



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS

Eduardo Erpen Fronza

**Potencial de sequestro de carbono em pastagens da região sul do Brasil:
uma revisão sistemática**

Florianópolis

2023

Eduardo Erpen Fronza

**POTENCIAL DE SEQUESTRO DE CARBONO EM PASTAGENS DA
REGIÃO SUL DO BRASIL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Agroecossistemas.

Orientador: Prof. Dr. Arcângelo Loss
Coorientador: Prof. Dr. Alexandre ten Caten
Coorientador: Dr. Felipe Bittencourt

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Fronza, Eduardo Erpen

Potencial de sequestro de carbono em pastagens da região sul do Brasil: uma revisão sistemática / Eduardo Erpen Fronza ; orientador, Arcângelo Loss, coorientador, Alexandre ten Caten, coorientador, Felipe Bittencourt, 2023.

59 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Agroecossistemas. 2. Pastagens. 3. Carbono. 4. Solos. 5. Mudança Climática. I. Loss, Arcângelo. II. ten Caten, Alexandre. III. Bittencourt, Felipe IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas. V. Título.

Eduardo Erpen Fronza

Potencial de sequestro de carbono em pastagens da região sul do Brasil: uma revisão sistemática

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Abdon Luiz Schmitt Filho, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Daisy Christiane Zambiasi, Dr.^a
Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão **original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Agroecossistemas.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Arcângelo Loss, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2023.

À minha falecida tia, Tânia Maria Erpen.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe e à minha irmã, por serem minha base e meu lar. Ao meu pai, pelos inúmeros ensinamentos.

Aos meus orientadores, Arcângelo Loss, Alexandre ten Caten e Felipe Bittencourt, bem como à Abdon Luiz Schmitt Filho, Eduardo Delgado Assad e Hizumi Seó, pelas importantes contribuições a esta pesquisa. À Henrique de Almeida Pereira pela troca nas definições iniciais, e à Laura Albuquerque da mesma forma, bem como pelo reconhecimento.

Ao time do Climas 2021/2022, em especial à Mariana Bertelli, Caroline Faria e Breno Rates, pelo suporte e contribuições que deram ao meu desenvolvimento profissional. À Maria Luiza Alcântara Costa e Renata Pimenta Piassi, pela espirtuosidade e companheirismo. À Talita Esturba, por compartilhar desafios, conhecimento e apoio.

À Raphael Camargo, por ser um destes irmãos que encontramos pela vida, e à Virgilio de Almeida Pereira pelo carinho e consideração.

Aos colegas do Centro de Economia Verde da Fundação CERTI, em especial André Souza Noronha Nepomuceno, Lucas Carregari Carneiro, Víctor Augusto Moreira, Guilherme Martins Aragão, Bernard Calafange Biton, Marcelo Pedroso Curtarelli, Janice Rodrigues Maciel e Marcos Aurelio Da-Ré, por serem parceiros, referência e fonte de inspiração.

Ao Núcleo de Educação Ambiental da UFSC (NEAmb) e todas as pessoas que por ele passaram, pelas inúmeras trocas, aprendizados, por serem fonte de sonhos, esperança e por terem sido parte das experiências que constituíram a fundação dos meus caminhos.

À Isabela Tsutiya Andrade, Rodrigo de Pinho Franco e Luiz Gabriel Catoira Vasconcelos, por serem pessoas maravilhosas e bons amigos.

*“A melhor época para plantar uma árvore
foi há 20 anos. A segunda melhor é agora.”*

