

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Meio-Norte
Ministério da Agricultura e Pecuária*

SAÚDE DO SOLO

EM AGROECOSSISTEMAS DA ZONA DE
TRANSIÇÃO CERRADO-CAATINGA

*Luiz Fernando Carvalho Leite
Henrique Antunes de Souza*

Editores técnicos

Embrapa
Brasília, DF
2026

Embrapa

Parque Estação Biológica
Av. W3 Norte (final)
70770-901 Brasília, DF
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Responsável pelo conteúdo e editoração

Embrapa Meio-Norte
Av. Duque de Caxias, 5.650, Bairro Buenos Aires
Caixa Postal 01, 64008-780 Teresina, PI
www.embrapa.br/meio-norte

Comitê Local de Publicações

Presidente: *José Almeida Pereira*

Secretária-executiva: *Edna Maria Sousa Lima*

Membros: *Orlane da Silva Maia, Maria Eugênia Ribeiro, Kaesel Jackson Damasceno e Silva, Ligia Maria Rolim Bandeira, Alexandre Kemenes, Ana Lúcia Horta Barreto, Carlos Antônio Ferreira de Sousa, Carlos César Pereira Nogueira, Francisco de Brito Melo, Ricardo Montalvan Del Aguila, Robério dos Santos Sobreira, Sérgio Luiz de Oliveira Vilela e Valdemir Queiroz de Oliveira*

Edição executiva: *Ligia Maria Rolim Bandeira*

Revisão de texto: *Francisco de Assis David da Silva*

Foto da capa: *Luiz Fernando Carvalho Leite*

Diagramação: *Jorimá Marques Ferreira*

1ª edição

Publicação digital (2026): PDF

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

Embrapa Meio-Norte

Saúde do solo em agroecossistemas da zona de transição Cerrado-Caatinga / Luiz Fernando Carvalho Leite, Henrique Antunes de Souza, editores técnicos. – Brasília, DF : Embrapa, 2026.
PDF (365 p.) : il. color.

ISBN 978-65-5467-171-2

1. Agricultura Sustentável. 2. Tratamento do Solo 3. Manejo do Solo 4. Agroecossistema. 5. Cerrado. 6. Caatinga. I. Leite, Luiz Fernando Carvalho. II. Souza, Henrique Antunes de. III. Embrapa Meio-Norte.

CDD (21. ed.) 631.45

Orlane da Silva Maia (CRB-3/915)

© 2026 Embrapa

Capítulo 10

Manejo sustentável do solo como oportunidade para pagamento por serviços ambientais no Meio-Norte brasileiro

*Edvaldo Sagrilo
Andreza Pereira da Silva Cruz
Hosana Aguiar Freitas de Andrade
Daiane Conceição de Sousa
Henrique Antunes de Souza*

Introdução

O manejo sustentável do solo é essencial para garantir a produtividade agrícola a longo prazo e, ao mesmo tempo, minimizar os impactos sobre os ecossistemas, principalmente em áreas de fronteira agrícola que estão mais vulneráveis à degradação ambiental. A região do Meio-Norte do Brasil, que compreende os estados do Maranhão e do Piauí, passou a integrar uma importante fronteira agrícola denominada MATOPIBA (região que engloba o Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia). A expansão do agronegócio nesta região ocorreu por uma combinação de fatores edafoclimáticos, logísticos, políticos e econômicos, como a alta valorização e a demanda global por commodities agrícolas frente à preocupação de um cenário futuro de insegurança alimentar.

Embora a expansão agrícola na região Meio-Norte contribua com o fortalecimento do Brasil como *player* global no agronegócio, é imprescindível que os agricultores substituam as práticas convencionais por práticas conservacionistas – alinhadas com a mitigação da emissão de gases do efeito estufa – como a adoção do plantio direto, consórcio, rotação de culturas e sistemas de produção integrados. O protagonismo brasileiro no enfretamento das mudanças climáticas não se fundamenta somente na importância da preservação dos recursos da biodiversidade, mas o posiciona como líder global e proporciona vantagens estratégicas de longo prazo, como acesso a financiamentos e investimentos mundiais. Portanto, é importante incentivar o manejo sustentável do solo como reservatório de carbono.

No entanto, ainda há inúmeros empecilhos que limitam a adoção de práticas conservacionistas pelos agricultores. Algumas práticas exigem investimentos iniciais elevados, há baixa assistência técnica qualificada e escassez de políticas públicas ou mercado ainda pouco estruturado que valorize práticas de sustentabilidade nas propriedades rurais por meio de pagamentos por serviços ambientais. Este, por sua vez, consiste em uma ferramenta econômica que incentiva práticas sustentáveis no campo, reconhecendo quem as pratica como provedores de serviços ambientais. No entanto, a obtenção deste benefício apresenta vários fatores limitantes que dificultam o seu acesso por produtores rurais, inclusive aqueles que já adotam práticas conservacionistas.

Neste capítulo, são abordadas a relevância do manejo do solo como reservatório/dreno de carbono e as oportunidades estratégicas que possibilitem a busca de acesso a fundos de investimento ambiental. São também discutidos aspectos que possibilitem uma melhor compreensão dos desafios e oportunidades associados ao mercado de carbono.

Os solos como reservatório de carbono

Estima-se, que globalmente, a camada superficial de 1 m de espessura comporte um estoque de carbono orgânico do solo (COS) de aproximadamente 1.500 a 2.400 gigatoneladas (Gt), o que equivale a 5.500 a 8.800 Gt de dióxido de carbono (CO₂) (Batjes, 1996; Sanderman et al., 2017). Dentro dessa faixa de valores, a estimativa mais conservadora (1.500 Gt C) é aproximadamente três vezes maior que o estoque global total de carbono (C) contido na vegetação (450-650 Gt de CO₂), cerca de duas vezes maior que o estoque de C presente na atmosfera (829 Gt de CO₂) (Smith, 2012) e cerca de 160 vezes maior que a taxa anual corrente de emissões antropogênicas de CO₂ (Friedlingstein et al., 2022). Nessa mesma camada de 1 m de profundidade, os estoques de COS podem variar de 30 Mg ha⁻¹ em regiões de climas áridos a 800 Mg ha⁻¹ em regiões de climas frios, embora na maioria dos ambientes os estoques variem de 50 a 150 Mg ha⁻¹ (Lal, 2004).

O reservatório de COS representa um equilíbrio dinâmico entre ganhos e perdas e, devido aos grandes volumes envolvidos, qualquer mudança sutil nos estoques de COS pode ter impactos substanciais na concentração atmosférica de C, com reflexos nas mudanças climáticas. Com o advento da agricultura, estima-se que as perdas históricas de COS decorrentes do manejo do solo tenham sido de, aproximadamente, 140 a 150 Gt C (510 a 550 Gt CO₂) (Sanderman et al., 2017). Atualmente, embora a atividade agrícola seja responsável por promover serviços ambientais críticos e relevantes para a sociedade como um todo (Sykes et al., 2020), tais como, sequestro de carbono e conservação da água, é também responsável por contribuir para as mudanças climáticas, respondendo por 23% das emissões globais de gases de efeito estufa (IPCC, 2019). As mudanças no uso e cobertura do solo são, por consenso, a segunda maior fonte de emissão de CO₂ para a atmosfera, inferiores apenas às emissões pela queima de combustíveis fósseis (Scharlemann et al., 2014).

