

**CARBON FARMING: POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM SOLOS AGRÍCOLAS BRASILEIROS****CARBON FARMING: POTENTIAL FOR MITIGATING CLIMATE CHANGE IN BRAZILIAN AGRICULTURAL SOILS****CARBON FARMING: POTENCIAL DE MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS SUELOS AGRÍCOLAS BRASILEÑOS**

10.56238/revgeov16n5-168

**Gabriela Gonçalves Vendite**

Graduanda em Engenharia Agrônômica

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

E-mail: gabriela.vendite@estudante.ufscar.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-0593-5187>Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2682480068573838>**Anna Hoffmann Oliveira**

Doutora em Ciência do Solo

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

E-mail: annahoffmann@ufscar.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5479-8359>Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6666918682171234>**RESUMO**

Um dos maiores desafios socioambientais contemporâneos, as mudanças climáticas impõem riscos à segurança alimentar e à resiliência dos agroecossistemas tropicais. Nesse contexto, o conjunto de práticas de manejo do solo denominado carbon farming representa uma estratégia inteligente para maximizar o sequestro de carbono e reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa provenientes das atividades agrícolas. Este estudo avaliou a efetividade dessas práticas no Brasil por meio de uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), fundamentada no protocolo PRISMA. Foram analisados 56 artigos publicados entre 2015 e 2025, extraídos das bases SciELO, Web of Science, Scopus e Google Scholar. Os trabalhos foram organizados em eixos temáticos, com destaque segundo a frequência de publicações para: sistema de plantio direto e rotação de culturas (25%), integração lavoura-pecuária-floresta (18%) e recuperação de pastagens (16%) e sistemas agroflorestais/silvipastoris (14%). Os resultados indicaram ganhos consistentes: o SPD aumentou estoques em até 1,5 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>; culturas de cobertura reduziram a adubação nitrogenada em até 30%; o manejo hídrico em arroz irrigado mitigou até 96% das emissões de CH<sub>4</sub>; a fertirrigação em cana-de-açúcar reduziu em 50% o N<sub>2</sub>O; a recuperação de pastagens e os sistemas silvipastoris adicionaram até 1,2 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>; a ILPF elevou até 2,8 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>; e SAFs/SPS alcançaram até 7 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Conclui-se que o carbon farming constitui um portfólio de práticas eficazes e complementares, mas sua expansão em larga escala depende da superação de barreiras técnicas e econômicas, além do fortalecimento de políticas públicas.



**Palavras-chave:** Agricultura de Baixo Carbono. Sequestro de Carbono. Gases de Efeito Estufa.

## ABSTRACT

One of the greatest contemporary socio-environmental challenges, climate change poses risks to food security and the resilience of tropical agroecosystems. In this context, the set of soil management practices known as carbon farming represents a smart strategy for maximizing carbon sequestration and reducing net greenhouse gas emissions from agricultural activities. This study evaluated the effectiveness of these practices in Brazil through a Systematic Literature Review (SLR), based on the PRISMA protocol. Fifty-six articles published between 2015 and 2025 were analyzed, extracted from the SciELO, Web of Science, Scopus, and Google Scholar databases. The studies were organized into thematic areas, with emphasis on the frequency of publications for: no-till farming and crop rotation (25%), crop-livestock-forest integration (18%), pasture recovery (16%), and agroforestry/silvopastoral systems (14%). The results indicated consistent gains: SPD increased stocks by up to  $1.5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ; cover crops reduced nitrogen fertilization by up to 30%; water management in irrigated rice mitigated up to 96% of  $\text{CH}_4$  emissions; fertigation in sugarcane reduced  $\text{N}_2\text{O}$  by 50%; pasture recovery and silvopastoral systems added up to  $1.2 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ; ILPF increased up to  $2.8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ; and SAFs/SPS achieved up to  $7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ . It can be concluded that carbon farming constitutes a portfolio of effective and complementary practices, but its large-scale expansion depends on overcoming technical and economic barriers, in addition to strengthening public policies.

**Keywords:** Low-Carbon Agriculture. Carbon Sequestration. Greenhouse Gases.

## RESUMEN

El cambio climático, uno de los mayores retos socioambientales contemporáneos, supone un riesgo para la seguridad alimentaria y la resiliencia de los agroecosistemas tropicales. En este contexto, el conjunto de prácticas de gestión del suelo denominado «agricultura de carbono» representa una estrategia inteligente para maximizar la captura de carbono y reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero procedentes de las actividades agrícolas. Este estudio evaluó la eficacia de estas prácticas en Brasil mediante una revisión bibliográfica sistemática (RBS), basada en el protocolo PRISMA. Se analizaron 56 artículos publicados entre 2015 y 2025, extraídos de las bases SciELO, Web of Science, Scopus y Google Scholar. Los trabajos se organizaron en ejes temáticos, destacando según la frecuencia de publicaciones: sistema de siembra directa y rotación de cultivos (25 %), integración de cultivos, ganadería y bosques (18 %), recuperación de pastizales (16 %) y sistemas agroforestales/silvipastoriles (14 %). Los resultados indicaron ganancias consistentes: el SPD aumentó las reservas hasta en  $1,5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ; los cultivos de cobertura redujeron la fertilización nitrogenada hasta en un 30 %; el manejo hídrico en el arroz de regadío mitigó hasta el 96 % de las emisiones de  $\text{CH}_4$ ; la fertirrigación en la caña de azúcar redujo en un 50 % el  $\text{N}_2\text{O}$ ; la recuperación de pastizales y los sistemas silvipastoriles añadieron hasta  $1,2 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ; el ILPF aumentó hasta  $2,8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ; y los SAF/SPS alcanzaron hasta  $7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Se concluye que el cultivo de carbono constituye una cartera de prácticas eficaces y complementarias, pero su expansión a gran escala depende de la superación de barreras técnicas y económicas, además del fortalecimiento de las políticas públicas.

**Palabras clave:** Agricultura Baja en Carbono. Secuestro de Carbono. Gases de Efecto Invernadero.



## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas configuram-se como um dos maiores desafios socioambientais contemporâneos, cujos efeitos ultrapassam fronteiras ecológicas e econômicas, impondo riscos à segurança alimentar, aos serviços ecossistêmicos e ao bem-estar humano (Abreu et al., 2024). A intensificação do efeito estufa, derivada do acúmulo de gases de origem antrópica, tem provocado alterações nos regimes hídricos, maior frequência de eventos extremos e instabilidade produtiva em diversas regiões (Ferreira et al., 2022; Baião; Massi; Sousa Junior, 2024). A interface solo-água também responde ao uso da terra, com maiores fluxos de C dissolvido em bacias agrícolas (Rosa et al., 2017). Mudanças no balanço de energia e umidade já são detectáveis em áreas urbanas amazônicas (Santos et al., 2024). Nesse contexto, a agricultura ocupa papel paradoxal: é fonte expressiva de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), mas também apresenta elevado potencial para atuar como sumidouro de carbono por meio de práticas de manejo sustentável (Sousa et al., 2021; Oliveira et al., 2025).

O  $\text{CO}_2$ , proveniente sobretudo da queima de combustíveis fósseis, desmatamento e uso intensivo do solo, representa a maior parcela das emissões globais. Ferramentas preditivas indicam maior  $\text{CO}_2$  em cenários de revolvimento do solo (Vitória et al., 2022). O  $\text{CH}_4$ , embora menos abundante, apresenta Potencial de Aquecimento Global (PAG) 28 vezes superior ao  $\text{CO}_2$ , sendo a fermentação entérica e o arroz irrigado suas principais fontes (Guamán-Rivera et al., 2025). O  $\text{N}_2\text{O}$ , relacionado à adubação nitrogenada, possui vida média atmosférica de 114 anos e PAG 265 vezes maior que o  $\text{CO}_2$ , tornando a agricultura tropical uma das maiores responsáveis por sua emissão (Furtado Neto et al., 2019; Sousa et al., 2021).

O solo destaca-se como componente estratégico nesse processo, pois constitui o maior reservatório terrestre ativo de carbono, com estoques estimados entre 1.500 e 2.400 Gt C, superando a biomassa vegetal (Gomide et al., 2024; Oliveira et al., 2025). Estimativas regionais confirmam a variação de estoques conforme o uso e manejo em Latossolos do Sul do Brasil (Magalhães et al., 2024). Entretanto, o histórico de uso da terra no país, com extensas conversões de florestas e savanas em pastagens e monocultivos, resultou em perdas significativas de carbono edáfico (Silva et al., 2024; Freitas et al., 2024). Estudos recentes sugerem ainda que o aquecimento de horizontes subsuperficiais acelera a decomposição de compostos recalcitrantes, ameaçando a estabilidade de longo prazo dos estoques (Baião; Massi; Sousa Junior, 2024; Amelung et al., 2020). Em contrapartida, a sucessão florestal secundária acumula carbono mensurável ao longo do tempo (Villanova et al., 2019).

Nesse cenário, emerge o conceito de carbon farming, definido como o conjunto de práticas agrícolas, pecuárias e florestais voltadas à maximização do sequestro de carbono e à redução líquida de GEE (Freitas et al., 2024). Evidências empíricas nacionais destacam ganhos expressivos: o sistema de plantio direto (SPD) elevou o estoque de carbono em até  $1,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e reduziu a erosão em



cinco vezes (Carvalho et al., 2017; Ozório et al., 2024; Tanaka et al., 2025); culturas de cobertura reduziram a necessidade de adubação nitrogenada em até 30% (Cordeiro et al., 2015); no arroz irrigado, a drenagem intermitente reduziu até 96% das emissões de CH<sub>4</sub> (Carvalho et al., 2021); em canaviais, a fertirrigação subsuperficial reduziu em 50% as emissões de N<sub>2</sub>O e a colheita crua resultou em saldo positivo de até 1.484 kg CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Faquim et al., 2024).

Na pecuária, sistemas silvipastoris e a recuperação de pastagens degradadas aumentaram estoques em até 1,2 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e reduziram a intensidade das emissões entéricas (Silva et al., 2024a). Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) ampliaram estoques em até 2,8 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, além de reduzir em 30% as emissões por animal e aumentar a produtividade da carne em 40% (Tonini, 2023). Já sistemas agroflorestais e silvipastoris (SAFs e SPS) apresentaram taxas de sequestro de até 7 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, conciliando mitigação climática com benefícios à biodiversidade e à segurança alimentar (Tonini, 2023; Guamán-Rivera et al., 2025).