– Provérbio Chinês

RESUMO

Desde a revolução industrial a atividade humana foi responsável pela emissão de aproximadamente 2500 Gt de CO₂, aumentando em 50% a concentração de CO₂ na atmosfera em relação aos níveis pré-industriais. O aumento deste e de outros gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera levou ao aquecimento global do planeta provocando o fenômeno da mudança climática, cujos efeitos incluem a desertificação e intensificação de eventos climáticos extremos como ondas de calor, secas e chuvas intensas. Estes refletem-se em perda de produtividade agrícola e piora das condições de vida humana, representando atualmente um dos maiores riscos globais para a sociedade. Em 2021 as emissões anuais do Brasil representaram cerca de 4,5% das emissões globais de GEE, com os setores de florestas, uso da terra e agropecuária responsáveis por aproximadamente 75% deste total, oriundas principalmente de desmatamento, degradação florestal e fermentação entérica. O país conta com mais de 150 milhões de hectares de áreas de pastagem, que representam aproximadamente 18% do uso do solo nacional, e aproximadamente 60% apresentam algum nível de degradação. Panorama semelhante é observado para a região sul do país. Buscando uma melhor compreensão sobre a capacidade de mitigação de emissões de GEE pelo manejo adequado destas áreas, este estudo conduziu uma revisão sistemática de literatura, identificando 23 publicações que reportaram valores de sequestro de carbono por pastagens manejadas em diferentes condições nas regiões sul e sudeste do Brasil. Em posse destes dados, foram selecionadas 17 publicações consideradas aderentes às premissas adotadas pela pesquisa, para estimar o potencial de sequestro de carbono (SEQ) pelo solo através da recuperação de pastagens da região sul do Brasil adotando técnicas conservacionistas e regenerativas de manejo agropecuário. Os resultados encontrados revelam que pastagens manejadas podem sustentar taxas de sequestro de carbono da ordem de 2,50 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ por períodos da ordem de 20 anos. Em razão da grande quantidade de variáveis que influenciam nas taxas de SEQ, da quantidade limitada de publicações encontradas, e da heterogeneidade e a ausência de dados para algumas destas variáveis entre as diferentes publicações, um conjunto maior de publicações e dados precisa ser analisado para ser possível estabelecer relações causais e de preponderância sobre o efeito de cada uma das diferentes variáveis nas taxas de SEQ encontradas. Nas atuais condições de ocupação das pastagens da região sul, é estimado que estas áreas teriam potencial para sequestrar de 0,433 a 1,273 Gt CO₂ ao final de um período de 20 anos, caso conduzidas sob práticas de manejo adequadas. Esta grandeza é pouco representativa para reduzir a concentração de CO₂ atmosférico de emissões legadas e contribuir significativamente para mitigar os efeitos das mudanças climáticas, reforçando a importância de priorizar a redução das emissões globais de GEE como principal estratégia de mitigação. Por outro lado, da perspectiva de mitigação das emissões nacionais anuais de GEE do setor agropecuário, este potencial não pode ser considerado desprezível. Por fim, a literatura sugere que o sequestro de carbono por solos sob manejo agropecuário pode desempenhar um papel relevante no combate à mudança do clima, integrando o conjunto de soluções e ações necessárias para uma trajetória compatível com as metas do Acordo de Paris, de limitar o aquecimento do planeta entre 1,5° e 2°C até o final do século.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Estoques de carbono; Sequestro de carbono; Pastagens; Manejo conservacionista; Regenerativo; Solo.

ABSTRACT

Since the industrial revolution, human activity has been responsible for the emission of approximately 2500 Gt of CO₂, increasing the atmospheric CO₂ concentration by 50% compared to pre-industrial levels. The increasing atmospheric concentration of greenhouse gases (GHG) led to planet's global warming, causing the phenomenon of climate change, whose effects include desertification and intensification of extreme weather events such as heatwaves, droughts and heavy rains. Among other consequences, these reflects in loss of agricultural productivity and worsening of human living conditions, currently representing one of the greatest global risks to society. In 2021 Brazil's GHG emissions accounted for about 4,5% of global emissions, with the forestry, land use and agricultural sectors being responsible for approximately 75% of total national emissions, mainly due to deforestation, forest degradation and enteric fermentation. The country accounts for more than 150 million hectares of pasture areas, representing nearly 18% of the national land use, with 60% of which presenting some level of degradation, in Brazil's southern region as well. Seeking for a better understanding of the GHG mitigation capacity through properly managing these areas, a systematic literature review was carried out, finding 23 publications that reported values for soil carbon sequestration (SEQ) by pastures managed under different conditions in the south and southeast regions of Brazil. According to the assumptions of soil SEQ potential considered by this research, 17 of such publications were selected to estimate hypothetical soil SEQ potential through recovery of southern Brazilian grasslands, if conservationist and regenerative cattle grazing management techniques were adopted in these areas. The results show that managed pastures may sustain carbon sequestration rates of about 2.50 Mg C ha⁻¹ year⁻¹ for periods such as 20 years. Due to the large number of variables that influence SEQ rates, the limited number of publications found, the heterogeneity and the lack of data for some of these variables among different publications, a larger set of publications and data needs to be analyzed in order to establish causal and preponderance relationships on the effect of each of those different variables on the SEQ rates found. Under the current pasture occupation conditions in Brazil southern region, it is estimated that these areas would have the potential to sequester from 0.433 to 1.273 Gt CO₂ at the end of a 20-year period, if conducted under appropriate management practices. This magnitude is not very representative for reducing the concentration of atmospheric CO₂ from legacy emissions and thus contribute significantly to mitigating the effects of climate change, reinforcing the importance of prioritizing the reduction of global GHG emissions as the main mitigation strategy. On the other hand, in the perspective of mitigation of annual national GHG emissions from the agricultural sector, this potential cannot be considered negligible. Finally, the literature suggests that carbon sequestration by soils under agricultural management can play a relevant role in combating climate change, integrating the set of solutions and actions necessary for a trajectory compatible with the goals of the Paris Agreement, of limiting the planet's warming of between 1.5° and 2°C by the end of the century.