Estima-se que, desde 1990, 16,4 Gt de CO₂ tenham sido emitidas para atmosfera devido à atividade agropecuária no Brasil (SEEG, 2024). A conversão de ecossistemas naturais para áreas

agrícolas pode levar à perda de 75% ou mais dos estoques de COS em áreas tropicais (Lal, 2004). Entretanto, a adoção de práticas de manejo conservacionistas pode restaurar pelo menos parte do carbono perdido (Lal et al., 2018), por meio de diferentes componentes vegetais capazes de aumentar o aporte de serapilheira na superfície do solo e o volume de raízes no perfil do solo (Freitas et al., 2020). Dessa forma, é necessário adotar ações que fomentem boas práticas agrícolas para mitigar o impacto das mudanças climáticas por meio da redução dos gases de efeito estufa (GEE), sequestro de carbono no solo e construção de resiliência contra impactos climáticos hoje já considerados inevitáveis (Lal, 2004). Emissões líquidas neutras ou negativas de CO_2 são alcançadas, quando as emissões antropogênicas são contrabalanceadas ou superadas pelas remoções antropogênicas de CO_2 . Nesse contexto, o sequestro de COS por meio da atividade agropecuária sustentável pode ser considerado uma estratégia para promover emissões negativas de CO_2 , com consequente redução de GEE da atmosfera (Smith, 2016).

Benefícios do sequestro de COS

O solo fornece a base principal para a subsistência e o bem-estar humano, incluindo o suprimento de alimento, a água e múltiplos outros serviços ambientais (IPCC, 2019). Os serviços ambientais favorecidos pelo aumento do COS se devem ao aumento da fertilidade, melhoria da conservação da umidade e disponibilidade de água para as plantas (Halldorsson et al., 2015; Paustian et al., 2019), redução da erosão e melhoria do habitat para vários níveis da biodiversidade (Griscom et al., 2017). O esgotamento severo dos estoques de COS reduz a capacidade do solo de produzir biomassa, diminui o potencial produtivo das culturas, aumenta os riscos de insegurança alimentar devido às mudanças climáticas e degrada a qualidade do solo e da água, impactando diretamente no provimento dos serviços ambientais.

Entretanto, os benefícios do sequestro de COS vão além dos seus efeitos na qualidade do solo e dos processos dela decorrentes.

Estima-se que o potencial global de sequestro anual de COS em solos minerais seja de aproximadamente 0,4 a 8,6 Gt de CO_2 equivalente ($\text{CO}_{2\text{-eq}}$), dependendo das práticas de manejo adotadas (IPCC, 2019). Esse potencial de dreno equivale a até 66% das perdas históricas de C (Lal, 2004), o que tem suscitado expectativas quanto à possibilidade de incluir o sequestro de COS em iniciativas globais para mitigação e adaptação às mudanças climáticas, tais como, o “4p1000”. Essa iniciativa preconiza que um aumento anual nos estoques permanentes de COS em 0,4% teria o potencial de contrabalançar o atual aumento de CO_2 atmosférico (Rumpel et al., 2020). A iniciativa fornece uma plataforma colaborativa para que formuladores de políticas, profissionais, cientistas e partes interessadas se envolvam na busca de soluções para conter as emissões de GEE (Soussana et al., 2019).

Um aspecto que vem norteadando grande parte dos debates sobre iniciativas para incentivar a mitigação das emissões de GEE a partir da atividade agrícola, diz respeito à possibilidade de compensações financeiras pelo sequestro de carbono no solo e, consequentemente, pelo provimento de serviços ambientais. Essas compensações podem ocorrer de duas formas principais: 1) pagamento por créditos de carbono estocado no solo e confirmado por protocolos de quantificação; 2) acesso a linhas de crédito com condições especiais para produtores que adotem sistemas de produção reconhecidamente conservacionistas.

Créditos de carbono: conceito e mercado

O conceito de créditos de carbono está relacionado à possibilidade de remover carbono da atmosfera na forma de CO_2 ou de evitar a sua emissão ou de outros gases causadores de efeito estufa, tais como, o CH_4 (metano) e o N_2O (óxido nitroso). As principais formas de evitar emissões de GEE incluem, além de mudanças no manejo do solo, a conservação de florestas nativas e o uso racional de fertilizantes nitrogenados. Um crédito de carbono equivale a 1 t de CO_2 removido da atmosfera ou a quantidade equivalente ($\text{CO}_{2\text{-eq}}$) de outro GEE (Oldfield et al., 2022).

Para fins de comparação, o potencial estimado de aquecimento global gerado pelo CH_4 e pelo N_2O equivale a 28 e 265 vezes, respectivamente, o efeito de uma molécula de CO_2 , com efeitos ambientais que perduram por 100 anos (IPCC, 2014). O uso de fertilizantes nitrogenados pode aumentar o aporte de matéria orgânica no solo pelo aumento da produtividade das plantas, no entanto, aumenta também as emissões de N_2O (Lugato et al., 2018). Por outro lado, a aplicação de compostos orgânicos pode aumentar o aporte de matéria orgânica no solo e reduzir as emissões de N_2O , mas, em contrapartida, pode contribuir para maiores emissões de CH_4 (Rahman et al., 2019).

Globalmente, algumas nações adotam uma abordagem contrastante por promoverem o desincentivo financeiro a atividades emissoras de GEE. Essas nações atribuem um valor financeiro tangível a uma unidade de CO_2 , o que permite a aplicação de cobranças (impostos especializados) aos emissores de GEE, com o intuito de desencorajar a atividade poluidora e/ou encorajar a eficiência operacional que possibilite a redução dessas emissões (Keenor et al., 2021). Sob outra perspectiva, surge o mercado de créditos de carbono a partir de uma iniciativa internacional com foco na proteção ambiental, buscando incentivar empresas e organizações a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa, com o intuito de estimular ações concretas para mitigar o aquecimento global.

A exploração do mercado de créditos de carbono permite que empresas vinculadas à indústria ou ao setor agropecuário primário sejam estimuladas a reduzir sua pegada de carbono e se tornem mais sustentáveis, por meio da adoção de práticas que mitiguem as emissões dos GEE. Por outro lado, empresas que, por qualquer razão, estejam impossibilitadas de reduzir suas emissões devido, por exemplo, à natureza de suas atividades, podem pagar para outros entes, como os agricultores, para que estes reduzam suas emissões ou estoquem carbono no solo. Esse processo deu origem ao que se chama de mercado voluntário de carbono, o qual já está em funcionamento em alguns países.

A rápida expansão do mercado voluntário de carbono tem sido evidenciada, mundialmente, pelo grande número de registros de créditos de

carbono e por companhias privadas que, recentemente, têm publicado resultados de mensurações, relatórios e protocolos de verificação. Estes, por sua vez, têm sido usados para viabilizar o pagamento a agricultores, para que estes sequestram carbono em suas áreas agrícolas como estratégia de mitigação das mudanças climáticas (Oldfield et al., 2022).

