniciativa inclui projetos-piloto no México, voltados para os cultivos de milho, limão e agave, e na Costa Rica, onde foi instituído um sistema de recompensas para os agricultores que adotam práticas de manejo sustentável dos solos (FAO, 2024). Na Costa Rica, por exemplo, os primeiros resultados mostram que solos em altitudes acima de 1.000 metros, principalmente Andosols, armazenam mais de 110 toneladas de carbono por hectare.

A análise inicial também revelou que a fertilidade química e física do solo, o pH equilibrado e a atividade biológica dos solos (como a diversidade microbiana) são essenciais para o sequestro de carbono. Além disso, foi identificado que práticas como a aplicação controlada de fertilizantes e a manutenção da estrutura do solo são cruciais para o sucesso do projeto. A linha de base estabelecida permitirá monitorar os progressos ao longo do tempo e adaptar as práticas agrícolas para aumentar a capacidade de armazenamento de carbono. O projeto está em expansão, com a meta de envolver mais de 2 milhões de hectares no futuro, o que pode contribuir significativamente para mitigar as emissões de gases de efeito estufa na Costa Rica. A colaboração institucional e o fortalecimento das capacidades técnicas são vistos como fatores essenciais para o sucesso e expansão da iniciativa (FAO, 2024).

A elevação do teor de carbono orgânico no solo pode contribuir de maneira parcial para a mitigação das emissões de carbono e é, simultaneamente, crucial para a adaptação dos sistemas agrícolas às mudanças climáticas, em razão dos múltiplos cobenefícios que proporciona. O carbono orgânico no solo exerce efeitos positivos sobre a estrutura do solo, a retenção de água e o fornecimento de nutrientes, sendo imprescindível para a manutenção dos serviços ecossistêmicos e para a sustentabilidade da produtividade agrícola (Amelung et al, 2020).

O Plano ABC

De acordo com MAPA (2016), entre 2010 e 2020 o Plano ABC, também conhecido como Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono, foi concebido para promover ações que integrem tecnologias sustentáveis ao setor agropecuário brasileiro. Desenvolvido com base no artigo 3º do Decreto nº 7.390/2010, o plano tem como objetivo alinhar as práticas agrícolas nacionais aos compromissos de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) assumidos pelo país. O primeiro programa, voltado para a recuperação de pastagens degradadas, buscava restaurar a produtividade de áreas de pastagem em condições de degradação, promovendo a melhoria da qualidade do solo e reduzindo emissões associadas ao manejo inadequado. Já o programa de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) e Sistemas Agroflorestais (SAFs) promovia a combinação de diferentes sistemas produtivos em uma mesma área, aumentando a eficiência do uso da terra e contribuindo para o sequestro de carbono.

O Sistema Plantio Direto (SPD) foi incluído como estratégia para minimizar o revolvimento do solo, preservar sua estrutura e aumentar o acúmulo de matéria orgânica, favorecendo a retenção de carbono. A Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) foi incentivada por meio do uso de leguminosas e microrganismos que fixam nitrogênio no solo, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos e suas

emissões associadas. O programa de Florestas Plantadas visava expandir áreas de reflorestamento com espécies comerciais, contribuindo para o aumento do estoque de carbono e a oferta sustentável de madeira (MAPA, 2016)

O tratamento de dejetos animais foi abordado com tecnologias para reduzir emissões de metano e outros GEE provenientes da pecuária, promovendo a utilização de resíduos como fontes de energia ou adubo orgânico. Por fim, o programa de adaptação às mudanças climáticas buscava preparar o setor agropecuário para lidar com os impactos climáticos, incentivando práticas e tecnologias que aumentassem a resiliência das atividades produtivas frente as alterações no clima. Para estabelecer uma abordagem mais atualizada e integrada, o governo federal implementou um novo decreto para que seja revisado o Plano ABC para o período de 2021 a 2030 (MAPA, 2016).