As políticas públicas são fundamentais para a difusão dessas práticas. O Plano ABC (2010–2020) superou metas ao atender 54 milhões de hectares, com mitigação de 193,67 Mt CO<sub>2</sub>eq, enquanto o ABC+ (2020–2030) prevê a expansão para 72,68 milhões de hectares até 2030, incluindo SPD, ILPF, SAFs e recuperação de pastagens (Tonini, 2023; Abreu et al., 2024). No plano internacional, iniciativas como a RECSOIL/FAO reforçam a recarbonização dos solos como eixo central de mitigação e adaptação climática (Guamán-Rivera et al., 2025). Diante disso, compreender o potencial do carbon farming no Brasil implica integrar evidências científicas, benefícios produtivos, barreiras institucionais e alinhamento às políticas nacionais e internacionais. A consolidação dessas práticas representa uma oportunidade estratégica para aumentar a resiliência agroecossistêmica, valorizar serviços ecossistêmicos e posicionar o país como protagonista na agenda climática global.

Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar uma avaliação abrangente da eficácia e da adoção das práticas de carbon farming em solos agrícolas brasileiros, focando em múltiplos aspectos. A pesquisa buscou, primeiramente, investigar a efetividade dessas práticas no sequestro de carbono e na mitigação de emissões líquidas de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, avaliando, em paralelo, os co-benefícios de ordem agrônômica, ambiental e socioeconômica. Para isso, o estudo se desdobrou na avaliação de práticas conservacionistas, como plantio direto, rotação de culturas, culturas de cobertura e uso de biochar, quanto ao seu impacto no carbono. Examinou, ainda, estratégias de manejo hídrico e nutricional em culturas como arroz irrigado e cana-de-açúcar, visando especificamente a redução dos fluxos de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. A pesquisa incluiu a análise da pecuária sustentável, abrangendo a recuperação de pastagens degradadas, a intensificação ecológica e os sistemas silvipastoris, com foco na mitigação do metano entérico e no aumento da produtividade. Por fim, investigou o potencial dos sistemas integrados como a Integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e os sistemas agroflorestais (SAFs/SPS), destacando sua contribuição para o sequestro de carbono, a diversificação produtiva e a



geração de co-benefícios socioambientais, além de identificar as barreiras técnicas, econômicas e institucionais que impedem a ampla adoção dessas práticas.

## 2 METODOLOGIA

Este estudo foi desenvolvido por meio de uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), fundamentada nas diretrizes de Kitchenham e Charters (2007) e no protocolo PRISMA, adaptado às Ciências Agrárias e Ambientais. A adoção dessa abordagem em revisões sobre gases de efeito estufa e agricultura já é consolidada no campo (Galdino; Signor, 2024). Além disso, a seleção dos eixos analíticos considerou definições operacionais estabelecidas em documentos técnicos nacionais, como aquelas referentes à ILP/ILPF (Cordeiro et al., 2015).

A busca bibliográfica contemplou o período de 2015 a 2025, sem excluir estudos anteriores considerados fundamentais para o tema. Foram consultadas as bases SciELO, Web of Science, Scopus e Google Scholar, empregando descritores em português e inglês, tanto de forma isolada quanto combinada, a depender da base, tais como: carbon farming, agricultura de carbono, mitigation, greenhouse gas emissions, soil carbon, arroz irrigado, cana-de-açúcar, pastagens, ILPF, SAFs, SPS e Brasil.

Na primeira triagem, os descritores foram aplicados isoladamente para ampliar o escopo da busca. Em seguida, os resultados foram refinados com base em critérios de inclusão:

- 1- Estudos empíricos conduzidos em solos agrícolas brasileiros ou em condições edafoclimáticas análogas;
- 2- Apresentação de resultados quantitativos sobre estoques de carbono no solo, fluxos de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O ou métricas de mitigação em sistemas agrícolas, pecuários e florestais;
- 3- Publicações em periódicos indexados ou trabalhos técnicos com DOI.

Foram excluídos estudos de revisão sem dados empíricos, modelagens puramente teóricas, relatórios sem transparência metodológica e trabalhos cujo foco principal fosse a “qualidade do solo” desvinculada da mitigação ou sequestro de carbono.

Os artigos selecionados foram sistematizados nos seguintes eixos principais:

### I. Práticas agrícolas de conservação:

- SPD e rotação de culturas
- culturas de cobertura
- biochar

### II. Sistemas integrados:

- ILPF
- SAFs e SPS



### III. Manejos:

- Hídrico: arroz irrigado
- Nutricional (N): cana-de-açúcar

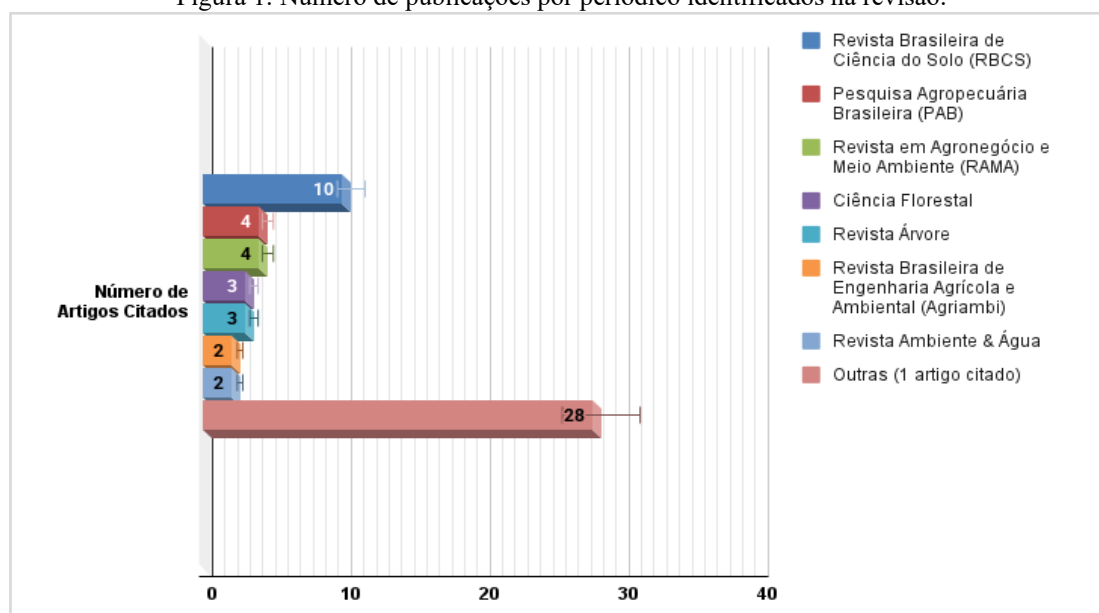
### IV. Pecuária sustentável:

- recuperação de pastagens, intensificação ecológica e mitigação do metano entérico.

A extração dos dados contemplou localização dos estudos, tipo de solo, clima, metodologia empregada, resultados numéricos (estoques, fluxos e reduções), limitações e vínculos com políticas públicas. A análise combinou síntese descritiva (valores médios e intervalos) e interpretação crítica, considerando a literatura consolidada e relatórios institucionais. Essa abordagem assegurou a reprodutibilidade do percurso metodológico e garantiu foco em práticas de carbon farming aplicáveis ao contexto brasileiro.

Ao final da triagem foram identificados 56 artigos científicos. Em termos de padrões editoriais, a análise revelou uma concentração majoritária de artigos em revistas de referência na área de Ciências Agrárias e Ambientais classificadas nos estratos mais elevados do Qualis CAPES (Figura 1), sendo a Revista Brasileira de Ciência do Solo mais frequente para as publicações do tema.

Figura 1. Número de publicações por periódico identificados na revisão.



Fonte: Elaborada pelas próprias autoras.

Além da análise dos periódicos e de suas classificações, a distribuição dos trabalhos entre as diferentes regiões do Brasil permitiu identificar em quais contextos edafoclimáticos e produtivos o carbon farming tem sido mais investigado (Figura 2). A maior parte dos estudos concentra-se em áreas representativas dos biomas Cerrado e Amazônia, seguidos por registros relevantes no Sul e no Sudeste, evidenciando tanto a importância estratégica do Cerrado para a produção agrícola de larga escala