Keywords: Climate change; Carbon stocks; Carbon sequestration; Pastures; Conservationist management; Regenerative; Soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classes de degradação de pastagens da região sul, comparação entre base de dados do LAPIG e MapBiomias.	21
Figura 2. Exemplos ilustrativos de pastagens degradadas (esquerda) e pastagens sem degradação (direita).	22
Figura 3. Durabilidade de remoções de carbono para diferentes métodos de armazenamento.	26
Figura 4. Mapa de localização da área de estudo.	31
Figura 5. Ilustração dos dados georreferenciados utilizados para condução das análises, sendo (a) Agrupamento de classes de solo do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos por Bernoux et al. (2002) e (b) Classes de degradação de pastagens no ano de 2021.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Níveis de degradação de pastagens do Brasil em 2021.	20
Tabela 2. Níveis de degradação de pastagens da região sul em 2021.	20
Tabela 3. Fatores de emissão para mudança do uso e ocupação do solo.....	25
Tabela 4. Variáveis utilizadas para a condução das análises.....	32
Tabela 5. Distribuição conceitual dos fatores de SEQ a serem utilizados nos cálculos de potencial estimado de sequestro de carbono por pastagens.....	35
Tabela 6. Derivação de classes texturais a partir de agrupamentos de solo.	36
Tabela 7. Cenários considerados e respectiva aplicação dos fatores de sequestro.....	36
Tabela 8. Resumo dos resultados encontrados para sequestro de carbono em pastagens a partir de revisão sistemática de literatura.....	40
Tabela 9. Fatores de SEQ considerados para cálculo do potencial estimado de sequestro de carbono pelo solo através de manejo adequado de pastagens da região sul do Brasil.	42
Tabela 10. Representatividade de classes texturais obtidas pela premissa aplicada ao agrupamento do SiBCS em classes de solo por Bernoux et al. (2002).	42
Tabela 11. Sequestro de carbono potencial calculado para os cenários considerados.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMP	<i>Adaptative Multi-Paddock Grazing</i>
ATER	Assistência Técnica e Extensão Rural
SbN	Soluções baseadas na Natureza
COS	Carbono orgânico do solo
EC	Estoque de carbono
ETS	<i>Emissions trading system</i>
EUA	Estados Unidos da América
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
GEE	Gases do Efeito Estufa
ILP	Integração lavoura-pecuária
ILPF	Integração lavoura-pecuária-floresta
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudança do Clima
IPF	Integração pecuária-floresta
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MHP	Manejo Holístico de Pastagens
MO	Matéria orgânica
MOS	Matéria orgânica do solo
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
ppm	Partes por milhão
PRV	Pastoreio Racional Voisin
QS	Qualidade do solo
REDD+	Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SEQ	Sequestro de carbono