Dessa forma, o Plano ABC (2010-2020) superou a maioria das metas, atingindo 54,03 milhões de hectares (152% do previsto) e mitigando 193,67 milhões de Mg CO₂ eq (119% da meta máxima). Destacam-se a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta e o Sistema de Plantio Direto, que mais que dobraram seus objetivos, enquanto o tratamento de dejetos animais superou em quase 900% a meta. A recuperação de pastagens degradadas teve grande expansão, mas mitigou menos carbono do que o esperado. Já as florestas plantadas ficaram abaixo da meta. No geral, os resultados mostram avanços expressivos na adoção de práticas sustentáveis na agricultura brasileira (Governo Federal, 2023) (Figura 1).

METAS PLANO ABC RESULTADOS 2010 a 2020						
TECNOLOGIAS	EM ÁREA milhões ha			MITIGAÇÃO milhões Mg CO ₂ eq		
	META	RESULTADO	ALCANCE	META	RESULTADO	ALCANCE
Recuperação de Pastagens Degradadas	15	26,8	179%	104	36,01	35%
Integração Lavoura-Pecuária-Floresta	4	10,76	269%	18 a 22	40,78	185%
Sistema Plantio Direto	8	14,59	182%	16 a 20	26,7	133%
Fixação Biológica Nitrogênio	5,5	11,78	214%	10	21,56	216%
Florestas Plantadas	3	1,88	63%	-	8,82	-
Tratamento de Dejetos Animais	4,4 milhões m ³	38,34 milhões m ³	871%	6,9	59,81	867%
TOTAL PLANO ABC	35,5 milhões de ha	54,03 milhões de ha	152%	133 a 163	193,67 milhões Mg CO₂ eq	119%

Quadro 1 - Resultado do Plano de Metas ABC (2010 a 2020) (Fonte: Governo Federal, 2023).

A Evolução do Plano ABC: Plano ABC+

Segundo o Governo Federal (2023), a implantação do Plano ABC+ (2020-2030) surge como uma evolução do Plano ABC, ampliando suas ações para consolidar uma agropecuária nacional sustentável, resiliente e de baixa emissão de carbono. O novo plano mantém o foco na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), mas incorpora estratégias mais robustas de adaptação às mudanças climáticas e a gestão integrada da paisagem, alinhando-se às metas da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Acordo de Paris.

Uma das inovações do ABC+ é a previsão de revisões periódicas, com mecanismos de monitoramento que permitem ajustes conforme novas demandas e prioridades. Revisões bianuais estão previstas para incorporar avanços científicos e práticas inovadoras, garantindo que o plano se mantenha atualizado e eficaz ao longo da década (Governo Federal, 2023). Essa abordagem dinâmica visa fortalecer a agropecuária brasileira, tornando-a mais sustentável e preparada para os desafios climáticos, ao mesmo tempo em que assegura a produção de alimentos, grãos, fibras e bioenergia de forma equilibrada com a conservação dos recursos naturais (Embrapa, 2021).

METAS ABC+ e Mitigação 2021 a 2030			
TECNOLOGIAS	ABC+	META milhões ha ⁽¹⁾ /m ³⁽²⁾ /animais ⁽³⁾	META MITIGAÇÃO milhões Mg CO2 eq
Práticas para Recuperação de Pastagens Degradadas (PRPD) 		30,0 ⁽¹⁾	113,7
Sistema Plantio Direto (SPD)	Sistema Plantio Direto de Grãos (SPDG) 	12,5 ⁽¹⁾	12,1
	Sistema Plantio Direto Hortalícias (SPDH) 	0,08 ⁽¹⁾	0,88
Sistemas de Integração (SIN)	Integração Lavoura- Pecuária- Floresta (ILPF) 	10,0 ⁽¹⁾	34,1
	Sistemas Agroflorestais (SAF) 	0,1 ⁽¹⁾	37,9
Florestas Plantadas (FP) 		4,0 ⁽¹⁾	510,0
Bioinsumos (BI) 		13,0 ⁽¹⁾	23,4
Sistemas Irrigados (SI) 		3,0 ⁽¹⁾	50,0
Manejo de Resíduos da Produção Animal (MRPA) 		208,4 ⁽²⁾	277,8
Terminação Intensiva (TI) 		5,0 ⁽³⁾	16,24
TOTAL ABC+	72,68 milhões ha + 208,40 milhões m ³ + 5 milhões de animais	1.076,14 milhões de Mg CO2eq	

Quadro 2 - Resultado do Plano de Metas ABC (2010 a 2020) (Fonte: Governo Federal, 2023).

ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DE CARBONO NO SOLO

Metodologia para Medição de Carbono no Solo

A quantificação do estoque de carbono no solo é essencial para compreender o impacto das práticas de manejo agrícola e avaliar a eficácia das estratégias de sequestro de carbono. Este processo envolve, primeiramente, a amostragem do solo, que consiste na coleta de amostras de solo em diferentes profundidades, com o objetivo de analisar o teor de carbono total e a densidade do solo. Em seguida, realiza-se a análise laboratorial, onde o teor de carbono é determinado por meio de métodos específicos, como a combustão seca ou a espectrometria de massa, para quantificar com precisão a quantidade de carbono presente no solo (Rodrigues et al., 2016; Higa et al., 2014).

Desafios e Variabilidade Espacial

A quantificação de carbono no solo enfrenta desafios relacionados à variabilidade espacial, uma vez que o solo é um sistema dinâmico e heterogêneo. Fatores como textura, composição mineral, umidade e práticas agrícolas afetam a distribuição do carbono, tornando sua análise complexa. A distribuição do carbono varia ao longo do perfil do solo, sendo mais concentrado nas camadas superiores (Soares, 2018; Zanatta et al., 2014). Além disso, as práticas de manejo, como o uso de fertilizantes e a rotação de culturas, influenciam os estoques de carbono. A falta de dados abrangentes e a variabilidade climática também complicam a análise (Silva et al., 2022). Para superar esses desafios, é necessário utilizar tecnologias avançadas, como sensoriamento remoto e modelagem computacional, que ajudam a entender melhor a variabilidade espacial e melhorar a precisão das estimativas de carbono no solo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente preocupação com as mudanças climáticas ressalta o papel essencial do solo como um dos principais aliados na mitigação dos impactos ambientais, destacando-se como o maior reservatório terrestre de carbono. As práticas agrícolas sustentáveis são ferramentas fundamentais para promover o aumento do estoque de carbono no solo. Essas práticas, além de reduzirem a liberação de gases de efeito estufa, melhoram a qualidade estrutural e química do solo, favorecem a retenção de água e reduzem a erosão, fortalecendo os sistemas agrícolas diante dos desafios climáticos.

Além disso, o estudo sobre o uso e manejo dos estoques de carbono no solo é fundamental para embasar decisões informadas que podem transformar o solo em um aliado na redução de emissões, ou, de maneira oposta, em uma fonte de GEE.

Assim, a ação humana está intrinsecamente ligada ao papel do solo nas mudanças climáticas, tornando indispensável que as práticas agrícolas sustentáveis e políticas públicas sejam priorizadas. Com isso, conclui-se que o manejo adequado do solo é mais do que uma necessidade técnica, é uma estratégia de longo prazo indispensável para mitigar os efeitos das mudanças climáticas, preservar os recursos naturais e garantir também a segurança alimentar em escala global.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Ciências Agrárias da UFSCar (CCA) - projeto FAI RTI-CCA pelo financiamento do trabalho.

REFERÊNCIAS

ADAMS, G. A. Influência de Diferentes Tipos de Plantas Sobre a Estrutura do Solo em Plantio Direto. **UFFS**: Cerro Largo, RS, 2016.

AMELUNG, W. et al. Rumo a uma estratégia de mitigação climática do solo em escala global. **Nat Commun** 11 , 5427 (2020). Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>>. Acesso em: 30 dez. 2024.

ANDRADE, R. **Aquecimento global à beira do limite crítico de 1,5 °C**. Centro de Pesquisa em Ciência, Tecnologia e Sociedade. 2023. Disponível em:<<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/noticias/noticias/460-aquecimento-global-a-beira-do-limite-critico-de-1-5-c>>. Acesso em: 26 fev. 2025.