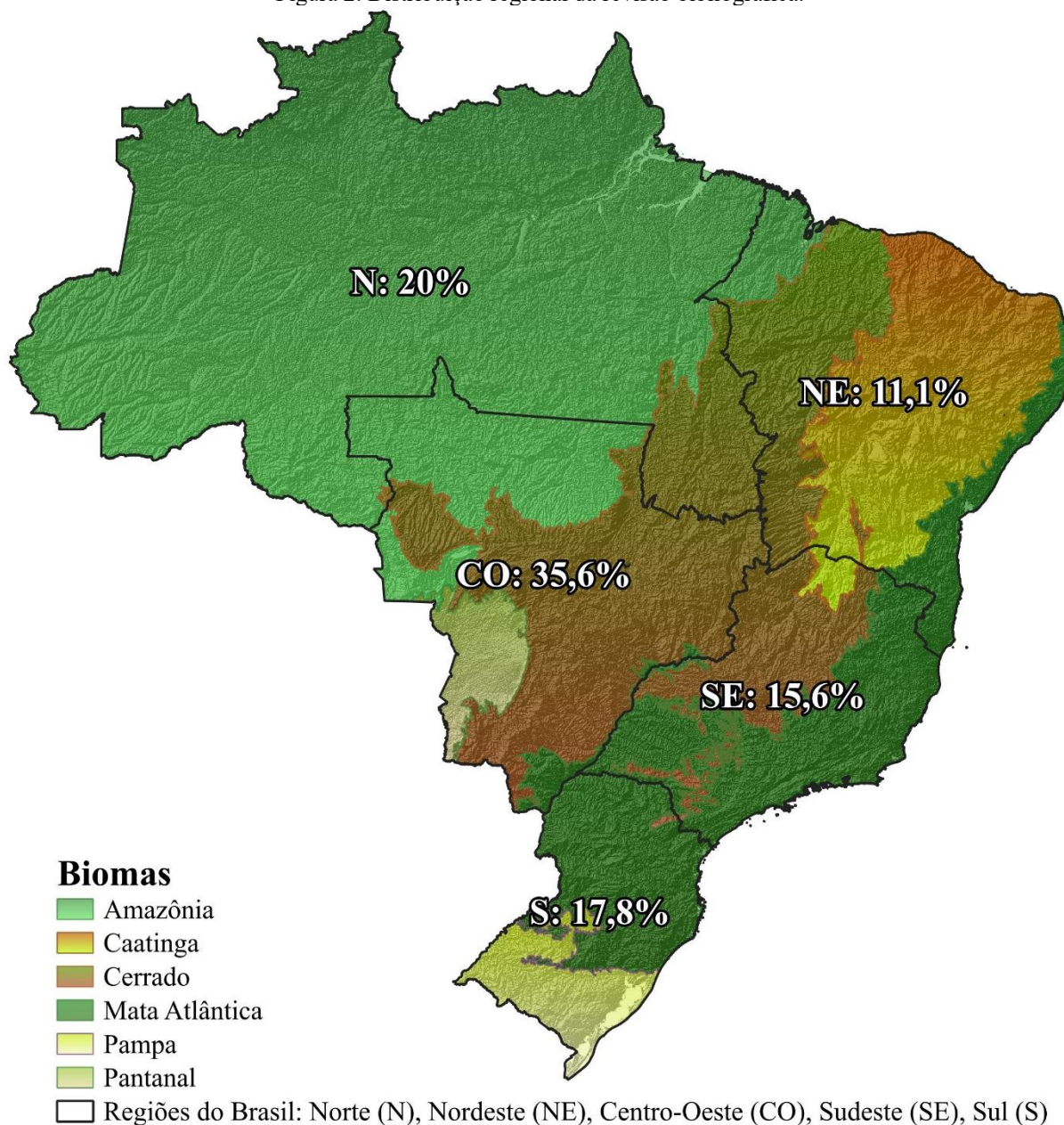




quanto a vulnerabilidade da Amazônia em cenários de uso da terra. Outros biomas, como Caatinga e Pampa, apresentaram menor número de investigações, o que indica lacunas de pesquisa e a necessidade de ampliar a cobertura geográfica dos estudos sobre carbon farming no Brasil.

Dessa forma, os resultados apresentados a seguir discutem em detalhe a distribuição temática e regional das práticas identificadas, bem como seus ganhos, co-benefícios e limitações, compondo um panorama crítico sobre a contribuição do carbon farming para a mitigação das mudanças climáticas no país.

Figura 2. Distribuição regional da revisão bibliográfica.

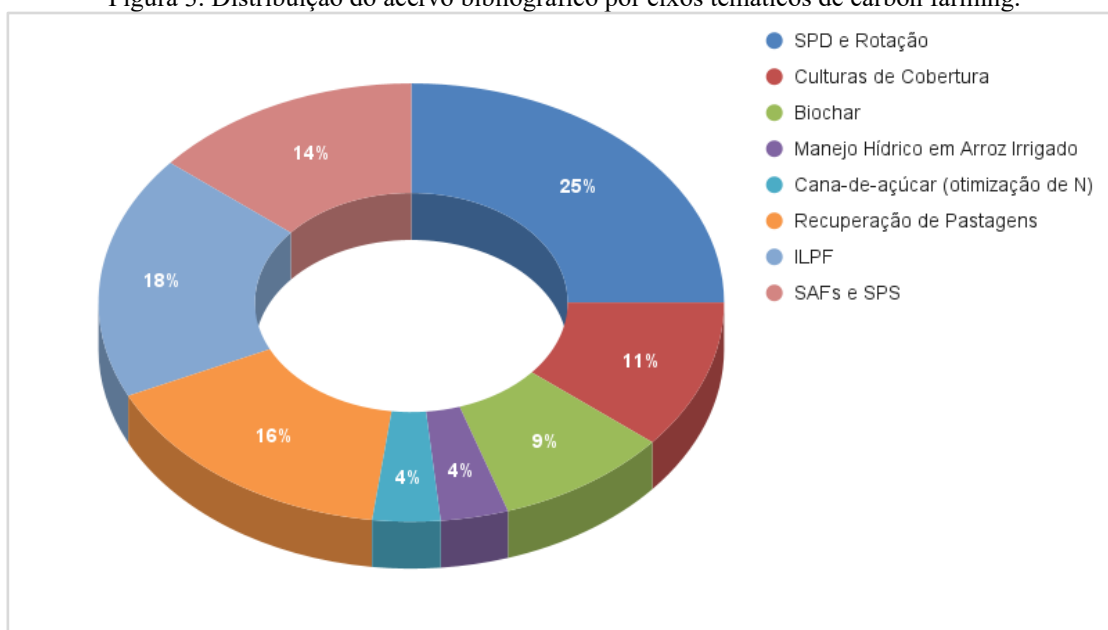


Fonte: Elaborada pelas próprias autoras.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise revelou o eixo práticas conservacionistas como o mais investigado, totalizando 45%, sendo o SPD e rotação de culturas o principal alvo dos estudos (Figura 3). Em seguida, os sistemas integrados ILPF, SAFs e SPS, representaram 32% dos trabalhos desenvolvidos. O eixo pecuária sustentável também se destacou, com a recuperação de pastagens atingindo 16% e representando a terceira prática mais pesquisada. Em conjunto, é possível verificar o destaque destas estratégias de carbon farming na agenda nacional de mitigação vinculada ao uso e cobertura do solo.

Figura 3. Distribuição do acervo bibliográfico por eixos temáticos de carbon farming.



Fonte: Elaborado pelas próprias autoras.

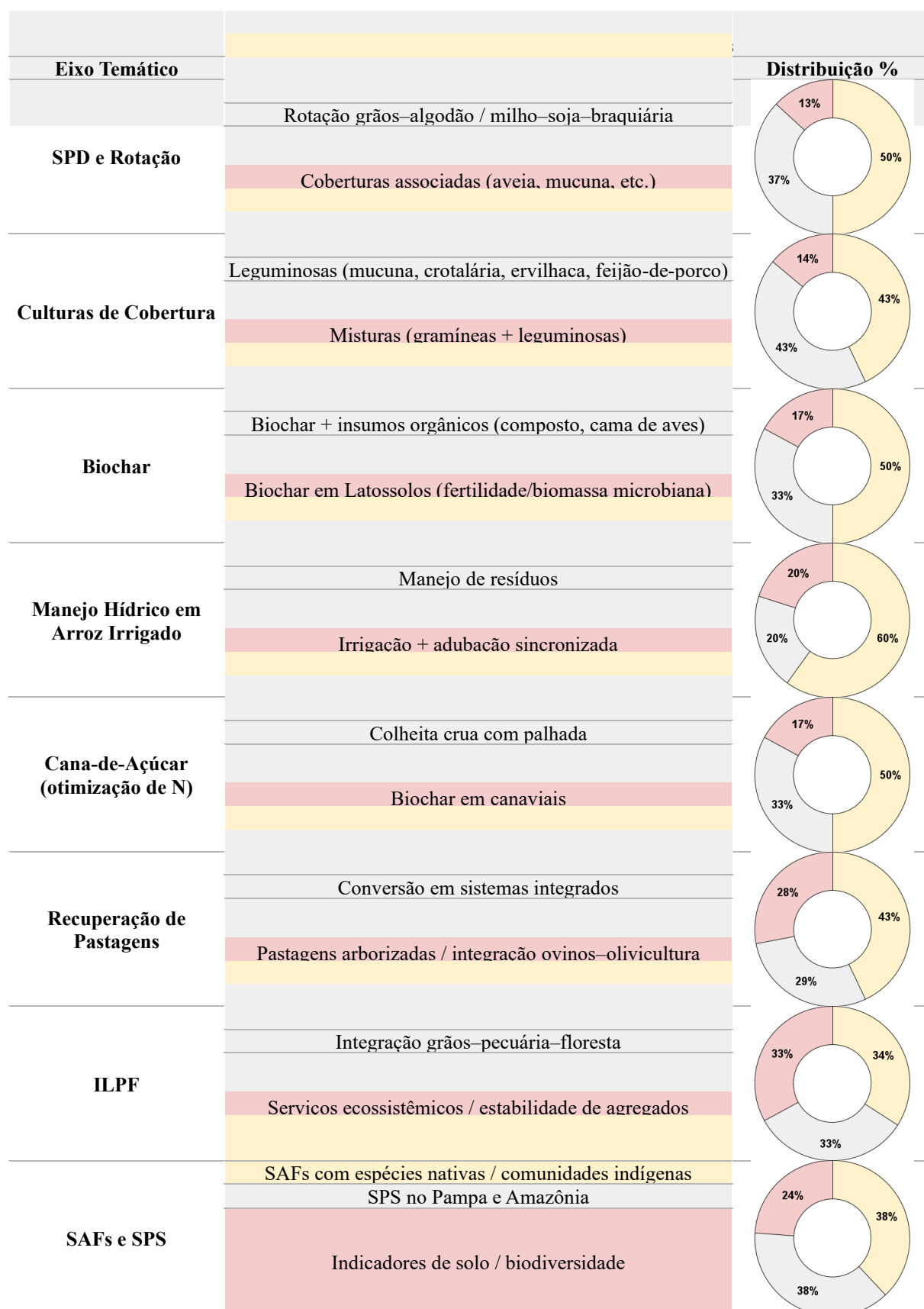
No interior de cada eixo foram identificadas as práticas mais recorrentes (Tabela 1). Em culturas de cobertura, destacam-se gramíneas como aveia-preta e braquiária e leguminosas como mucuna e crotalária (Tabela 1), associadas à ciclagem de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio. Já para SPD e rotação, predominam os estudos sobre redução da erosão e maior infiltração de água, enquanto outros enfatizam ganhos em matéria orgânica estável. No eixo biochar, a maior parte dos artigos avaliou resíduos agroindustriais (cana-de-açúcar, glicíndia, cama de frango), com evidências de aumento do pH, da CTC e do sequestro de carbono de longo prazo.