A agricultura é uma das poucas cadeias que consegue sequestrar carbono da atmosfera, desde que sejam adotadas boas práticas capazes de incorporar carbono ao solo. Com isso, várias entidades (por exemplo, US Department of Agriculture e EU Common Agricultural Policy) não só têm explorado, mas também lançado programas para gerar créditos de carbono agrícola, devido ao potencial de práticas agrícolas conservacionistas, tais como, culturas de cobertura e plantio direto, na redução das emissões de GEE e no sequestro de carbono no solo (Paustian et al., 2016). Todavia, a adoção de práticas conservacionistas pelos agricultores como forma de mitigação de GEE pode ser limitada pela falta de incentivos financeiros (Jantke et al., 2020).

Embora mundialmente as ações voltadas aos créditos de carbono estejam atreladas ao mercado voluntário, há uma necessidade premente de criação de um mercado regulado de carbono, o que possibilitaria a venda de créditos de carbono para países signatários de iniciativas internacionais e que, portanto, precisam cumprir metas obrigatórias de redução de emissão. Devido à aptidão agrícola do Brasil e à grande extensão de áreas que podem vir a ser incorporadas a modelos sustentáveis de produção agrícola, o País pode tornar-se um exportador de créditos de carbono, podendo gerar cerca de US\$ 100 bilhões até 2030 (CNA, 2022).

Apesar das oportunidades que a atividade representa, há ainda inúmeros obstáculos a serem vencidos e o processo de formalização desse mercado no Brasil vem sendo discutido e amadurecido de forma lenta ao longo dos anos. Em cada país, o mercado de carbono é regulado por uma legislação. No Brasil, a regulamentação é feita pelo Decreto nº 5.882, de 31 de agosto de 2006. Esse decreto trata, entre outros processos, da preparação e validação dos Documentos de Concepção de Projeto, registro, monitoramento e certificação das Redu-

ções de Emissões, além da comercialização dos créditos de carbono. Em dezembro de 2009, foi instituída a Lei Nº 12.187, que definiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima. Entre outros aspectos, a lei visa ao estímulo do mercado brasileiro de redução de emissões e apresenta como um de seus instrumentos o estabelecimento de padrões ambientais e de metas quantificáveis e verificáveis para a redução de emissões antrópicas por fontes e para as remoções antrópicas por sumidouros de gases de efeito estufa.

Em junho de 2023, foi estabelecido o Decreto Nº 11.550, que visa definir diretrizes e elaborar propostas para mecanismos econômicos e financeiros a serem adotados para viabilizar a implementação das estratégias integrantes das políticas relativas à mudança do clima. Por fim, em outubro de 2023, foi aprovado o projeto de lei 412/2022, que regulamenta o mercado de carbono e cria o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). O SBCE estabelece limites de emissões de gases do efeito estufa (10 mil toneladas de CO₂ por ano), além de prever a obrigação de redução de emissões para operadores que controlem fontes ou instalações que emitirem acima de 25 mil toneladas de CO₂ por ano. As companhias com obrigações de redução podem comprovar o cumprimento da obrigação por meio da devolução das cotas que lhes serão alocadas ou pela compra de créditos de carbono (Brasil, 2023).

Não obstante os avanços nas discussões e esforços para regulamentação do setor, o mercado regulado de carbono ainda não está estabelecido no Brasil. Entretanto, uma das medidas concretas resultantes desse processo inicial foi o Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC), que visa promover a ampliação da adoção de tecnologias agropecuárias sustentáveis com alto potencial de mitigação das emissões de gases do efeito estufa. A primeira fase desse plano vigorou entre 2010 e 2020, disseminando técnicas como plantio direto, recuperação de pastagens degradadas, tratamento de dejetos animais, sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), florestas plantadas e bioinsumos.

Apesar do sucesso, o Plano ABC não tratava da compensação financeira direta aos produtores pelo sequestro de carbono ou redução das emissões de GEE. Estima-se que, ao final de seu período de vigência, mais de 50 milhões de hectares tenham sido incorporados a processos de produção sustentáveis (Brasil, 2021), recomendados a partir de dados científicos robustos e interação com o setor produtivo.

Acesso a benefícios financeiros por práticas conservacionistas

Apesar do potencial do Brasil para materializar benefícios financeiros efetivos pela geração de créditos de carbono ou serviços ambientais, as experiências concretas ainda são limitadas. O produtor rural ainda não tem acesso a esse mercado, mesmo sendo o maior potencial sequestrador de COS. Além disso, nem sempre os benefícios concedidos se materializam na forma de pagamentos efetivos, por exemplo, pelo sequestro de carbono no solo ou pela prevenção das emissões de GEE. Atualmente, existem algumas modalidades de créditos subsidiados em curso no País, como as linhas de crédito do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), associadas ao Programa ABC+¹, Pronamp² e Pronaf Bioeconomia³.

Com o fim da vigência do Plano ABC no período 2010-2020, uma nova etapa do programa (Plano ABC+) foi lançada em 2021 (Brasil, 2021). Essa nova etapa do plano preconiza a continuação de sua política setorial para enfrentamento da mudança do clima no setor agropecuário no período de 2020 a 2030 e busca ampliar a adoção de sistemas de produção sustentáveis em 72,68 milhões de hectares. O plano foca na eficiência do uso de recursos disponíveis (solo, água e biodiversidade) como alicerce para o aumento da produção e da produtividade, fundamentado em bases científicas.

¹Segunda etapa do Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono – Ministério da Agricultura e Pecuária

²Programa Nacional de Apoio ao Médio Produtor Rural

³Programa Nacional de Agricultura Familiar voltado à Bioeconomia

Muito embora o Plano ABC+ contemple em seu plano operacional o estímulo ao pagamento por serviços ambientais pela adoção de diversos sistemas de produção sustentáveis preconizados em seu portfólio, seu maior incentivo financeiro não consiste em “premiar” produtores que já adotam tais sistemas e que têm conseguido estocar carbono em seus solos, mas sim em estimular a concessão de linhas de crédito especiais para produtores dispostos a adotar esses sistemas de produção sustentáveis. Dessa forma, a estratégia principal é fomentar a adoção de práticas conservacionistas pelos produtores, utilizando os benefícios de linhas de crédito diferenciadas como forma de reduzir a resistência desses produtores à sua adoção.

A linha de crédito vinculada ao plano é disponibilizada pelo BNDES e condicionada à elaboração de projetos de fomento agrícola que incorporem tecnologias de produção sustentáveis. Também estimula seguradoras a considerar menor risco de perdas na contratação de seguro rural. Porém, esse aspecto ainda é pouco explorado e precisa de métricas mais claras (por exemplo, indicadores econômicos mais bem-definidos, maiores rendimentos agrícolas e, principalmente, menores riscos climáticos), para que as seguradoras compreendam melhor a oportunidade e repassem o benefício ao produtor.