BAEDE, A. P. M. et al. Em Climate Change 2001: The Scientific Basis; HOUGHTON, J. T. et al., eds.; **Cambridge University Press**: Cambridge, 2001, cap. 1.

BANCO BV S.A. **Carbono Neutro**: O Que é, Qual Seu Objetivo e Por Que é Importante?. 2023. Disponível em:<<https://www.bv.com.br/bv-inspira/sustabilidade/carbono-neutro>>. Acesso em: 30 dez. 2024.

BARBOZA, D. V. et al. Application Of Circular Economy In Civil. **Research, Society And Development**, [S. L.], V. 8, N. 7, P. E9871102, 2019. Disponível em:<<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/1102>>. Acesso em: 14 jan. 2025.

BATJES, N. Opções de Gestão para Reduzir as Concentrações de CO₂ na Atmosfera Através do Aumento do Sequestro de Carbono no Solo, **Centro Internacional de Referência e Informação do Solo**: Wageningen, 1999.

BBC News. O que é o Terceiro Polo, que corre o risco de derreter e afetar mais de 1 bi de pessoas. BBC. Por Alejandra Martins. **BBC News Mundo.** Publicado em 27 jan de 2021. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-55712045>>. Acesso em: 11 nov. de 2024.

BESSA, D. M. **Ciclo do carbono na floresta amazônica: percepções ambientais de moradores da Reserva Extrativista do Baixo Juruá, Amazônia Ocidental, Brasil.** 2019. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019. Disponível em: <<https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/7304>>. Acesso em: 27 fev. 2025.

BETTIOL, W. et al. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical.** Embrapa. 2023. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/587101479.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Rumo à COP30.** 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/rumo-a-cop-30>>. Acesso em: 1 mar. 2025.

CACHOLA, C. S. et al. O Papel das Políticas Públicas na Redução das Emissões Veiculares de Gases de Efeito Estufa no Estado de São Paulo. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 59, p. 418-437, 3 Jun. 2022. DOI 10.5380/dma.v59i0.76639. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/made/article/view/76639>>. Acesso em: 29 Dez. 2024.

CANZIANI, O. F. et al. O Impacto Regional das Mudanças Climáticas: Uma Avaliação da Vulnerabilidade; WATSON, R. T.; ZINYOWERA, M. C.; MOOS, R. H., eds.; **Imprensa da Universidade de Cambridge**: Cambridge, 1998.

CARDOSO, F. P. Plantio Direto: Ano 2000. **R. Agric**, 78 (1): 165 - 168, 2003.

CASTRO FILHO, C. D.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos Agregados e Sua Relação com o Teor de Carbono Orgânico num Latossolo Roxo Distrófico, em Função de Sistemas de Plantio, Rotações de Culturas e Métodos de Preparo das Amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22 (3): 527 - 538, 1998.

CERRI, C. E. P. **Artigo - Sequestro de Carbono no Solo.** ABREFEN - Associação Brasileira dos Produtores de Remineralizadores de Solo e Fertilizantes Naturais, 26 jun. 2023. Disponível em: <<https://abrefen.org.br/2023/06/26/sequestro-de-carbono-no-solo/>>. Acesso em: 25 fev. 2025

CLIMATE CHANGE ASSOCIATION. **Synthesis Report on Climate Action**, 2018. Disponível em: <<https://www.climate-chance.org/en/2018report/>>. Acesso em: 30 dez. 2024.

CORRÊA, L. B.; CABRAL, F. H. M. N.; LIMA, C. K. M. **Programa Carbono Neutro do TST/CSJT.** Conselho Nacional de Justiça, 2024. Disponível em:<<https://boaspraticas.cnj.jus.br/pratica/784>>. Acesso em: 30 dez. 2024.

DALCIN, G.; MANGINI, L. F. K.; GODOI, L.. Química Ambiental e o Impacto Ambiental Relacionado aos Gases de Efeito Estufa. **Caderno Intersaber**, Curitiba, v. 10, n. 27, p. 117-134, 20 ago. 2021. Disponível em:<<https://cadernosuninter.com/index.php/intersaber/article/view/1984>>. Acesso em: 24 fev. 2025.