Em arroz irrigado, todos os trabalhos compararam o alagamento contínuo à drenagem intermitente, registrando reduções expressivas de CH<sub>4</sub>, ainda que acompanhadas por picos de N<sub>2</sub>O em condições aeróbias. Na cana-de-açúcar, os estudos analisaram fertirrigação subsuperficial e colheita crua, ambos apontando mitigação de N<sub>2</sub>O e saldo positivo de carbono. Práticas de adubação corretiva, introdução de forrageiras e sistemas silvipastoris, todas associadas a aumentos de estoques de carbono e redução de emissões entéricas, são predominantes na recuperação de pastagens. O eixo ILPF concentrou estudos em atributos de solo, como fertilidade, agregação e estoques de carbono, além de





ganhos em produtividade animal. Por fim, em SAFs e SPS, aparecem com destaque a introdução de árvores forrageiras e fixadoras de nitrogênio, o sequestro de carbono no solo e a análise de viabilidade econômica de longo prazo.



Fonte: Elaborado pelas próprias autoras.



Esses resultados demonstram que, embora a literatura esteja distribuída entre diferentes estratégias, existe consenso quanto ao papel estratégico das práticas conservacionistas (SPD, coberturas, biochar) e dos sistemas integrados (ILPF, SAFs e SPS, recuperação de pastagens) como pilares do carbon farming no Brasil.

A análise dos artigos mostrou que práticas conservacionistas, como o SPD, culturas de cobertura e uso de biochar, apresentaram resultados consistentes em termos de incremento nos estoques de carbono e melhoria da qualidade do solo, ainda que enfrentem limitações associadas a custos de insumos, disponibilidade hídrica e ausência de mecanismos consolidados de incentivo. Por outro lado, práticas de manejo hídrico em arroz irrigado e otimização do nitrogênio em cana-de-açúcar evidenciaram grande eficiência na mitigação de fluxos de metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), mas exigem ajustes técnicos cuidadosos para evitar efeitos adversos, como picos de emissão de  $\text{N}_2\text{O}$ .

Os sistemas integrados, incluindo recuperação de pastagens, ILPF, SAFs e SPS, foram os que demonstraram maior robustez em termos de benefícios múltiplos. Além de sequestrar carbono em taxas superiores às demais práticas, as pesquisas apontam ampliação de produtividade, promoção de estabilidade de renda e redução de riscos climáticos, reforçando a centralidade destes sistemas nas políticas de agricultura de baixo carbono. Todavia, a complexidade de manejo, a necessidade de assistência técnica especializada e os custos iniciais elevados permanecem como barreiras relevantes à expansão integrada. Assim, a comparação evidencia que nenhuma prática é isenta de limitações, reforçando a necessidade de estratégias combinadas para potencializar ganhos e mitigar riscos. O carbon farming, nesse sentido, deve ser compreendido como um portfólio de soluções complementares, em que o equilíbrio entre eficiência técnica, viabilidade econômica e políticas públicas é determinante para sua adoção em larga escala.

O Quadro 1 resume os resultados empíricos da revisão e reúne orientações para a formulação de recomendações práticas para agricultores, gestores e formuladores de políticas voltadas à mitigação das mudanças climáticas no Brasil. A análise comparativa das práticas demonstra que não há uma solução única, mas um conjunto de estratégias que se destacam pela magnitude dos ganhos e pela consistência dos resultados. Entre elas, os SAFs e SPS se sobressaem pelo elevado potencial de sequestro de carbono, com valores médios de até  $7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , além da neutralização parcial do metano entérico e da geração de múltiplos serviços ecossistêmicos (Quadro 1).

Em escala mais imediata, os sistemas ILPF e a recuperação de pastagens também apresentam elevado desempenho, conciliando mitigação de gases de efeito estufa, aumento da produtividade animal e diversificação econômica. O manejo hídrico em arroz irrigado, por sua vez, aparece como prática de alta eficiência climática, alcançando reduções de até 96% nas emissões de  $\text{CH}_4$ , sem comprometer a produtividade. Já o biochar, embora com resultados expressivos em modelagens e



experimentos de campo, depende ainda da superação de barreiras técnicas e logísticas para ganhos em escala (Quadro 1).

Quanto ao enfoque econômico-financeiro, apenas uma parcela restrita dos trabalhos avaliados abordou explicitamente a viabilidade de longo prazo ou a relação com mercados de carbono. Estudos como Lefebvre et al. (2020) e Torres et al. (2024) destacaram o potencial do biochar e dos SAFs para gerar créditos de carbono ou retorno financeiro positivo após a consolidação do sistema. De forma semelhante, Castro et al. (2018) e Petter et al. (2019) relacionaram a aplicação de biochar ao aumento da produtividade agrícola, sugerindo ganhos indiretos de rentabilidade. O relatório técnico da Embrapa (2021) e análises institucionais reforçam a importância de instrumentos como o Plano ABC+ e mecanismos de pagamento por serviços ambientais, embora a literatura empírica ainda apresente lacunas significativas sobre quantificação de custos e retorno econômico em condições tropicais.

Quadro 1. Práticas de carbon farming no Brasil: ganhos de sequestro de carbono, redução de emissões, co-benefícios e desafios.

Prática	Principais Ganhos	Co-benefícios	Desafios
SPD e Rotação	Acréscimos de até 0,6–1,5 Mg C ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ; redução de erosão em até 80%; aumento da infiltração em 30–40% (Ozório et al., 2024; Tanaka et al., 2025)	Maior eficiência no uso de nutrientes; aumento da estabilidade produtiva; adaptação a extremos climáticos (Freitas et al., 2024)	Limitação hídrica em regiões semiáridas; mecanização adaptada; custos de capacitação técnica (Abreu et al., 2024)
Culturas de Cobertura	Redução de 25–30% da adubação N mineral; incremento de até 0,32 g C kg <sup>-1</sup> no carbono microbiano; liberação de 37 kg N ha <sup>-1</sup> (Sousa et al., 2021; Freitas et al., 2024)	Proteção contra erosão (até 4,1 Mg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de solo preservado); redução de até 40% da exportação de P; melhora da qualidade da água (Tanaka et al., 2025; Ozório et al., 2024)	Custos de sementes; competição por área; ausência de mecanismos consolidados de PSA (Tonini, 2023)
Biochar	Aumento de 2,35 ± 0,4 t C ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> em estoques de solo; redução de até 60% das emissões acumuladas de N <sub>2</sub> O; elevação da CTC em 25% (Andrade et al., 2015; Petter et al., 2019; Tito et al., 2025)	Melhoria da fertilidade do solo; aumento da produtividade de culturas; integração com cadeias agroindustriais (Silva et al., 2024b)	Alto custo de pirólise; ausência de normativas técnicas; logística de transporte e aplicação (Assad et al., 2022)
Manejo Hídrico em Arroz Irrigado	Redução de até 96% das emissões de CH <sub>4</sub> ; produtividade mantida em 9,8–10,3 t ha <sup>-1</sup> ; risco de picos de N <sub>2</sub> O até 98 g N <sub>2</sub> O-N ha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> (Zschornack et al., 2016; Lopes et al., 2018)	Redução de até 30% no consumo de água; custo-benefício positivo (Zschornack et al., 2016)	Necessidade de sincronizar irrigação e fertilização; risco de aumento de N <sub>2</sub> O em períodos aeróbios (Sousa et al., 2021)
Cana-de-Açúcar (Otimização do N)	Emissões de N <sub>2</sub> O reduzidas em até 50%; fatores de emissão caíram de 4,26 para 1,69%; saldo positivo de 1.484 kg CO <sub>2</sub> eq ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> (Lopes et al., 2018; Tavares et al., 2018)	Maior atividade microbiana; integração com bioenergia; substituição de combustíveis fósseis (Silva et al., 2024b)	Alto custo inicial da fertilização; baixa difusão em pequenas propriedades (Abreu et al., 2024; Embrapa, 2021)
Recuperação de Pastagens	Incremento de até 1,2 Mg C ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> em estoques; redução de 20–30% nas emissões entéricas (Ribeiro et al., 2023; Tonini, 2023)	Aumento de até 35% na produtividade animal; melhoria da qualidade da carne; redução da pressão por desmatamento (Silva et al., 2024a; Signor et al., 2022)	Custos de recuperação elevados; baixa assistência técnica rural (Abreu et al., 2024)
ILPF	Sequestro de até 2,8 Mg C ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ; aumento de 40% na produtividade da carne; redução de 30% nas emissões entéricas (Freitas et al., 2024; Alcântara et al., 2024; Tonini, 2023)	Diversificação de renda; redução do risco de incêndios em até 40%; inclusão socioambiental (Abreu et al., 2024)	Exige assistência técnica especializada; custos iniciais elevados; complexidade de manejo (Embrapa, 2021)
SAFs e SPS	Sequestro médio de até 7 Mg C ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ; neutralização parcial do CH <sub>4</sub> entérico; aumento de biodiversidade (Torres et al., 2017; Tonini, 2023; Guamán-Rivera et al., 2025)	Redução de até 40% nos custos com adubação; viabilidade econômica a partir do 10º ano; diversificação de renda (Baldotto & Baldotto, 2018; Torres et al., 2024)	Altos custos iniciais; horizontes de retorno longos; necessidade de PSA e certificações (Assad et al., 2022)

Fonte: Adaptado de Ozório et al. (2024); Tanaka et al. (2025); Freitas et al. (2024); Sousa et al. (2021); Zschornack et al. (2016); Lopes et al. (2018); Tavares et al. (2018); Ribeiro et al. (2023); Alcântara et al. (2024); Torres et al. (2017); Tonini (2023); Guamán-Rivera et al. (2025); Baldotto & Baldotto (2018); Abreu et al. (2024); Silva et al. (2024a, 2024b); Embrapa (2021).

### 3.1 SISTEMA DE PLANTIO DIRETO (SPD) E ROTAÇÃO DE CULTURAS

O SPD consolidou-se como a principal tecnologia conservacionista do agronegócio brasileiro, sustentado em três princípios básicos: ausência de revolvimento do solo, manutenção permanente de cobertura vegetal e diversificação de espécies por meio da rotação. Esses elementos atuam de forma integrada na redução da mineralização da matéria orgânica, no controle da erosão e na ampliação dos estoques de carbono orgânico estável (Ozório et al., 2024; Tanaka et al., 2025). Evidências indicam que, em condições tropicais, o SPD reduziu significativamente as perdas de solo e aumentou a infiltração de água em Latossolos, com ganhos próximos de 30–40% em comparação ao preparo



convencional (Tanaka et al., 2025). Ensaios sob chuva natural mostram menor perda de solo com coberturas vegetais em SPD (Salomão et al., 2020).