No entanto, para obtenção do crédito, o projeto técnico precisa ser analisado pelo banco, o que exige analistas/agentes financeiros com habilidade para verificar a adequação de critérios técnicos. Precisa também de assistência técnica qualificada para a elaboração dos projetos. Essas exigências constituem alguns dos principais gargalos à consolidação de projetos técnicos que atendam aos critérios para elegibilidade e acesso às linhas de crédito. A carência de competências, tanto de agentes bancários, quanto de agentes de assistência técnica, torna-se ainda mais grave em locais com histórico recente de expansão da atividade agropecuária extensiva, sobretudo em regiões de fronteira agrícola como o MATOPIBA (acrônimo que denomina a região que compreende os estados do Maranhão, do Tocantins, do Piauí e da Bahia), a qual atualmente já responde por um quarto da área de cultivo de soja no Cerrado e que conta com projeções de crescimento ainda maiores para as próximas décadas (Soterroni et

al., 2019). Relatos recentes de produtores do leste maranhense, que adotam práticas de manejo sustentáveis, tais como, sistemas ILPF, plantio direto e uso de bioinsumos, são de que há grandes dificuldades de acessar linhas de crédito com condições especiais vinculadas ao Plano ABC+, sobretudo devido à falta de informação qualificada, motivada pela carência de profissionais capazes de orientar precisamente sobre os processos para acessarem tais benefícios.

As dificuldades para acesso a linhas de crédito subsidiado do governo têm sido motivo de preocupação e têm incitado iniciativas de discussões por parte de algumas instituições nacionais e internacionais envolvidas com o tema. Por exemplo, a agência de cooperação alemã Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, em parceria com a Associação Rede ILPF e com a Conservação Estratégica (CSF), está promovendo diversos diálogos entre produtores e instituições financeiras do leste maranhense, além de buscar especialistas em projetos técnicos para quebrar as barreiras existentes dos dois lados e destravar o acesso a crédito mais barato para patrocinar reformas sustentáveis nas propriedades rurais, regularização ambiental, projetos de energia renovável, entre outros.

Há necessidade de investimento maior na capacitação, tanto de agentes bancários quanto de produtores, para melhor compreensão sobre documentos exigidos e prazos. Em muitos casos, o produtor que busca investir em práticas sustentáveis, acessa um crédito com o mesmo custo de um produtor que mantém práticas não conservacionistas. Dessa forma, apesar dos inúmeros benefícios reconhecidos pela adoção de práticas conservacionistas, a presença de um incentivo financeiro como o acesso ao crédito pode ser um fator estimulante para o produtor investir na sustentabilidade do seu negócio

Recentemente, têm surgido outras iniciativas de pagamento por serviços ambientais, tais como, as CPR Verdes e os CRA Verdes. A CPR Verde é um instrumento regulamentado pelo Decreto N°10.828/21 e consiste de um título que materializa um acordo para que os produtores rurais comercializem “serviços ambientais”, especificamente associados à atividade de conservação ou formação de florestas na-

tivas e seus biomas por meio de uma CPR própria (Brasil, 2021). A CPR Verde tem origem na Cédula de Produtor Rural (CPR), que foi criada em 2004 pela Lei N°. 8.929 e possibilita ao produtor financiar sua safra, dando como garantia de pagamento o resultado futuro de sua produção agrícola. A CPR Verde permite o pagamento por serviços ambientais prestados pelo produtor rural que deixa de desmatar áreas com floresta nativa para a expansão da atividade agrícola. Nesse caso, em vez de se comprometer em entregar o resultado da produção agropecuária como pagamento do financiamento recebido para o investimento na produção, o produtor poderá usar, como lastro para emissão do financiamento, áreas de florestas nativas preservadas no próprio imóvel rural.

Embora seja um instrumento financeiro recente e, portanto, passível de ajustes ou mudanças, a CPR Verde pode ser acessada por produtores rurais, associações e cooperativas. No entanto, o seu processo de emissão deve ser acompanhado de certificação feita por auditoria externa ou terceira parte, indicando e especificando os produtos rurais que a lastreiam. Há exemplos de produtores rurais no Brasil que acessaram o benefício junto ao Banco do Brasil (BB CPR Preservação), a partir de certificação externa da terceira parte Global Certification System (GCS), concedida com base em relatório de auditoria de sustentabilidade realizado pela CS Ambiental (<https://cprverde-certificacao.com.br/>).

O CRA (Certificado de Recebíveis do Agronegócio) Verde faz parte do conceito de *green bonds* ou títulos “verdes”, que são títulos de dívida com as mesmas características de um título de dívida comum (Tuca et al., 2019). A única particularidade é que os recursos captados pela emissão devem ser destinados, exclusivamente, ao financiamento ou refinanciamento de projetos considerados benéficos, ou não poluentes, ao meio ambiente. O CRA Verde distingue-se, portanto, de um CRA ordinário em função da destinação de recursos, que necessariamente deverão ser alocados para uma atividade que seja alinhada com padrões de sustentabilidade ambiental.

Em março de 2021, sete produtores rurais de Mato Grosso e de Mato Grosso do Sul se tornaram pioneiros ao se lançarem no mercado de títulos verdes e captarem mais de R\$ 63 milhões para financiarem suas atividades agrícolas e promoverem a preservação ambiental. Essa foi a primeira emissão pulverizada do gênero, reunindo produtores rurais sem ligação com um grupo agroindustrial. Esse tipo de ação está ampliando-se no País, no entanto, há dependência da iniciativa de grandes produtores, ou da união de produtores pequenos e médios, de modo a gerar uma dívida que valha a pena ser comprada pelo mercado.

Desafios para efetivação de pagamentos por créditos de carbono na agricultura

Para garantir o seu sucesso em longo prazo, o mercado de carbono na agricultura precisa ser baseado em dados rastreáveis, para que haja confiança nas reduções das emissões. Essa confiança requer protocolos-padrão rigorosos e transparentes para a mitigação das emissões de GEE e sequestro de CO₂, como forma de gerar créditos de carbono de elevada qualidade, definidos a partir de uma linha de base realista (Hammond et al., 2021). Além disso, os protocolos para medições e verificações devem garantir aspectos-chave do sequestro de carbono, como a aditividade e permanência. Discrepâncias entre esses protocolos podem resultar na criação de processos de quantificação de créditos não equivalentes, os quais poderiam minar a confiança na integridade dos programas de pagamentos por esses créditos (Oldfield et al., 2022) e impedir sua transferência, por exemplo, entre países com critérios diferentes de quantificação. Portanto, o pagamento por crédito de carbono exige amostragem, preparação, cálculo e entrega de informações precisas sobre atividades agrícolas relevantes para mitigação de GEE (Jantke et al., 2020).