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	17
2.1. Objetivo Geral.....	17
2.2. Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. Estoques de carbono dos solos e mudanças climáticas.....	18
3.2. Características e estado atual de pastagens no Brasil e região sul.....	19
3.3. Degradação, manejo e sequestro de carbono em pastagens bem manejadas.....	21
3.4. Instrumentos de precificação e valoração econômica de carbono	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
4.1. Qualidade dos dados	33
4.1.1. Áreas de pastagem.....	33
4.1.2. Qualidade de pastagens	33
4.2. Procedimentos metodológicos	34
4.2.1. Definição dos fatores de sequestro de carbono por pastagens	34
4.2.2. Potencial de sequestro de carbono pela recuperação e manejo de pastagens.....	35
4.2.3. Análise crítica dos resultados e de desafios e perspectivas associados à recuperação de pastagens em escala.....	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1.1. Definição dos fatores de sequestro de carbono por pastagens	37
5.1.2. Potencial de sequestro de carbono pela recuperação e manejo de pastagens.....	42
5.1.3. Análise crítica dos resultados e de desafios e perspectivas associados à recuperação de áreas degradadas em escala	43
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
APÊNDICE	59

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem sido observada uma preocupação crescente a respeito de como os impactos ambientais decorrentes da atividade humana afetam o planeta. Diante da taxa exponencial de crescimento da sociedade e da demanda por recursos sob o atual modelo de desenvolvimento econômico, o entendimento científico é de que esta dinâmica constitui uma ameaça à própria civilização e à vida na Terra como a conhecemos. Tal constatação é sustentada pela verificação de que estamos rompendo fronteiras planetárias que asseguram a estabilidade e manutenção de capacidades de suporte do planeta, essenciais à nossa sobrevivência (ROCKSTRÖM et al., 2009; STEFFEN et al., 2015; IPCC, 2021).

O aumento da atenção dada para este debate pode ser constatado pelo crescente número de publicações sobre o tema nas mais diferentes áreas do conhecimento, refletindo também em um aumento desta consciência por parte da sociedade. Essa realidade reflete-se pelo aumento da presença do tema em noticiários, políticas públicas, mecanismos de mercado e em acordos internacionais como o Protocolo de Kyoto (1992), Convenção da Diversidade Biológica (1992), Metas de Aichi (2010) e o Acordo de Paris (2015), que apesar das contradições e limitações do multilateralismo, desempenham um importante papel na tentativa de endereçar os desafios planetários.

O debate internacional tem se construído de modo a buscar evitar ou amenizar, através de adaptação e mitigação, as principais ameaças já materializadas e também sendo projetadas para o futuro, caso sigamos as tendências historicamente observadas. Tais ameaças incluem perdas drásticas de biodiversidade e de produtividade dos solos, processos de desertificação, depleção de recursos naturais e a intensificação das mudanças climáticas provocadas pelo aquecimento global, que além de contribuir para o aumento na frequência e intensidade de eventos extremos, também amplifica os demais impactos listados (IPCC, 2021; TRENBERTH et al., 2007). Devido a essas características, a mudança climática e seus efeitos associados tem sido considerada como o maior risco global de médio prazo para a sociedade (WEF, 2023).

Desde o final do ano de 2019 uma materialização alarmante destas ameaças tem sido vista, com ondas de calor massivas e incêndios de escalas sem precedentes ocorrendo na Sibéria, Austrália, Grécia e Estados Unidos. Também uma temporada atípica de furacões no Atlântico Norte em 2020, e tempestades com ventos e índices de precipitação recordes que provocaram impactos devastadores na Itália, China e Alemanha em 2021, deixando milhares de mortos e prejuízos milionários. Mais recentemente, o mês de julho de 2023 foi atribuído como o mais quente já registrado no planeta (WMO, 2023), num ano que registrou ondas de calor massivas acometendo a América do Norte, Europa e Ásia, bem como temporadas de incêndio extraordinárias no Canadá e Havaí.

Em um recorte nacional, o Brasil enfrentou em 2019 uma estiagem prolongada que afetou principalmente o sul e sudeste do país, com reservatórios chegando a volumes críticos, e contribuindo para a uma crise energética a nível nacional. Soma-se a isso incêndios de proporções jamais vistas no bioma Pantanal, ondas de calor de grandes proporções ao longo de todo o território como o episódio da primeira quinzena de outubro/2020, e tempestades de areia, também chamadas *haboobs*, que acometeram os estados de São Paulo e Minas Gerais em 2021. Estes eventos se inserem num contexto de tendências de médio prazo já observadas para

intensificação de eventos extremos como ondas de calor, secas e chuvas intensas (AVILA-DIAZ et al., 2020; CERÓN et al., 2020; CHAGAS, 2019; FRONZA, 2020).