Em relação à dinâmica do carbono, experimentos conduzidos no Cerrado revelaram acréscimos de até 0,6 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> nos primeiros anos de adoção do SPD (Ozório et al., 2024). Esses incrementos foram associados principalmente à estabilização da fração humificada da matéria orgânica, localizada em horizontes subsuperficiais. Tanaka et al. (2025) reforçam que a diversificação de espécies na rotação favorece a formação de macroagregados, essenciais para a proteção física do carbono. Em ILP, melhorias em atributos físicos e químicos do solo reforçam a proteção do carbono (Beutler et al., 2016). No cultivo de cana-de-açúcar, sistemas conservacionistas como a colheita crua e fertirrigação subsuperficial reduziram em mais de 40% as emissões de N<sub>2</sub>O em relação ao manejo convencional, resultando em saldo positivo de carbono no sistema (Faquim et al., 2024).

Apesar dos benefícios, a adoção plena do SPD enfrenta barreiras importantes. Em regiões semiáridas - principalmente no bioma Caatinga, mas também em áreas de Cerrado e Mata Atlântica - a limitação hídrica compromete a produção de palhada, elemento crucial para a prática (Silva et al., 2024). Além disso, custos de mecanização adaptada, déficit de capacitação técnica e resistência cultural dificultam sua disseminação em larga escala (Freitas et al., 2024). Nesse cenário, políticas públicas assumem papel decisivo. O Plano ABC (2010–2020) promoveu a adoção de SPD em milhões de hectares, resultando em significativa mitigação de CO<sub>2</sub>eq, e a fase atual, ABC+ (2020–2030), prevê expansão da área cultivada com práticas conservacionistas para 72 milhões de hectares até 2030 (Abreu et al., 2024; Tonini, 2023).

O SPD também contribui para a eficiência do uso de nutrientes e para a resiliência climática dos sistemas agrícolas. Estudos mostram que sistemas conservacionistas apresentam maior retenção de nitrogênio no solo e menores fluxos de N<sub>2</sub>O, indicando ganhos em eficiência da adubação nitrogenada (Sousa et al., 2021). A diversificação por sistemas integrados aumenta resiliência a extremos (Assad et al., 2022), estudos mostram que a redução da densidade aparente e o incremento da infiltração favorecem a adaptação frente a eventos de chuva intensa e estiagens, frequentes no Cerrado (Silva et al., 2024).

Do ponto de vista socioeconômico, propriedades que adotaram sistemas integrados e SPD registraram ganhos de produtividade e maior estabilidade de renda (Freitas et al., 2024). A inclusão do SPD em programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e em linhas de crédito rural verde reforça sua centralidade como tecnologia-chave da agricultura de baixa emissão no Brasil.

### 3.2 CULTURAS DE COBERTURA

As culturas de cobertura desempenham papel estratégico no carbon farming, pois inserem biomassa diversificada no sistema, melhoram a ciclagem de nutrientes e protegem o solo contra



intempéries. Sacramento et al. (2018) ressaltam a variabilidade de tais efeitos conforme a classe de solo, especialmente em Neossolos Regolíticos. Gramíneas como aveia-preta e braquiária são amplamente utilizadas pela alta relação C/N, que favorece a estabilização do carbono, enquanto leguminosas como mucuna, crotalária e ervilhaca oferecem nitrogênio por fixação biológica, reduzindo a dependência de fertilizantes minerais (Freitas et al., 2024; Sousa et al., 2021; Ozório et al., 2024). Em experimentos com Argissolos, Acosta et al. (2014) observaram decomposição rápida e maior liberação de N para a ervilhaca, enquanto a aveia-preta promoveu imobilização mais duradoura e proteção do carbono. Abordagens isotópicas têm quantificado a incorporação de biomassa na MOS (Severo et al., 2017).

Em ambientes de arroz irrigado, os efeitos das culturas de cobertura mostram-se contrastantes. Zschornack et al. (2016) verificaram que a biomassa de azevém e azevém + cornichão aumentou as emissões acumuladas de CH<sub>4</sub> para valores entre 118 e 119 kg ha<sup>-1</sup> por safra, equivalente a 6.691 kg CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup>, dos quais 98% foram atribuídos ao metano. No entanto, a adoção de drenagem intermitente reduziu esses fluxos em até 96%, sem comprometer a produtividade, que se manteve entre 9,8 e 10,3 t ha<sup>-1</sup>. Esses resultados reforçam a importância de planejar o uso de coberturas em conjunto com o manejo hídrico, de modo a evitar trade-offs climáticos (Carvalho et al., 2021; Sousa et al., 2021).

No plano econômico, a prática enfrenta barreiras associadas ao custo das sementes, à competição por área e à ausência de mecanismos consolidados de remuneração pelos serviços ambientais prestados (Abreu et al., 2024; Tonini, 2023). Políticas públicas têm buscado superar essas limitações: o Plano ABC+ reconhece as culturas de cobertura como tecnologia prioritária para a mitigação, enquanto programas internacionais, como a RECSOIL/FAO, já vinculam a prática a mecanismos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e créditos de carbono (Tonini, 2023; Abreu et al., 2024). A combinação de incentivos institucionais e ganhos agronômicos reforça o potencial dessas culturas para ampliar o sequestro de carbono em solos agrícolas brasileiros (Freitas et al., 2024; Ozório et al., 2024).

A rotação com braquiária elevou o C microbiano no Cerrado (Savioli et al., 2024), evidências adicionais fortalecem esse diagnóstico. Em Latossolos do Cerrado, Savioli et al. (2024) mostraram que o uso de braquiária em rotação elevou em 20% o carbono microbiano em comparação a áreas descobertas, indicando maior atividade biológica do solo (Freitas et al., 2024; Silva et al., 2024). Ferreira (2016) demonstrou que leguminosas como feijão-de-porco e mucuna podem reduzir em até 35% a necessidade de adubação nitrogenada mineral, gerando economia direta ao produtor (Sousa et al., 2021). Do ponto de vista ambiental, a manutenção de cobertura permanente reduziu em cinco vezes a perda de solo em áreas de encosta e diminuiu em 40% a exportação de fósforo para corpos hídricos, contribuindo para a qualidade da água (Ozório et al., 2024; Tanaka et al., 2025). Esses resultados, que





podem ser observados no Quadro 2, sustentam a integração de culturas de cobertura a políticas de PSA e créditos de carbono, ampliando sua adoção sobretudo em pequenas e médias propriedades.

Quadro 2. Espécies de culturas de cobertura e resultados observados.

Espécie	Efeito principal	Resultados numéricos
<i>Avena strigosa</i>	Alta relação C/N, promove imobilização de nutrientes e protege MOS	Redução de 4,1 Mg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de perda de solo no SPD (Tanaka et al., 2025)
<i>Urochloa</i> spp.	Raízes profundas, aumenta estabilidade de agregados e C microbiano	↑ 0,32 g C kg <sup>-1</sup> solo no C microbiano em Latossolos (Freitas et al., 2024)
<i>Mucuna pruriens</i>	Fixação biológica de N, reduz fertilizante mineral	↓ 12 kg N ha <sup>-1</sup> da adubação mineral (≈ 25–30%) (Sousa et al., 2021)
<i>Crotalaria juncea</i>	Alta produção de biomassa, reciclagem de nutrientes	Produção de 8,4 Mg ha <sup>-1</sup> de biomassa; aumento de MOS (Freitas et al., 2024)
<i>Vicia sativa</i>	Decomposição rápida, liberação acelerada de N	Liberação de 37 kg N ha <sup>-1</sup> em Argissolos (Sousa et al., 2021)
<i>Lolium multiflorum</i>	Alta biomassa no inverno; cobertura densa	↑ emissões de 118–119 kg CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> safra <sup>-1</sup> em arroz irrigado (Zschornack et al., 2016)
<i>Lotus corniculatus</i>	Leguminosa; FBN; melhora relação C/N da palhada	Em mistura com azevém: 6.691 kg CO <sub>2</sub> eq ha <sup>-1</sup> safra <sup>-1</sup> (Zschornack et al., 2016)

Fonte: Adaptado de Tanaka et al. (2025); Freitas et al. (2024); Sousa et al. (2021); Zschornack et al. (2016).

3.3 BIOCHAR COMO ESTRATÉGIA DE SEQUESTRO E VIABILIDADE ECONÔMICA

O biochar, produzido pela pirólise de biomassa sob baixa disponibilidade de oxigênio, tem sido estudado como estratégia de sequestro de carbono de longo prazo devido à sua elevada recalcitrância química e ao potencial de melhoria dos atributos do solo. Modelagem conduzida por Lefebvre et al. (2020) demonstrou que a aplicação de biochar derivado de resíduos de cana-de-açúcar, na dose de 4,2 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, poderia promover acréscimos médios de 2,35 ± 0,4 t C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> nos estoques de carbono do solo. Em escala regional, a adoção dessa prática em toda a área canavieira do Estado de São Paulo teria potencial de mitigar aproximadamente 50 Mt CO<sub>2</sub>e por ano, valor equivalente a 31% das emissões do estado em 2016.

Do ponto de vista agrônômico, experimentos realizados em Planossolo de baixa fertilidade por Castro et al. (2018) verificaram que a aplicação de 15 t ha<sup>-1</sup> de biochar de *Gliricidia sepium* elevou o pH do solo, aumentou a disponibilidade de fósforo e potássio e favoreceu o rendimento de feijão-de-vagem quando associado a adubação orgânica e inoculação microbiana. Em plantios de eucalipto, o biochar modulou o CO<sub>2</sub> do solo e atributos químicos (Silva et al., 2024a). A combinação biochar-composto elevou fertilidade e produtividade do milho (Tito et al., 2025). Esses resultados reforçam a capacidade do biochar de atuar como condicionador de solos tropicais de baixa fertilidade, ampliando a resiliência dos sistemas agrícolas (Petter et al., 2019).