Um aspecto que permeia as discussões sobre a definição ou unificação de protocolos de quantificação de créditos de carbono, diz respeito às metodologias para a quantificação de carbono estocado no

solo e as dificuldades e limitações associadas. Medições precisas dos estoques de COS dependem fortemente do estabelecimento de uma linha de base prévia, definida antes que determinada prática de manejo conservacionista do solo tenha sido implementada. De modo geral, a definição dessa linha de base é feita a partir de amostragens físicas e medições dos estoques de carbono orgânico nos solos (Smith et al., 2020). Entretanto, a precisa quantificação das alterações nas emissões de GEE ao longo do tempo se torna mais difícil devido ao desafio de quantificar as mudanças nos estoques de COS (Oldfield et al., 2022).

As abordagens utilizadas nos principais protocolos atualmente disponíveis para quantificação dos estoques de COS incluem medições diretas com base em amostragem e medições indiretas, tais como, sensoriamento remoto, estimativas a partir de modelos baseados em processos ou modelos empíricos, além de abordagens híbridas que combinam medições diretas e modelagem (Oldfield et al., 2022). Apesar do avanço tecnológico, a medição direta ainda demanda um número de amostras grande o suficiente para estimar o COS com precisão, de modo que mudanças no estoque de COS sejam detectáveis. No entanto, a amostragem em uma grande área requer tempo e torna o método oneroso, o que limita o número de amostras que podem ser efetivamente coletadas e analisadas (Nayak et al., 2019).

Outro aspecto que merece destaque é a variação vertical do COS de acordo com as práticas de manejo. Para uma estimativa adequada dos estoques de COS, há recomendações de se considerar uma camada de pelo menos 100 cm de profundidade para coleta de amostras de solo (Cerri et al., 2013). Esse processo implica a necessidade de abertura de trincheiras, o que torna a medição direta de COS por amostragem um processo inviável a ser adotado em larga escala ou em escala de paisagem (Figura 1). Além disso, essas medições dificultam a identificação de mudanças de curto prazo nos estoques de COS e no fluxo de GEE e, portanto, podem levar períodos de tempo longos (5 a 10 anos) para evidenciar os resultados (Hammond et al., 2021), com consequentes atrasos nos pagamentos aos produtores.



Fotos: Edvaldo Sagrilo

Figura 1. Método direto de amostragem de solo em campo para determinação de estoques de COS na camada de 100 cm de profundidade.

Como exemplo, as medições diretas de estoques de COS por amostragem do solo em campo consideram a concentração de COS determinada em laboratório, comumente baseada no método “Walkley-Black” e na densidade do solo em determinada profundidade. Embora o método clássico “Walkley-Black” seja ainda bastante utilizado, esse método está progressivamente em desuso por apresentar incertezas e limitações (Senesi; Senesi, 2016). Como consequência, o método clássico está sendo substituído por novos métodos, como analisadores elementares e técnicas espectroscópicas. Esses métodos permitem reduzir o número de operações realizadas e são, portanto, mais rápidos, além de precisos, econômicos e ecologicamente corretos, uma vez que seu uso não produz resíduos (Tavares et al., 2022).

Métodos indiretos como os modelos biogeoquímicos não demandam amostragens intensivas, são mais baratos e possibilitam a quantificação de mudanças que podem gerar o pagamento por créditos de carbono anualmente. Entretanto, o uso exclusivo desses modelos produz créditos de baixa qualidade, uma vez que não geram estimativas precisas, especialmente em pequena escala, como em propriedades rurais (Tonitto et al., 2018). Isso se deve a discrepâncias entre o tipo de modelo e os *inputs* utilizados, bem como, à parametrização dos dados e à resolução espacial do

modelo (Scharlemann et al., 2014). Esses modelos, portanto, não estão ancorados na realidade de sistemas de produção utilizados em nível de fazenda e seu uso em escala regional pode ajudar a reduzir incertezas normalmente observadas em nível de campo agrícola (Oldfield et al., 2022).

Além dos desafios relacionados à quantificação dos estoques de COS decorrentes da adoção de sistemas de manejo do solo, outra limitação diz respeito às emissões de outros GEE, como o N_2O e o CH_4 . Práticas de manejo conservacionistas do solo promovem aumentos dos estoques de COS, o que pode aumentar também a capacidade do solo de oxidar CH_4 . Mas, em contrapartida, isso pode resultar no aumento da síntese e das emissões de N_2O , mitigando os benefícios dos manejos conservacionistas (Lal, 2004). Portanto, programas de crédito de carbono baseados nos incrementos dos estoques de COS ou na redução das emissões de CO_2 devem também atentar para potenciais incrementos dos outros GEE potenciais, especialmente N_2O e CH_4 (Oldfield et al., 2022).

Os solos agrícolas podem ser bastante heterogêneos em escala de propriedade rural e região e as suas propriedades podem variar significativamente tanto no espaço como no tempo (Wuest, 2014). Uma vez sequestrado, o carbono permanecerá no solo enquanto as práticas de manejo sustentáveis responsáveis pelo seu sequestro continuarem sendo adotadas (Lal, 2004). Por outro lado, o processo de sequestro de carbono também é reversível e quando essas práticas são descontinuadas, o carbono estocado pode ser perdido novamente para a atmosfera na forma de CO_2 . Dessa forma, as práticas de manejo sustentáveis do solo devem ser mantidas após novo equilíbrio no sequestro de carbono ser atingido (Smith, 2012).

Embora em curto prazo seja possível observar aumento no estoque de COS, pode ser necessário passar séculos para que o estoque de C atinja um estado de equilíbrio (Mayer et al., 2020). Assim, quando as práticas de manejo conservacionistas não são mantidas ao longo do tempo, aumentam as incertezas quanto aos

prazos necessários para repetir o processo de mensuração, como forma de monitorar mudanças nas quantidades de carbono sequestrado (Rumpel et al., 2020). Por esse motivo, o processo de quantificação e pagamento por créditos de carbono deve considerar, entre outros aspectos, a proteção contra eventuais perdas de COS causadas por mudanças nas práticas de manejo do solo e deve ter garantias da manutenção dos estoques de carbono sequestrado ao longo de determinados períodos de tempo, comumente definidos como 100 anos (Oldfield et al., 2022).

Sistemas sustentáveis no Meio-Norte e oportunidades de compensação por serviços ambientais

No mundo, a maioria dos programas voltados ao pagamento por créditos de carbono foi lançada entre 2019 e 2022. Entretanto, estimativas recentes (Oldfield et al., 2022) sugerem que ainda levará em torno de 5 anos para que se possa avaliar empiricamente “se” e “quanto” carbono será efetivamente sequestrado, com base nas amostragens iniciais dos projetos implementados. Estima-se também que esse será o tempo necessário para que os protocolos estejam devidamente padronizados e que o processo de certificação e pagamento por créditos de carbono possa ser efetivamente e amplamente implementado.

A pesquisa em solos tem um papel essencial em todo esse processo, uma vez que, independentemente das modalidades de pagamentos por serviços ambientais, a definição dos protocolos é amparada por critérios científicos que garantem a exatidão na quantificação dos estoques de COS e emissões de GEE. O Brasil figura entre os cinco países com maiores estoques de COS (FAO, 2018) e entre os sete países com maior potencial de sequestrar carbono em solos agrícolas pelos próximos 20 anos (Crump, 2017). Entretanto, para que esse potencial se consolide, o desenvolvimento de sistemas de produção sustentáveis, sobretudo para regiões de fronteira agrícola como o Cerrado do Meio-Norte (Maranhão e Piauí), onde há intenso processo de conversão da vegetação nativa em sistemas

agrícolas, deve vir acompanhado de monitoramento minucioso da evolução nas modificações do solo, especialmente relacionadas aos estoques de COS e emissões de GEE.