DIECKOW, J. et al. Sistemas Conservacionistas de Preparo do Solo e Implicações no Ciclo do Carbono. 1. Ed. São Carlos, SP: **Embrapa Instrumentação Agropecuária**: [S. n.], 2004. 17 p. v. 12.

DULLIUS, A.; OLIVEIRA, E. R. X. de; SILVA, M. C. da; SANQUETTA, C. R. Sustentabilidade Urbana por Meio de Análise de Tecnologias Renováveis no Transporte Público da Cidade de Curitiba. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, 6(2), 73-88, 2017. Doi: 10.5585/geas.v6i2.88. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Rotação de Culturas-Paraná 2007.

EMBRAPA. **Mapa apresenta metas e tecnologias de produção sustentável para o Plano ABC+**. 2021. Disponível em:<<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/65572858/mapa-apresenta-metas-e-tecnologias-de-producao-sustentavel-para-o-plano-abc>>. Acesso em: 25 fev. 2025.

ESPÍNDOLA, J. A. A.; GUERRA, J. G.; DE ALMEIDA, D. L. **Adubação Verde**: Estratégia para uma Agricultura Sustentável. Embrapa Agrobiologia-Documents (Infoteca-E), 1997.

FAO. How the RECSOIL initiative is driving change in Costa Rica | Global Soil Partnership. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2024. Disponível em: <<https://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/en/c/1680243/>>. Acesso em: 27 fev. 2025.

_____. FAO alerta: Três quartos dos solos na América Latina e no Caribe estão em risco. **Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura**: Andrea Galdamez, 4 dez. 2024. Disponível em:<https://www.fao.org/americas/news/news-detail/suelos-en riesgo/pt>. Acesso em: 24 fev. 2025.

FARIA, V. G. **Priorização de áreas para restauração florestal visando conservar solo, água e biodiversidade em paisagens agrícolas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016. Disponível em:<<https://doi.org/10.11606/D.11.2016.tde-06042016-135928>>. Acesso em: 02 mar. 2025.

FERREIRA. Indicadores da qualidade do solo em uma cronomsequência sob sistema plantio direto em Guaíra - PR. **Ufrj.br**, 2016.

FERREIRA, P. D. S. et al. As perspectivas e divergências acerca do aquecimento global antropogênico / The perspectives and divergences about anthropogenic global warming. **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 51, p. 728, 11 out. 2017.

GATTI, L. V. et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, v. 595, n. 7867, p. 388–393, 2021. Disponível em:<<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>>. Acesso em 28 Nov. 2024.

HIGA, R. C. V. et al. Protocolo de Medição e Estimativa de Biomassa e Carbono Florestal. Documentos 266, **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, n. 1, p. 1 - 89, 1 Nov. 2014.

IBAMA. **Proconve resulta em ganhos ambientais no controle da qualidade do ar**. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 29 fev. 2024. Disponível em:<<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/2024/proconve-resulta-em-ganhos-ambientais-no-controle-da-qualidade-do-ar>>. Acesso em: 24 fev. 2025.

IPCC. **Climate Change 2023: AR6 Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2023.

_____. **Climate Change 2007**. The Physical Science Basis: contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

_____. **Working Group I** – Scientific Assesment of Climatic Change. Cambridge, Australia: Press Syndicate of University of Cambridge, 1990.

JARVIS, A.; FORSTER, P. M. Estimated human-induced warming from a linear temperature and atmospheric CO₂ relationship. **Nature Geoscience**, 11 nov. 2024.

JUNIOR, R. C.; DE ARAÚJO, A. G.; LLANILLO, R. F. Sistema Plantio Direto no Sul do Brasil: Fatores que Promoveram a Evolução do Sistema. **FAO/IAPAR**: Londrina, 2008.

KLUGE, R. A.; TEZOTTO-ULIANA, J. V.; SILVA, P. P. M. DA. Aspectos Fisiológicos e Ambientais da Fotossíntese. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 56–73, 2015

LE QUÉRÉ, C. et al. Global Carbon Budget 2018. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 2, p. 2141-2194, 2018. Disponível em:<<https://www.earth-syst-sci-data.net/10/2141/2018/essd-10-2141-2018>>. Acesso em: 28 Nov. 2024.