Apesar do potencial identificado, a difusão do biochar em larga escala no Brasil ainda enfrenta desafios relacionados ao custo de instalação de unidades de pirólise, à logística de transporte e aplicação e à ausência de regulamentação específica quanto a parâmetros de qualidade (pH, teor de



carbono fixo e contaminantes). Esses fatores limitam sua inserção plena nas políticas públicas de mitigação agrícola. Ainda assim, os resultados de campo e modelagens econômicas sugerem que o biochar pode integrar estratégias de baixo carbono no setor agroindustrial, sobretudo em regiões de cultivo intensivo de cana-de-açúcar.

### 3.4 MANEJO HÍDRICO NO CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO

O arroz irrigado, predominante no Sul do Brasil, é reconhecido como uma das culturas agrícolas mais emissoras de metano ( $\text{CH}_4$ ), em razão da lâmina contínua de água que favorece condições anaeróbias. Ensaio conduzidos no Rio Grande do Sul demonstraram que áreas sob alagamento permanente apresentam emissões significativamente mais elevadas de  $\text{CH}_4$  em comparação a sistemas manejados com pousio. A inclusão de resíduos de culturas de inverno intensificou ainda mais os fluxos de  $\text{CH}_4$ , evidenciando a necessidade de integrar práticas agrícolas ao manejo hídrico para mitigar tais emissões (Zschornack et al., 2016A). Resultados convergentes foram observados em ensaios nacionais com manejo de resíduos e drenagem (Zschornack et al., 2016B).

A drenagem intermitente, caracterizada por ciclos planejados de alagamento e rebaixamento da lâmina de água, tem se mostrado a alternativa mais eficiente para mitigar emissões nesse sistema. Resultados indicaram reduções expressivas nos fluxos de  $\text{CH}_4$ , sem comprometer a produtividade média de grãos (Zschornack et al., 2016A). Contudo, essa prática intensificou a emissão de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) em períodos aeróbios, sobretudo em áreas adubadas com leguminosas, reforçando a necessidade de sincronizar irrigação e fertilização nitrogenada para reduzir os fluxos de  $\text{N}_2\text{O}$  (Lopes et al., 2018).

Do ponto de vista político-institucional, o manejo hídrico em arroz irrigado já foi incorporado ao portfólio do Plano ABC+, sendo considerado estratégia prioritária de mitigação e vinculado a linhas de crédito específicas. Em escala global, a FAO recomenda a adoção de drenagem alternada, ou Alternate Wetting and Drying (AWD), como técnica capaz de reduzir substancialmente as emissões de  $\text{CH}_4$  em arrozais, posicionando o Brasil como potencial protagonista na implementação de tecnologias sustentáveis em uma das culturas mais intensivas em metano.

Pesquisas recentes reforçam que o manejo hídrico, quando associado ao uso racional de fertilizantes, pode potencializar ainda mais a mitigação. Lopes et al. (2018) destacaram que a combinação de drenagem intermitente e adubação parcelada reduziu de forma significativa as emissões líquidas de GEE, mantendo a produtividade regional. Além dos benefícios ambientais, a técnica apresenta ganhos econômicos: produtores relataram reduções relevantes no consumo de água, aspecto fundamental em regiões com crescente escassez hídrica. Dessa forma, a drenagem intermitente consolida-se como prática de elevada eficiência climática e custo-benefício positivo, capaz de reposicionar a rizicultura brasileira na agenda de baixo carbono.



### 3.5 CANA-DE-AÇÚCAR E OTIMIZAÇÃO DO NITROGÊNIO

A cana-de-açúcar é considerada uma das culturas mais estratégicas para o Brasil, tanto por sua relevância na matriz energética quanto pela participação no mercado internacional de bioenergia. No entanto, a adubação nitrogenada aplicada à cultura é responsável por emissões significativas de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), gás de efeito estufa com potencial de aquecimento global cerca de 298 vezes superior ao  $\text{CO}_2$  (IPCC, 2006). Em média, estudos em canaviais brasileiros apontam fluxos anuais entre 2,0 e 6,0 kg  $\text{N}_2\text{O-N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , equivalentes a 600–1.800 kg  $\text{CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , dependendo do manejo (Sousa et al., 2021; Lopes et al., 2018). Esses valores colocam a cana no centro das discussões sobre mitigação de GEE no setor agrícola e energético.

Práticas de fertirrigação têm se mostrado altamente eficazes na redução dessas emissões. Lopes et al. (2018) verificaram que a aplicação subsuperficial por gotejamento reduziu em até 50% as emissões acumuladas de  $\text{N}_2\text{O}$  em comparação à adubação superficial, com fatores de emissão (EF) caindo de 4,26% para 1,69%. Em complemento, Tavares et al. (2018) demonstraram que a colheita crua, com manutenção da palhada no campo, resultou em saldo positivo de 1.484 kg  $\text{CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , associado à maior atividade microbiana e ao reaproveitamento da matéria orgânica. Resultados recentes confirmam menor  $\text{N}_2\text{O}$  com gotejamento e colheita crua (Faquim et al., 2024). Estudos indicam que as estratégias de reúso hídrico alteram estoques de C e N do solo em curto prazo, sistemas irrigados eficientes reduzem a pegada de carbono por unidade de produto (Carmo et al., 2016; Corrêa et al., 2021).

Do ponto de vista das políticas públicas, a cana-de-açúcar foi incorporada como cultura prioritária no Plano ABC+, vinculada a práticas como fertirrigação eficiente e colheita sem queima, apoiadas por linhas de crédito específicas do RenovAgro (Abreu et al., 2024). Essa integração é estratégica: estima-se que a adoção dessas tecnologias em 8 milhões de hectares de canaviais até 2030 possa reduzir mais de 12 Mt  $\text{CO}_2\text{eq}$  (Abreu et al., 2024; Embrapa, 2021). Além dos benefícios ambientais, tais medidas podem fortalecer a competitividade do setor sucroenergético em mercados internacionais de bioenergia e créditos de carbono.

Estudos complementares reforçam o papel da cana-de-açúcar na agenda de baixo carbono. Em condições tropicais do Nordeste, Tavares et al. (2018) observaram que a adoção simultânea da colheita crua, fertirrigação eficiente e manutenção da palhada reduziu emissões líquidas em até 1,6 t  $\text{CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , transformando a cultura em potencial sumidouro líquido de carbono. Resultados recentes também apontam que a aplicação de biochar em canaviais pode reduzir os fatores de emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  para aproximadamente 1% do N aplicado, valor inferior às estimativas padrão do IPCC (2006), além de aumentar a capacidade de troca catiônica do solo (Andrade et al., 2015; Petter et al., 2019). A integração da cana com o setor energético amplia a sinergia entre mitigação de emissões agrícolas e descarbonização da matriz elétrica, uma vez que o uso da palhada e do bagaço como bioenergia



substitui combustíveis fósseis (Silva et al., 2024B). Esses resultados evidenciam que a cana-de-açúcar deve ser tratada como eixo prioritário em programas nacionais de mitigação e em mercados globais de carbono.

### 3.6 PECUÁRIA SUSTENTÁVEL E RECUPERAÇÃO DE PASTAGENS

A pecuária brasileira responde por aproximadamente 60% das emissões de GEE do setor agropecuário, sendo o metano entérico a principal fonte (Guamán-Rivera et al., 2025). Em sistemas extensivos da Amazônia, a pegada de carbono pode atingir 16,2 kg CO<sub>2</sub>eq/kg de peso vivo, chegando a valores até quatro vezes maiores em sistemas de subsistência (Guamán-Rivera et al., 2025). Esses indicadores evidenciam a urgência da adoção de práticas mitigadoras, sobretudo em áreas de pastagens degradadas, que apresentam estoques de carbono inferiores aos observados em áreas florestais preservadas (Silva et al., 2024A). Fragmentos ripários mantêm estoques e estrutura de C superiores aos de áreas abertas (Soares et al., 2023).

Estratégias de recuperação de pastagens degradadas associadas a práticas como, adubação corretiva e introdução de espécies forrageiras adaptadas, mostram grande potencial de reversão desse cenário. Freitas et al. (2024) demonstraram que a conversão de pastagens degradadas em sistemas integrados no Cerrado promoveu incremento significativo nos estoques de carbono do solo. De forma semelhante, Ribeiro et al. (2023) verificaram maior labilidade e estabilidade do carbono em áreas de manejo conservacionista quando comparadas a pastagens convencionais. Sistemas silvipastoris (SPS) também se destacam: Tonini (2023) reportou mitigação das emissões entéricas e ganhos produtivos no bioma Pampa, enquanto Guamán-Rivera et al. (2025) observaram que a presença de árvores contribui para o conforto térmico animal e redução da intensidade de emissões por quilograma de carne. Sistemas integrados com frutíferas e ovinos também apresentam um grande potencial adicional de mitigação (Silva et al., 2024C).

As políticas públicas reforçam a centralidade do tema na agenda climática nacional. O Plano ABC+ estabeleceu a meta de recuperar 15 milhões de hectares de pastagens até 2030, com potencial de mitigação de 83 Mt CO<sub>2</sub>eq (Embrapa, 2021). Programas como o “Carne Carbono Neutro”, desenvolvido pela Embrapa, e iniciativas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) criaram mecanismos de certificação e remuneração que estimulam a adoção de sistemas de baixo carbono. Dessa forma, a pecuária sustentável não apenas contribui para a mitigação climática, mas também fortalece a imagem do Brasil como fornecedor global de proteína animal com diferenciação ambiental.

Do ponto de vista socioeconômico, a intensificação sustentável da pecuária gera impactos relevantes. Silva et al. (2024A) evidenciaram que pastagens bem manejadas apresentam maior fertilidade do solo e melhor disponibilidade de nutrientes, o que se reflete em ganhos de produtividade animal. De maneira complementar, Signor et al. (2022) mostraram que sistemas de produção animal



no semiárido podem ser ajustados para reduzir emissões líquidas de GEE, destacando a importância de integrar o manejo do solo e da forragem à mitigação. Além dos benefícios ambientais, a recuperação de pastagens representa maior geração de renda e redução da pressão pela abertura de novas áreas, contribuindo para conter o desmatamento.