É de amplo conhecimento e consenso científico que a tendência de aquecimento observada no planeta e a intensificação de eventos extremos relacionados, vem sendo provocadas por emissões antropogênicas de GEE, provenientes principalmente da queima de combustíveis fósseis, seguido por mudanças no uso da terra. O sexto e mais recente relatório de avaliação do IPCC, órgão colegiado da ONU que reúne cientistas de todos os continentes do globo e é autoridade máxima sobre o estado da arte da ciência climática, atestou que é inequívoca a afirmação de que a influência humana aqueceu a atmosfera, oceanos e territórios continentais através de emissões antropogênicas de GEE (IPCC, 2021). O órgão ainda destaca a necessidade urgente de ações para evitar consequências irreversíveis para a humanidade e o planeta (IPCC, 2022).

Mundialmente, agricultura e conversões de ecossistemas nativos para agrossistemas, contribuem com aproximadamente 24% das emissões mundiais de CO₂, 55% das emissões de CH₄ e 85% do total das emissões de N₂O para a atmosfera (IPCC, 2007), colocando o Brasil como 4º maior emissor histórico de CO₂ (CARBONBRIEF, 2021), e atualmente responsável por cerca de 4,4% das emissões globais de GEE (SEEG, 2023; OUR WORLD IN DATA, 2023). Cerca de 75% das emissões brutas (em tCO₂e) do país são provenientes dos setores agropecuário e uso da terra, sendo no ano de 2021 de 24,8% e 49% respectivamente (SEEG, 2023), enquanto o PIB agregado do agronegócio representou cerca de 27,5% do PIB nacional (CEPEA, 2022). As emissões totais do país para o período de 2000 a 2020 estão situadas em patamares semelhantes aos atuais, com mudanças no uso da terra e agricultura representando aproximadamente 52% e 24%, respectivamente (SEEG, 2023).

Deduzindo-se as remoções de carbono promovidas por vegetação e uso do solo, a atividade agropecuária representou em 2021 um total de 34,2% das emissões líquidas de GEE nacionais, dos quais 63,7% são provenientes somente de fermentação entérica, as quais somam cerca de 16% das emissões brutas e 22% das emissões líquidas do país. Neste mesmo ano, o Brasil reunia de 95 a 100 milhões de hectares de pastagens degradadas, o que representa quase dois terços da área total de pastagens do país (LAPIG, 2023; MAPBIOMAS, 2023). No âmbito do Acordo de Paris, além de tornar-se *Net Zero* até 2050, o Brasil também se comprometeu voluntariamente a até 2030 reduzir as emissões nacionais em 43% e a restaurar 15 milhões de hectares de pastagens degradadas.

Sabe-se que certos sistemas agrícolas e condições de manejo podem mitigar a emissão de GEE para a atmosfera, contemplando efeitos de maximização do sequestro de carbono (SEQ) pelo solo e pela vegetação (CARVALHO et al., 2010a; QUINTÃO et al., 2021). No contexto da agricultura e uso da terra, *manejo* pode ser entendido como o conjunto de práticas adotadas pela intervenção humana em uma paisagem, como por exemplo fertilização, aplicação de dejetos, plantio direto, rotação de culturas, entre outros. Além de contribuir para a mitigação dos efeitos negativos de mudanças climáticas, quando realizadas de forma correta, ações e práticas de manejo voltadas ao sequestro de carbono também promovem o uso sustentável dos recursos naturais e a melhoria do bem-estar de comunidades rurais (TITO et al., 2009).

Neste sentido, há uma série de estudos e autores que exploraram esta capacidade em solos manejados sob pastagem no Brasil, porém com concentração predominante nos biomas

Amazônia e Cerrado (OLIVEIRA et al., 2021; CARVALHO et al., 2010b; SEGNINI et al., 2007; BUSTAMANTE et al., 2006; CERRI et al., 2003; BERNOUX et al., 1998; NEILL et al., 1997; MORAES et al., 1996). Apesar de um já estabelecido conhecimento a respeito deste potencial, e da existência de mecanismos de valoração do serviço ambiental de sequestro de carbono da atmosfera, ainda persistem índices significativos de degradação de áreas no território nacional e do sul do país, evidenciando possíveis barreiras para reversão desse cenário.