Os sistemas de produção sustentáveis devem ser igualmente desenhados de forma minuciosa e validados junto a produtores-referência da região, como forma de atestar a sua viabilidade não só técnica e econômica, mas também do ponto de vista ambiental, como potenciais geradores de serviços passíveis de compensação financeira, como o pagamento por créditos de carbono. Atualmente há um volume considerável de resultados de pesquisa demonstrando a efetividade de sistemas de produção sustentáveis em recompor estoques de carbono em solos de Cerrado da região Meio-Norte, quando comparados a sistemas tradicionais de cultivo (Brito et al., 2023) e mesmo comparados à vegetação nativa de Cerrado (Gualberto et al., 2023).

Os sistemas mais promissores do ponto de vista da sustentabilidade na região são geralmente componentes de sistemas integrados de produção, tais como, lavoura-pecuária (ILP), pecuária-floresta (IPF), lavoura-floresta (ILF ou agrofloresta) ou os três componentes lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Em alguns casos, produtores considerados referência na adoção de tais sistemas na região Meio-Norte têm obtido selos formais que atestam a sustentabilidade de seus sistemas de manejo do solo na produção agrícola. Exemplo disso é a Fazenda Barbosa, localizada no município de Brejo, no leste maranhense (Figura 2), que em 2022 alcançou o Selo Brasil Agrossustentável Nível Ouro, certificado pela Global Certification System.

Embora esse feito não se reverta em benefícios financeiros diretos ao produtor, a obtenção do Selo Brasil Agrossustentável em seu nível mais alto demonstra que, mesmo em regiões onde as condições edafoclimáticas (solo arenoso e clima tropical) são mais propícias à perda de COS, ou dificultam o rápido acúmulo deste (Lal, 2004), o uso de sistemas de manejo conservacionistas referendados pela ciência possibilita atingir níveis de sustentabilida-

de elevados. Portanto, o desenvolvimento e o uso de tecnologias sustentáveis, com acompanhamento minucioso da evolução da qualidade do solo e dos estoques de carbono, são essenciais, demonstrando que o sucesso da propriedade rural e as consequentes oportunidades ambientais e sobretudo econômicas começam na parcela experimental de campo. Os resultados gerados qualificam as propriedades rurais que adotam sistemas sustentáveis desenvolvidos para a região Meio-Norte, a pleitear sua incorporação a programas que permitam a remuneração pelos serviços ambientais prestados.



Figura 2. Sistemas integrados na Fazenda Barbosa, Brejo, Maranhão, 2022/2023.

Considerações finais e perspectivas

O sequestro de carbono no solo constitui uma oportunidade ím-par para conciliar o provimento de serviços ambientais com impactos para a sociedade como um todo com vantagens financeiras para agricultores que se disponham a adotar práticas sustentáveis de produção. Nesse sentido, o sucesso das pesquisas para o desenvolvimento e ajustes de tecnologias de produção que permitem otimizar os processos biogeoquímicos, gerando saldos positivos de carbono estocado nos solos, tem sido fator indutor essencial capaz de viabilizar o pagamento por créditos de carbono. As tecnologias hoje disponíveis, sobretudo aquelas associadas a componentes de sistemas integrados de produção, têm-se mostrado capazes de conciliar o aumento produtivo com a conservação do solo, mesmo em regiões onde as condições para o aumento dos estoques de carbono são desfavoráveis, tais como, o Meio-Norte brasileiro.

Ainda é lento o avanço nas discussões e definição de critérios formais para a regulamentação do mercado de créditos de carbono no Brasil. Além disso, as alternativas de mecanismos de incentivo atualmente disponíveis são não apenas insuficientes, mas intangíveis para um amplo contingente de produtores, sobretudo aqueles situados em regiões de fronteira agrícola. Não obstante esses desafios, o esforço concatenado de pesquisadores de diversas instituições para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis de produção e de métodos mais eficazes e menos onerosos de quantificação dos estoques de carbono constitui um ativo capaz de gerar as condições para que haja forte adesão por parte dos produtores, quando o mercado de créditos de carbono se consolidar e as vantagens se tornarem evidentes. Dado o potencial brasileiro para o sequestro de carbono em solos agrícolas a partir da adoção de tecnologias conservacionistas desenvolvidas com base em pesquisas agrícolas, desenha-se para o futuro um cenário em que ganha o País, ganha o produtor e ganha a sociedade.

Referências

- BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, v. 47, n. 2, p. 151-163, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>.
- BRASIL. Congresso. Senado. Projeto de Lei nº 412/2022. **Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) e altera as Leis nºs 12.187, de 29 de dezembro de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012, e 6.385, de 7 de dezembro de 1976**. Brasília, DF, 2023. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=2347303&filename=PL%20412/2022. Acesso em: 8 jan. 2024.
- BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **CPR Verde: título irá recompensar o produtor pela preservação ambiental**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/cpr-verde-titulo-ira-recompensar-o-produtor-pela-preservacao-ambiental>. Acesso em: 1 abr. 2024.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação. **Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária 2020-2030**. Brasília, DF: MAPA/DEPROS, 2021. Disponível em: <https://repositorio-dspace.agricultura.gov.br/bitstream/1/150/2/Plano%20Setorial%20para%20Adaptação%20à%20Mudança%20do%20Clima%20e%20Baixa%20Emissão%20de%20Carbono%20na%20Agricultura%202020-2030%20%281%29.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2026.
- BRITO, L. de C. R. de; SOUZA, H. A. de; ARAÚJO NETO, R. B. de; AZEVEDO, D. M. P. de; SAGRILO, E.; VOGADO, R. F.; CARVALHO, S. P.; FERREIRA, A. C. de M.; CAVIGELLI, M. A. Improved soil fertility, plant nutrition and grain yield of soybean and millet following maize intercropped with forage grasses and crotalaria in the Brazilian savanna. **Crop and Pasture Science**, v. 74, n. 5, p. 438-448, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP22251>.
- CERRI, C. E. P.; GALDOS, M. V.; CARVALHO, J. L. N.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C. Quantifying soil carbon stocks and greenhouse gas fluxes in the sugarcane agrosystem: point of view. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 5, p. 361-368, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500011>.
- CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **Apesar de bilionário, mercado de carbono exige “paciência” no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/noticias/apesar-de-bilionario-mercado-de-carbono-exige-paciencia-no-brasil>. Acesso em: 12 jun. 2023.
- CRUMP, J. **Smoke on water: countering global threats from peatland loss and degradation**. UN Environment, GRID-Arendal, 2017. Disponível em: <https://www.grida.no/publications/355>. Acesso em: 5 mar. 2026.
- FAO. Intergovernmental Technical Panel on Soils. **Global soil organic carbon map (GSO Cmap): technical report**. Rome, 2018. 162 p. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i8891en>. Acesso em: 5 mar. 2026.