### 3.7 INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA (ILPF)

A Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) é considerada uma das práticas mais completas do portfólio de baixo carbono, pois combina ganhos produtivos, ambientais e sociais em um mesmo arranjo tecnológico. O sistema promove sinergias entre componentes vegetais e animais, aumentando a resiliência agroecossistêmica em diferentes biomas brasileiros. Em áreas do Cerrado, Freitas et al. (2024) demonstraram que a conversão de pastagens degradadas em sistemas integrados promoveu incremento dos estoques de carbono no solo e melhoria da fertilidade. De forma complementar, Alcântara et al. (2024) verificaram que áreas de regeneração natural e sistemas de integração apresentaram maior estabilidade de agregados e maior proteção da matéria orgânica, confirmando o papel da ILPF na recuperação da qualidade do solo.

Do ponto de vista econômico, a ILPF oferece diversificação de renda ao integrar culturas anuais, pecuária e produção florestal, reduzindo riscos associados a variações de mercado. Experiências conduzidas no Sul do Brasil evidenciam ganhos expressivos: Tonini (2023) mostrou que sistemas silvipastoris vinculados à ILPF apresentaram incremento de produtividade animal e mitigação das emissões entéricas em comparação a sistemas convencionais. Além disso, análises de Ribeiro et al. (2023) reforçam que áreas sob sistemas integrados apresentam estoques de carbono mais elevados e maior estabilidade química do solo em relação aos monocultivos, consolidando a ILPF como modelo robusto de mitigação efetiva.

O Plano ABC+ estabeleceu a meta de expandir a adoção da ILPF para 10 milhões de hectares até 2030, com linhas de crédito específicas disponibilizadas pelo RenovAgro (Embrapa, 2021). Paralelamente, programas de capacitação e assistência técnica têm sido fortalecidos, uma vez que a complexidade de manejo exige conhecimentos especializados em fitotecnia, zootecnia e silvicultura. Nesse contexto, a ILPF deve ser entendida não apenas como tecnologia agrícola, mas como sistema de governança territorial, capaz de conciliar mitigação climática, adaptação e segurança alimentar em escala regional.

Além da mitigação direta de gases de efeito estufa, a ILPF promove serviços ecossistêmicos de alto valor. Em áreas de Cerrado, Tanaka et al. (2025) observaram que sistemas integrados aumentaram a estabilidade de agregados e melhoraram o potencial de infiltração de água no solo, fatores que favorecem a resiliência frente a secas prolongadas. Outro aspecto relevante é a contribuição da ILPF para a redução de queimadas: Abreu et al. (2024) destacaram que a diversificação de sistemas agrícolas





reduz a vulnerabilidade ao fogo, pela maior cobertura do solo e manutenção da umidade microclimática. Em solos de média fertilidade, a integração elevou fertilidade, estoque de C e estabilidade de agregados (Beutler et al., 2016; Silva et al., 2021). Do ponto de vista socioeconômico, Ozório et al. (2024) apontaram que a adoção de sistemas diversificados contribui para maior estabilidade produtiva, reforçando o potencial da ILPF como política de inclusão socioambiental. Esses resultados evidenciam que a prática transcende o escopo agrícola, configurando-se como estratégia de desenvolvimento rural sustentável em larga escala.

### 3.8 SISTEMAS AGROFLORESTAIS (SAFS) E SILVIPASTORIS (SPS)

Os SAFs e SPS integram árvores, cultivos agrícolas e animais em arranjos espacialmente planejados, aumentando a complexidade funcional e a resiliência dos agroecossistemas. Esses sistemas vêm sendo reconhecidos como alternativas de baixo carbono, com potencial para neutralizar emissões e ampliar os estoques de carbono em diferentes biomas brasileiros. Tonini (2023) demonstrou que a introdução de árvores em pastagens no bioma Pampa neutralizou o balanço líquido de metano entérico, resultando em saldo positivo de carbono em biomassa lenhosa e no solo. Na Amazônia, Guamán-Rivera et al. (2025) verificaram que sistemas SPS reduziram a intensidade de emissões por quilograma de carne e melhoraram o conforto térmico dos animais, reduzindo riscos em eventos de calor extremo.

Evidências recentes reforçam o papel estratégico dos SAFs e SPS. Tonini (2023) confirmou que sistemas silvipastoris no Pampa contribuem para neutralizar emissões entéricas, enquanto Guamán-Rivera et al. (2025) demonstraram que tais sistemas podem reduzir a intensidade de emissões de GEE na pecuária tropical. Do ponto de vista ambiental, Ozório et al. (2024) destacaram que sistemas integrados aumentam a matéria orgânica e a estabilidade dos agregados do solo, favorecendo o sequestro de carbono. Já análises de Baldotto & Baldotto (2018) mostram que a adoção de arranjos agroflorestais pode melhorar indicadores de qualidade do solo e garantir maior sustentabilidade de longo prazo.

Os co-benefícios associados são múltiplos e relevantes. Além da mitigação de gases de efeito estufa, SAFs e SPS promovem aumento da biodiversidade, conservação do solo e melhoria da dieta animal. Espécies arbóreas forrageiras, como *Gliricidia sepium* e *Tithonia diversifolia*, têm sido associadas ao aumento da eficiência alimentar do rebanho e à redução de perdas de nutrientes (Freitas et al., 2024; Ozório et al., 2024). Comparativamente, SAFs bem estruturados podem acumular estoques de carbono significativamente superiores aos monocultivos convencionais (Torres et al., 2017). Esses resultados reforçam o potencial das práticas agroflorestais para consolidar o Brasil como referência internacional em agricultura e pecuária de baixo carbono.

Do ponto de vista político-institucional, a adoção de SAFs e SPS ainda enfrenta barreiras, como altos custos iniciais e horizontes de retorno mais longos, todavia, estudos também indicam que SAFs



podem alcançar taxa interna de retorno positiva após o décimo ano, reforçando sua viabilidade econômica (Torres et al., 2024). O Plano ABC+ estabeleceu a meta de expandir esses sistemas para 4 milhões de hectares até 2030, oferecendo linhas de crédito (Embrapa, 2021). Além disso, a inclusão de SAFs e SPS em políticas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e em certificações de carbono, como o programa “Carne Carbono Neutro”, é considerada essencial para viabilizar economicamente sua difusão.

#### 4 CONCLUSÃO

O carbon farming constitui uma estratégia robusta, custo-efetiva e tecnicamente viável para a mitigação das mudanças climáticas no Brasil, cuja eficácia depende de arranjos institucionais estáveis de gestão. A análise sistemática da literatura científica, de relatórios institucionais e de evidências empíricas apontou para o aumento consistente dos estoques de carbono do solo e da biomassa, na redução líquida de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, na melhoria estrutural e biológica do solo e em ganhos produtivos associados alcançados pelas práticas conservacionistas avaliadas: SPD, culturas de cobertura, biochar, manejo hídrico em arroz irrigado, fertirrigação em cana-de-açúcar, pecuária sustentável, ILPF, SAFs e SPS.

No campo agrônomo, o SPD demonstrou ganhos de até 1,5 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, redução de erosão em cinco vezes e aumento de 30 a 40% na infiltração hídrica em comparação ao preparo convencional. As culturas de cobertura reduziram a necessidade de adubação nitrogenada mineral em 25 a 30%, associando fixação biológica ao aporte de biomassa. Em arroz irrigado, a drenagem intermitente reduziu as emissões de CH<sub>4</sub> em até 96%, embora acompanhada por picos de N<sub>2</sub>O que exigem manejo cuidadoso da irrigação e da adubação. Em canaviais, a fertirrigação subsuperficial reduziu as emissões de N<sub>2</sub>O em aproximadamente 50%, enquanto a colheita crua promoveu saldo positivo de 1.484 kg CO<sub>2</sub>eq ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

Na pecuária, sistemas silvipastoris e a recuperação de pastagens degradadas elevaram os estoques de carbono do solo em até 1,2 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e reduziram a intensidade das emissões entéricas, além de gerar co-benefícios como maior conforto térmico animal e redução de mortalidade em eventos de calor extremo. A ILPF destacou-se por ampliar estoques de carbono em até 2,8 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e aumentar em 40% a produtividade da carne em comparação a sistemas convencionais. Já os SAFs e SPS apresentaram taxas médias de sequestro de até 7 Mg C ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, além de diversificar a renda e promover serviços ecossistêmicos de alto valor.

Apesar dos avanços, persistem desafios que limitam a expansão plena do carbon farming. Entre eles estão a carência de fatores de emissão calibrados para solos tropicais, custos elevados de implantação em sistemas integrados, déficits de monitoramento climático e insuficiência de assistência técnica para agricultores familiares. A superação desses entraves requer políticas integradas que



combinem inovação científica, incentivos financeiros e extensão rural qualificada. O Plano ABC (2010–2020) atendeu 54 milhões de hectares e mitigou 193,7 Mt CO<sub>2</sub>eq, e sua continuidade com o ABC+ (2020–2030) projeta a expansão para 72,68 milhões de hectares até 2030. Em escala internacional, iniciativas como a RECSOIL/FAO reforçam a recarbonização dos solos como eixo central de mitigação e adaptação climática. A integração setorial com bioenergia também amplia o portfólio de mitigação.

Conclui-se que o carbon farming deve ser compreendido como pilar estratégico da agricultura de baixo carbono no Brasil. Sua adoção em larga escala tem potencial para reduzir emissões de GEE, garantir a permanência dos estoques de carbono, promover resiliência produtiva e valorizar serviços ecossistêmicos. Dessa forma, o país reúne condições para assumir protagonismo na agenda climática global, consolidando os solos agrícolas como ativos climáticos e fortalecendo a competitividade de sua agropecuária sustentável.