LUIZ, S. Frações orgânicas e atributos químicos em agregados do solo sob sistemas de plantio direto e convencional de cebola. **Ufsc.br**, 2016.

MACHADO, P. L. O. de A. Carbono do Solo e a Mitigação da Mudança Climática Global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 329–334, Mar. 2005.

MACIEL, H. M.; KHAN, A. S.; ROCHA, L. A.. **Estudo da Ecoeficiência Mundial entre os Anos de 1991 e 2012**. [s.l.] Editora Appris, 2020.

MAPA. **Plano ABC: Agricultura de Baixa Emissão de Carbono**. 2016. Disponível em:<<http://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/plano-abc-agricultura-de-baixa-emissao-de-carbono#:~:text=O%20Plano%20ABC%20Deve%20Ser,atividades%20agr%C3%ADcolas%20e%20de%20pecu%C3%A1ria>>. Acesso em: 30 dez. 2024.

_____. **Plano ABC: Resultados do Plano**. Governo Federal, 10 nov. 2023. Disponível em:<<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/plano-abc/acoes-do-plano>>. Acesso em: 24 fev. 2025

MOURA, M. S. B. et al. Aptidão climática da mangueira frente ao clima atual e aos cenários futuros. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n., p. 496-509, 30 nov. 2015. Disponível em:<https://pdfs.semanticscholar.org/d95e/a74fb83daeb54ac857a6d9f9f0a5aecd7_577.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2025.

MUZILLI, O. **Manejo da Matéria Orgânica no Sistema Plantio Direto: A Experiência no Estado do Paraná**. Informações Agronômicas, 100, 6-10, 2002.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Nota Técnica - Bases para proposta de 2a NDC para o Brasil - OC | Observatório do Clima**. 2024. Disponível em:<<https://oc.eco.br/nota-tecnica-bases-para-proposta-de-2a-ndc-para-o-brasil/>>. Acesso em: 1 mar. 2025.

PEREIRA, L. DE C. et al. Fluxo de CO₂ e os Índices de Vegetação do Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba, Piauí, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 07, p. 3585–3601, 11 dez. 2020.

PILSON, M. E. Q. **An Introduction to the Chemistry of the Sea**. Prentice Hall: Upper Saddle River, 1998.

ROCHA, H. R. et al. **As Relações entre a Vegetação e o Meio Físico no Cerrado Pé-de-Gigante**. Governo do Estado de São Paulo Secretaria do Meio Ambiente: [S. n.], 2005. 190-196 p. v. 14. Ciclo do Carbono.

RODRIGUES, M. et al. Espectroscopia no infravermelho próximo para a quantificação de carbono em solos da bacia do Acre. Aliança de Serviços de Informação Agrícola. 2016.

SALOMÃO, P. E. A. et al. A importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação do solo e restauração da matéria orgânica. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 1, p. e154911870–e154911870, 1 jan. 2020.

SAVIOLI, et al. Impactos dos meios de exploração nos atributos físicos e químicos de um latossolo argiloso na região oeste do Paraná. **Observatorio de la Economia Latinoamericana**, v. 22, n. 12, p. e8395–e8395, 29 dez. 2024.

SCHLESINGER, W. H. Biogeochemistry. An Analysis of Global Change. **Academic Press**: San Diego, 1991.

SCHOLZ, M. C. Litigância climática e a implementação das contribuições nacionalmente determinadas do Acordo de Paris pelo Brasil: uma análise a partir da abordagem ecossistêmica. **Ufsc.br**, 2020.

SENA, R.; MORGADO, E. M. G.. Desmatamento na Amazônia: Causas, Consequências e Soluções. **Revista Internacional de Ciências, Tecnologia e Sociedade**, v. 6, n. 2, p. 1-12, 30 dez. 2023. Disponível em:<<https://ricts.mundis.pt/index.php/ricts/article/view/123/50>>. Acesso em: 24 fev. 2025.