FREITAS, I. C. de; RIBEIRO, J. M.; ARAÚJO, N. C. A.; SANTOS, M. V.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A.; AZEVEDO, A. M.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. E. P.; FRAZÃO, L. A. Agro-silvopastoral systems and well-managed pastures increase soil carbon stocks in the Brazilian Cerrado. **Rangeland Ecology & Management**, v. 73 n. 6, p. 776-785, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.08.001>.

FRIEDLINGSTEIN, P.; JONES, M. W.; O'SULLIVAN, M.; ANDREW, R. M.; BAKKER, D. C. E.; HAUCK, J.; LE QUÉRÉ, C.; PETERS, G. P.; PETERS, W.; PONGRATZ, J.; SITCH, S.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; JACKSON, R. B.; ALIN, S. R.; ANTHONI, P.; BATES, N. R.; BECKER, M.; BELLOUIN, N.; BOPP, L.; CHAU, T. T. T.; CHEVALLIER, F.; CHINI, L. P.; CRONIN, M.; CURRIE, K. I.; DECHARME, B.; DJEUTCHOUANG, L. M.; DOU, X.; EVANS, W.; FEELY, R. A.; FENG, L.; GASSER, T.; GILFILLAN, D.; GKRTZALIS, T.; GRASSI, G.; GREGOR, L.; GRUBER, N.; GÜRSSES, Ö.; HARRIS, I.; HOUGHTON, R. A.; HURTT, G. C.; IIDA, Y.; ILYINA, T.; LUIJKX, I. T.; JAIN, A.; JONES, S. D.; KATO, E.; KENNEDY, D.; GOLDEWIJK, K. K.; KNAUER, J.; KORSBAKKEN, J. I.; KÖRTZINGER, A.; LANDSCHÜTZER, P.; LAUVSET, S. K.; LEFÈVRE, N.; LIENERT, S.; LIU, J.; MARLAND, G.; MCGUIRE, P. C.; MELTON, J. R.; MUNRO, D. R.; NABEL, J. E. M. S.; NAKAOKA, S. I.; NIWA, Y.; ONO, T.; PIERROT, D.; POULTER, B.; REHDER, G.; RESPLANDY, L.; ROBERTSON, E.; RÖDENBECK, C.; ROSAN, T. M.; SCHWINGER, J.; SCHWINGSHACKL, C.; SÉFÉRIAN, R.; SUTTON, A. J.; SWEENEY, C.; TANHUA, T.; TANS, P. P.; TIAN, H.; TILBROOK, B.; TUBIELLO, F.; WERF, G. R. van der; VUICHARD, N.; WADA, C.; WAN-NINKHOF, R.; WATSON, A. J.; WILLIS, D.; WILTSHIRE, A. J.; YUAN, W.; YUE, C.; YUE, X.; ZAEHLE, S.; ZENG, J. **Global carbon budget 2021. Earth System Science Data**, v. 14, n. 4, p. 1917-2005, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>.

GRISCOM, B. W.; ADAMS, J.; ELLIS, P. W.; HOUGHTON, R. A.; LOMAX, G.; MITEVA, D. A.; SCHLESINGER, W. H.; SHOCH, D.; SIIKAMÄKI, J. V.; SMITH, P.; WOODBURY, P.; ZGANJAR, C.; BLACKMAN, A.; CAMPARI, J.; CONANT, R. T.; DELGADO, C.; ELIAS, P.; GOPALAKRISHNA, T.; HAMSIK, M. R.; HERRERO, M.; KIESECKER, J.; LANDIS, E.; LAESTADIUS, L.; LEAVITT, S. M.; MINNEMEYER, S.; POLASKY, S.; POTAPOV, P.; PUTZ, F. E.; SANDERMAN, J.; SILVIUS, M.; WOLLENBERG, E.; FARGIONE, J. Natural climate solutions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 44, p. 11645-11650, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>.

GUALBERTO, A. V. S.; SOUZA, H. A. de; SAGRILO, E.; ARAUJO, A. S. F.; MENDES, L. W.; MEDEIROS, E. V. de; PEREIRA, A. P. de A.; COSTA, D. P. da; VOGADO, R. F.; CUNHA, J. R. da; TEIXEIRA, M. L.; LEITE, L. F. C. Organic C fractions in topsoil under different management systems in Northeastern Brazil. **Soil Systems**, v. 7, n. 1, 11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010011>.

HALLDORSSON, G.; SIGURDSSON, B. D.; FINÉR, L.; GUDMUNDSSON, J.; KÄTTERER, T.; SINGH, B. R.; VESTERDAL, L.; ARNALDS, A. **Soil carbon sequestration – for climate, food security and ecosystem services**. [S.l.]: Nordic Council of Ministers, 2015.

HAMMOND, A. A. J.; MOTEW, M.; BRUMMITT, C. D.; DUBUISSON, M. L.; PINJUV, G.; HARBURG, D. V.; CAMPBELL, E. E.; KUMAR, A. A. Implementing the soil enrichment protocol at scale: opportunities for an agricultural carbon market. **Frontiers in Climate**, v. 3, 686440, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.686440>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014: synthesis report**. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p. Disponível em: https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf. Acesso em: 9 mar. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Summary for Policymakers**. In: SHUKLA, P. R.; SKEA, J.; BUENDIA, E. C.; MASSON-DELMOTTE, V.; PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D. C.; ZHAI, P.; SLADE, R.; CONNORS, S.; DIEMEN, R. VAN; FERRAT, M.; HAUGHEY, E.; LUZ, S.; NEOGI, S.; PATHAK, M.; PETZOLD, J.; PEREIRA, J. P.; VYAS, P.; HUNTLEY, E.; KISSICK, K.; BELKACEMI, M.; MALLEY, J. (ed.). Climate Change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. **Cambridge University Press**, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157988.001>.

JANTKE, K.; HARTMANN, M. J.; RASCHE, L.; BLANZ, B.; SCHNEIDER, U. A. Agricultural greenhouse gas emissions: knowledge and positions of German farmers. **Land**, v. 9, n. 5, 130, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/land9050130>.

KEENOR, S. G.; RODRIGUES, A. F.; MAO, L.; LATAWIEC, A. E.; HARWOOD, A. R.; REID, B. J. Capturing a soil carbon economy. **Royal Society Open Science**, v. 8 n. 4, 202305, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsos.202305>.

LAL, R.; SMITH, P.; JUNGKUNST, H. F.; MITSCH, W. J.; LEHMANN, J.; NAIR, P. K. R.; MCBRATNEY, A. B.; SÁ, J. C. de M.; SCHNEIDER, J.; ZINN, Y. L.; SKORUPA, A. L. A.; ZHANG, H.; MINASNY, B.; SRINIVASRAO, C.; RAVINDRANATH, N. H. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 73, n. 6, p. 145A-152A, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.73.6.145A>.