### **AGRADECIMENTOS**

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



**REFERÊNCIAS**

- ABREU, R. C. R. de et al. Land use change and greenhouse gas emissions: an explanation about the main emission drivers. *Ciência Animal Brasileira*, v. 25, e-77646E, 2024. DOI: 10.1590/1809-6891v25e-77646E.
- ACOSTA, J. A. A. et al. Decomposition and nutrient release of cover crops in different soil management systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 3, p. 1083–1092, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000400015.
- ALCÂNTARA, A. F. et al. Effect of soil management on carbon stock and soil aggregation in an area of natural regeneration and surrounding systems in the Atlantic Forest biome. *Revista Ambiente & Água*, v. 19, n. 2, e2987, 2024. DOI: 10.4136/ambi-agua.2987.
- AMELUNG, W. et al. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nature Communications*, v. 11, n. 5427, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>
- ANDRADE, C. A. de et al. Mineralização e efeitos de biocarvão de cama de frango sobre a capacidade de troca catiônica do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 50, n. 5, p. 407–416, 2015. DOI: 10.1590/S0100-204X2015000500008.
- ASSAD, E. D. et al. Agricultura sob cenários de mudanças climáticas: riscos, vulnerabilidades e adaptação. *Revista de Política Agrícola*, v. 31, n. 3, p. 57-76, 2022.
- BALDOTTO, L. E. B.; BALDOTTO, M. A. Indicators of soil quality, redox properties, and bioactivity of humic substances of soils under integrated farming, livestock, and forestry. *Revista Ceres*, v. 65, n. 4, p. 385–393, 2018. DOI: 10.1590/0034-737X201865040010.
- BEUTLER, S. J. et al. Soil chemical and physical attributes in integrated crop-livestock systems in the Brazilian Cerrado. *Soil & Tillage Research*, v. 161, p. 1-10, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.03.004>
- BAIÃO, C. F. P.; MASSI, K. G.; SOUSA JUNIOR, W. C. Long-term assessment of fire-induced carbon loss in Southeast Atlantic Forest. *Revista Árvore*, v. 48, e4824, 2024. DOI: 10.53661/1806-9088202448263806.
- CARMO, M. S. do et al. Energy balance and carbon footprint of irrigated common bean production. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 4475-4484, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.079>
- CARVALHO, A. M. et al. Soil N<sub>2</sub>O fluxes in integrated production systems, continuous pasture and Cerrado. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 108, p. 69–83, 2017.
- CARVALHO, A. M. et al. N<sub>2</sub>O emissions from sugarcane fields under contrasting watering regimes in the Brazilian Savannah. *Environmental Technology & Innovation*, v. 22, 101470, 2021.
- CASTRO, A. C. et al. The effects of Gliricidia-derived biochar on sequential cropping in Brazilian Planosol. *Sustainability*, v. 10, n. 3, 578, 2018. DOI: 10.3390/su10030578.
- CORDEIRO, L. A. M. et al. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 32, p. 15–43, 2015.



CORRÊA, R. S. et al. Wastewater reuse in irrigation: short-term impacts on soil carbon and nitrogen. *Agricultural Water Management*, v. 248, 106808, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106808>

DOS REIS, L. N.; CORAZZA, R. I. Políticas públicas de controle do desmatamento: avanços, retrocessos e perspectivas. *Revista de Administração Pública*, v. 59, n. 1, p. 112-134, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-761220240143>

EMBRAPA. Agricultura de Baixa Emissão de Carbono. Brasília: Embrapa, 2021.

FAQUIM, V. et al. Greenhouse gas mitigation in sugarcane systems through subsurface drip fertigation and green harvest. *Agricultural Systems*, v. 213, 103589, 2024.

FERREIRA, E. P. de B. Plantas de cobertura e adubação nitrogenada em milho e feijão-caupi em rotação. 2016. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2016.

FREITAS, I. C. V. et al. Changing the land use from degraded pasture into integrated farming systems enhance soil carbon stocks in the Cerrado biome. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 46, e63601, 2024. DOI: [10.4025/actasciagron.v46i1.63601](https://doi.org/10.4025/actasciagron.v46i1.63601).

FURTADO NETO, A. O. et al. Methane production and flux in central Amazon forest soils. *Biogeochemistry*, v. 145, n. 1-2, p. 1-16, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-019-00600-2>

GALDINO, S.; SIGNOR, D. Systematic review of greenhouse gas emissions in viticulture: a PRISMA-based analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 418, 138011, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138011>

GOMIDE, L. R. et al. Modeling aboveground carbon stock under the forest canopy influence. *Revista Árvore*, v. 48, e4826, 2024. DOI: [10.53661/1806-9088202448263778](https://doi.org/10.53661/1806-9088202448263778).

GUAMÁN-RIVERA, S. A. et al. Carbon footprint assessment of livestock farms under tropical conditions: first approximation. *Brazilian Journal of Biology*, v. 85, e293349, 2025. DOI: [10.1590/1519-6984.293349](https://doi.org/10.1590/1519-6984.293349).

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. EBSE Technical Report, Keele University, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/302924724>

LEFEBVRE, D. et al. Modelling the potential for soil carbon sequestration using biochar from sugarcane residues in Brazil. *Scientific Reports*, v. 10, 19479, 2020. DOI: [10.1038/s41598-020-76470-y](https://doi.org/10.1038/s41598-020-76470-y).

LOPES, F. de S. et al. Nitrous oxide emission in response to N application in irrigated sugarcane. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 11, p. 758–763, 2018. DOI: [10.1590/1807-1929/agriambi.v22n11p758-763](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n11p758-763).

MAGALHÃES, T. R. et al. Soil carbon stocks in Oxisols under different management in the southern Brazilian Plateau. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 48, e0230021, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230021>

OLIVEIRA et al. Carbono edáfico: O elo para o equilíbrio climático e a segurança alimentar. *Aracê – Direitos Humanos em Revista*, v. 7, p. 31680-31701, 2025.





OZÓRIO, J. M. B. et al. Effects of different agricultural systems on organic matter and aggregation of a medium-textured soil in subtropical region. *Revista Ambiente & Água*, v. 19, e2952, 2024. DOI: 10.4136/ambi-agua.2952.

PETTER, F. A. et al. Microbial biomass and organic matter in an Oxisol under application of biochar. *Revista Ceres*, v. 66, n. 3, p. 215–223, 2019. DOI: 10.1590/1678-4499.2018237.

ROSA, J. S. et al. Carbon dioxide evasion from agricultural catchments in the Amazon Basin. *Biogeosciences*, v. 14, p. 1225-1239, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-14-1225-2017>

RIBEIRO, J. F. et al. Carbon stocks and lability in land use and management systems in southwestern Goiás, Brazil. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 54, e74416, 2023. DOI: 10.1590/1983-40632023v5374416.

SACRAMENTO, J. A. A. S. et al. Spatial variability and changes in carbon stocks in Arenosols under different uses. *Catena*, v. 162, p. 45-55, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.021>

SALOMÃO, G. B. et al. Soil loss and runoff in cover crops under natural rainfall. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, e0190134, 2020. DOI: 10.36783/18069657rbcs20190134.

SANTOS, D. M. dos et al. Soil properties changing and carbon losses by anthropic drainage in savanna palm swamp (vereda), Central Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 46, e144, 2023. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220144>

SANTOS, M. J. et al. Surface energy balance and climate extremes in an Amazonian metropolitan region. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 147, p. 1915-1932, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03763-9>

SAVIOLI, N. L. et al. Brachiaria in crop rotation increases microbial biomass carbon in Cerrado soils. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 28, n. 3, p. 215–223, 2024. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v28n3p215-223.

SEVERO, L. S. et al. Stable carbon isotope ( $^{13}\text{C}$ ) to quantify tree biomass input to soil organic matter. *Applied Soil Ecology*, v. 113, p. 12-21, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.11.005>

SIGNOR, D. et al. Greenhouse gas emissions in goat production systems in the Brazilian semiarid region. *Small Ruminant Research*, v. 210, 106636, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2022.106636>

SILVA, J. E. et al. Soil fertility, carbon stock and aggregate stability under integrated crop-livestock-forestry systems. *Agroforestry Systems*, v. 95, p. 403-416, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00544-5>

SILVA, A. G. B. et al. CO<sub>2</sub> emission in soil under eucalyptus cultivation with biochar application. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 48, e80082, 2024A. DOI: 10.1590/1983-40632024v5480082.

SILVA, F. L. et al. Fertility and carbon stock in pasture and forest environments in the Southern Amazon. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 28, e270888, 2024B. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v28n1e270888.



SILVA, L. P. da et al. Olive-sheep integration systems as a low-carbon alternative in Southern Brazil. *Agroforestry Systems*, v. 98, p. 1121-1135, 2024C. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00885-4>

SOARES, J. C. et al. Carbon stock and horizontal structure in riparian forests of southern Brazil. *Ecological Indicators*, v. 146, 109840, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109840>

SOUSA, T. R. de et al. N<sub>2</sub>O emissions from soils under different uses in the Brazilian Cerrado – A review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 45, e0210093, 2021. DOI: 10.36783/18069657rbcs20210093.

SOUZA, S. N. M. de et al. Potential of biogas energy and greenhouse gas scenarios from municipal solid waste. *Renewable Energy*, v. 135, p. 1237-1245, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.046>

TANAKA, D. L. P. et al. Soil aggregation and organic carbon under different management systems in the Cerrado of Mato Grosso. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 38, e12508, 2025. DOI: 10.1590/1983-21252025v3812508rc.

TAVARES, R. L. M. et al. Sugarcane residue management impact soil greenhouse gas. *Scientia Agricola*, v. 75, n. 5, p. 422–431, 2018. DOI: 10.1590/1413-70542018422019817.

TITO, G. A. et al. Biochar and poultry litter compost improve soil fertility and maize yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 354, 109052, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109052>

TONINI, H. Avaliação financeira, estoque de carbono e mitigação de metano pelas árvores em sistemas silvipastoris no bioma Pampa. *Ciência Florestal*, v. 33, e70606, 2023. DOI: 10.5902/1980509870606.

TORRES, C. M. M. E. et al. Greenhouse gas emissions and carbon sequestration by agroforestry systems in southeastern Brazil. *Scientific Reports*, v. 7, 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-16821-4.

TORRES, C. M. M. E. et al. Economic viability of an agroforestry system for indigenous communities in Brazil: a differentiated approach to risk reduction. *Agroforestry Systems*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01077-0>

VILLANOVA, V. L. et al. Secondary forest succession increases carbon stocks in the Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management*, v. 432, p. 1-10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.038>

VITÓRIA, R. M. et al. Soil tillage scenarios and CO<sub>2</sub> emissions simulated by process-based models. *Agricultural Systems*, v. 197, 103320, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103320>

ZSCHORNACK, T. et al. Greenhouse gas emissions from irrigated rice as affected by crop residue management and intermittent irrigation. *Ciência Rural*, v. 46, n. 5, p. 851–857, 2016A. DOI: 10.1590/0103-8478cr20150032.

ZSCHORNACK, T. et al. Impacto de plantas de cobertura e da drenagem do solo nas emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O sob cultivo de arroz irrigado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, n. 9, p. 1031–1040, 2016B. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900016.