SILVA, M. A. et al. Sistema de plantio direto e rotação de culturas no Cerrado. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, p. e376111335568, 10 out. 2022.

SIMON, C. DA P. et al. Emissão de CO₂, Atributos Físicos e Carbono Orgânico Total em Diferentes Sistemas de Preparo do Solo. **Nativa**, v. 7, n. 5, p. 494–499, 12 set. 2019.

SOARES, M. F. Variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos e do carbono orgânico do solo de uma bacia hidrográfica de cabeceira em Canguçu - RS. **Ufpel.edu.br**, 2018.

SOUZA FILHO, W. **Intensidade de emissão de gases de efeito estufa e potencial de aquecimento global em um sistema integrado de produção agropecuária no subtrópico brasileiro**. 2017. 122 f. Tese (Doutorado) - Curso de Zootecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SOUZA, M. C. O.; CORAZZA, R. I.. Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 42, 2017. DOI: 10.5380/dma.v42i0.51298. Disponível em:<<https://revistas.ufpr.br/made/article/view/51298>>. Acesso em: 27 fev. 2025.

STUMPF, L. Desenvolvimento radicular de gramíneas perenes e sua eficiência na recuperação de atributos físicos de um solo construído compactado em área de mineração de carvão. **Ufpel.edu.br**, 2015.

SWIFT, R. S. **Ciência do Solo**. 2001, 166, 858.

TELLES, T. S. et al. TD 2638 - Desenvolvimento da Agricultura de Baixo Carbono no Brasil. **Texto para Discussão**, p. 1–41, 31 mar. 2021.

TSAI, D. et al. **Análise das Emissões de Gases de Efeito Estufa e Suas Implicações para as Metas Climáticas do Brasil 1970-2023**. SEEG. 2024. Disponível em:<<https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>>. Acesso em: 24 Fev. 2025.

TRIBUNAL SUPERIOR DO TRABALHO. **Programa Carbono Neutro do TST é referência em sustentabilidade no Poder Judiciário**. TST: Flávia Félix, 8 nov. 2024. Disponível em:<[https://tst.jus.br/-/programa-carbono-neutro-do-tst-%C3%A9-refer%C3%A7%C3%A3o-em-sustentabilidade-no-poder-judici%C3%A1rio#:~:text=Na%20ter%C3%A7a%2Dfeira%20\(5%2Ftotal%20de%20carbono%20at%C3%A9%202030](https://tst.jus.br/-/programa-carbono-neutro-do-tst-%C3%A9-refer%C3%A7%C3%A3o-em-sustentabilidade-no-poder-judici%C3%A1rio#:~:text=Na%20ter%C3%A7a%2Dfeira%20(5%2Ftotal%20de%20carbono%20at%C3%A9%202030)>. Acesso em: 24 fev. 2025.

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). **Cities, Towns, Regions Partner to Help Achieve Paris Goals**. 2016. Disponível em:<<https://unfccc.int/news/cities-towns-regions-partner-to-achieve-paris-goals>>. Acesso em: 30 Dez. 2024.

WATSON, R. T. et al. Land Use, Land-Use Change and Forestry: A Special Report of the IPCC. **Cambridge University Press**: Cambridge, 2000.

ZANATTA, J. A. et al. Protocolo para Medição de Fluxos de Gases de Efeito Estufa do Solo. Documentos 265, **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, n. 1, p. 1 - 81, 1 Nov. 2014.

ZHENG, G. et al. Increasing risk of glacial lake outburst floods from future Third Pole deglaciation, 2021. **Nature Climate Change**, 11(5), 411-417. Disponível em:<<https://doi.org/10.1038/s41558-021-01028-3>>. Acesso em 12 jan. 2025.

ZOMER, R. J. et al. Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, 2017. Disponível em:<<https://doi.org/10.1038/s41598-017-15794-8>>. Acesso em 12 jan. 2025.

ZOSO, C. U. et al. Rapid Loss of Complex Polymers and Pyrogenic Carbon in Subsoils under Whole-Soil Warming. **Nature Geoscience**, v. 16, p. 344–348, 2023.