LAL, R. Soil Carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004. DOI: [DOI: 10.1126/science.1097396](https://doi.org/10.1126/science.1097396).

LUGATO, E.; LEIP, A.; JONES, A. Mitigation potential of soil carbon management overestimated by neglecting N₂O emissions. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 3, p. 219-223, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0087-z>.

MAYER, M.; PRESCOTT, C. E.; ABAKER, W. E. A.; AUGUSTO, L.; CÉCILLON, L.; FERREIRA, G. W. D.; JAMES, J.; JANDL, R.; KATZENSTEINER, K.; LACLAU, J.; LAGANIÈRE, J.; NOUVELLON, Y.; PARÉ, D.; STANTURF, J. A.; VANGUELOVA, E. I.; VESTERDAL, L. Tamm review: influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: a knowledge synthesis. **Forest Ecology and Management**, v. 466, 118127, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>.

- NAYAK, A. K.; RAHMAN, M. M.; NAIDU, R.; DHAL, B.; SWAIN, C. K.; NAYAK, A. D.; TRIPATHI, R.; SHAHID, M.; ISLAM, M. R.; PATHAK, H. Current and emerging methodologies for estimating carbon sequestration in agricultural soils: a review. **Science of The Total Environment**, v. 665, p. 890-912, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.125>.
- OLDFIELD, E. E.; EAGLE A. J.; RUBIN, R. L.; RUDEK, J.; SANDERMAN, J.; GORDON, D. R. Crediting agricultural soil carbon sequestration: regional consistency is necessary for carbon credit integrity. **Science**, v. 375, n. 6586, p. 1222-1225, 2022. DOI: [doi/10.1126/science.abl7991](https://doi.org/10.1126/science.abl7991).
- PAUSTIAN, K.; LARSON, E.; KENT, J.; MARX, E.; SWAN, A. Soil C sequestration as a biological negative emission strategy. **Frontiers in Climate**, v. 1, n. 8, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>.
- PAUSTIAN, K.; LEHMANN, J.; OGLE, S.; REAY, D.; ROBERTSON, G. P.; SMITH, P. Climate-smart soils. **Nature**, v. 532, p. 49-57, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature17174>.
- RAHMAN, N.; BRUUN, T. B.; GILLER, K. E.; MAGID, J.; VEN, G. W. J. van de; NEERGAARD, A. de. Soil greenhouse gas emissions from inorganic fertilizers and recycled oil palm waste products from Indonesian oil palm plantations. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 11, n. 9, p. 1056-1074, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12618>.
- RUMPEL, C.; AMIRASLANI, F.; CHENU, C.; CARDENAS, M. G.; KAONGA, M.; KOUTIKA, L.; LADHA, J.; MADARI, B.; SHIRATO, Y.; SMITH, P.; SOUDI, B.; SOUSSANA, J. -F.; WHITEHEAD, D.; WOLLENBERG, E. The 4p1000 initiative: opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy. **Ambio**, v. 49, p. 350-360, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01165-2>.
- SANDERMAN, J.; HENGL, T.; FISKE, G. J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. **PNAS**, v. 114, n. 36, p. 9575-9580, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>.
- SCHARLEMANN, J. P.; TANNER, E. V.; HIEDERER, R.; KAPOV, V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. **Carbon management**, v. 5, n. 1, p. 81-91, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>.
- SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA - SEEG Brasil. **Panorama das emissões brasileiras em 2024**. Disponível em: <https://seeg.eco.br>. Acesso em: 1 abr. 2024.
- SENESE, G. S.; SENESE, N. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) to measure quantitatively soil carbon with emphasis on soil organic carbon. a review. **Analytica Chimica Acta**, v. 938, p. 7-17, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.07.039>.
- SMITH, P. Soils and climate change. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 4, n. 5, p. 539-544, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.005>.

- SMITH, P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. **Global Change Biology**, v. 22, n. 3, p. 1315-1324, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13178>.
- SMITH, P.; SOUSSANA, J. -F.; ANGERS, A.; SCHIPPER, L.; CHENU, C.; RASSE, D. P.; BATJES, N. H.; EGMOND, F. van; MCNEILL, S.; KUHNERT, M.; ARIAS-NAVARRO, C.; OLESEN, J. E.; CHIRINDA, N.; FORNARA, D.; WOLLENBERG, E.; ALVARO-FUENTES, J.; SANZ-COBENA, A.; KLUMPP, K. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 219-241, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>.
- SOTERRONI, A. C.; RAMOS, F. M.; MOSNIER, A.; FARGIONE, J.; ANDRADE, P. R.; BAUMGARTEN, L.; PIRKER, J.; OBERSTEINE, M.; KRAXNER, F.; CÂMARA, G.; CARVALHO, A. X. Y.; POLASKY, S. Expanding the soy moratorium to Brazil's Cerrado. **Science advances**, v. 5, n. 7, eaav7336, 2019. DOI: 10.1126/sciadv.aav7336.
- SOUSSANA, J.-F.; LUTFALLA, S.; EHRHARDT, F.; ROSENSTOCK, T.; LAMANNA, C.; HAVLÍK, P.; RICHARDS, M.; WOLLENBERG, E.; CHOTTE, J.-L.; TORQUEBIAU, E.; CIAIS, P.; SMITH, P.; LAL, R. Matching policy and science: rationale for the '4 per 1000 - soils for food security and climate' initiative. **Soil and Tillage Research**, v. 188, p. 3-15, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.002>.
- SYKES, A. J.; MACLEOD, M.; EORY, V.; REES, R. M.; PAYEN, F.; MYRGIOTIS, V.; WILLIAMS, M.; SOHI, S.; HILLIER, J.; MORAN, D.; MANNING, D. A. C.; GOGGIO, P.; SEGHETTA, M.; WILLIAMS, A.; HARRIS, J.; DONDINI, M.; WALTON, J.; HOUSE, J.; SMITH, P. Characterizing the biophysical, economic and social impacts of soil carbon sequestration as a greenhouse gas removal technology. **Global Change Biology**, v. 26, n. 3, p. 1085-1108, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14844>.
- TAVARES, T. R.; MOUAZEN, A. M.; NUNES, L. C.; SANTOS, F. R. dos; MELQUIADES, F. L.; SILVA, T. R. da; KRUG, F. J.; MOLIN, J. P. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for tropical soil fertility analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 216, 105250, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105250>.
- TONITTO, C.; WOODBURY, P. B.; MCLELLAN, E. L. Defining a best practice methodology for modeling the environmental performance of agriculture. **Environmental Science & Policy**, v. 87, p. 64-73, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.04.009>.
- TUCA, B.; RIZZO, L.; KWON, V.; ASSALI, T. **Desmistificando os green bonds: financiamento do agronegócio**. Laboratório de Inovação Financeira Mattos filho, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/financas-verdes/textos-tecnicos-e-apresentacoes/DesmistificandoosGreenBonds_Agronegocio.pdf. Acesso em: 1 abr. 2024.
- WUEST, S. Seasonal variation in soil organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 4, p. 1442-1447, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.10.0447>.