Assim, considerando-se: a importância tanto econômica quanto climática que a agricultura e uso da terra possuem no contexto brasileiro; o potencial para redução de emissões e promover remoções de carbono nestes setores através de práticas voltadas à mitigação de GEEs; a baixa visibilidade de estudos voltados para sequestro de carbono em pastagens na região sul do Brasil; esta pesquisa buscou identificar o potencial de sequestro de carbono no solo pelo manejo destes sistemas, através de uma revisão sistemática de literatura. Por fim, é ponderada a relevância que este serviço ambiental pode representar para o contexto global da mudança do clima, considerando as atuais condições das áreas de pastagem localizadas neste recorte geográfico, bem como as oportunidades e desafios associados à transição para práticas agropecuárias sustentáveis em escala.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Identificar o potencial de sequestro e estocagem de carbono pelo solo através do manejo de áreas de pastagem da região sul do Brasil.

2.2. Objetivos Específicos

- Definir fatores de sequestro de carbono por pastagens bem manejadas na região sul a partir de dados elencados disponíveis em literatura;
- Calcular o potencial de sequestro de carbono pelo solo de pastagens brasileiras mediante recuperação de degradações e condução sob boas práticas de manejo;
- Ponderar a relevância das quantidades potenciais de carbono sequestrado para redução da concentração de CO₂ atmosférico, e desafios e perspectivas associados à escalabilidade de sequestro de carbono pela recuperação de áreas degradadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Estoques de carbono dos solos e mudanças climáticas

O estoque global de carbono nos solos é da ordem de 2500 Gt, divididos em aproximadamente 1550 Gt de carbono orgânico do solo (COS) e 950 Gt de carbono inorgânico do solo, representando ao total cerca de 2,8 vezes a atual quantidade de carbono atmosférico (890 Gt) e 4,5 vezes o tamanho do estoque biótico (560 Gt) (NOAA, 2022; LAL et al., 2004a). O carbono transita entre estes três grandes reservatórios de forma natural, principalmente pela interação entre vegetação e atmosfera por meio da fotossíntese e da respiração (DHILLON & VON WUEHLISCH, 2013), num processo que pode ser entendido como ciclo biológico ou ciclo curto do carbono. Este ciclo tem sua duração contabilizada na ordem de dezenas de anos, enquanto o ciclo geológico ou ciclo longo por sua vez, tem grandeza de centenas de milhares a milhões de anos (LEMOS et al., 2010).

Desde a revolução industrial a atividade humana foi responsável pela emissão de aproximadamente 2500 Gt de CO₂, dos quais cerca de 40% concentraram-se na atmosfera, tendo o restante sido absorvido pelos oceanos e continentes (FRIEDLINGSTEIN, 2020). Isso significa, portanto, cerca de 280 Gt de carbono adicionais na atmosfera em relação aos níveis pré-industriais, resultando num aumento de aproximadamente 50% da concentração de CO₂ atmosférico, que passou de 285ppm no ano de 1850 para atuais 422ppm (EEA, 2019; NOAA, 2023). A maior parte do carbono emitido é de origem fóssil (FRIEDLINGSTEIN, 2020), tendo sido transferido do ciclo longo para o ciclo curto do carbono, provocando um desequilíbrio no balanço energético da Terra e levando às mudanças climáticas e ao aquecimento global (SHUCKMANN et al., 2020; WESTERHOLD et al., 2020).

A principal troca de C entre a terra e a atmosfera resulta dos processos de fotossíntese, onde energia solar e CO₂ atmosférico são absorvidos e armazenados na forma de biomassa e compostos químicos, também chamados de fotoassimilados (OLIVEIRA et al., 2020a; FAYAD et al., 2019). Por meio da translocação dos produtos da fotossíntese para a zona radicular das plantas, até 40% do C fixado pode ser liberado para o solo via processo de rizodeposição, podendo uma parte deste ser retido no solo e assim aumentando os níveis de COS (MARSCHNER, 2012; LOSS et al., 2019).

O carbono é um dos principais constituintes da matéria orgânica (MO), cuja taxa de incorporação ao solo é controlada principalmente por dois fatores: produtividade primária líquida e taxa de decomposição (LÜTZOW et al., 2006). Estes fatores e o aumento dos níveis de matéria orgânica do solo (MOS) são influenciados pelas características físicas e químicas do solo, condições climáticas, uso da terra e práticas de manejo empregadas (USSIRI & JOHNSON, 2003). O aumento dos teores de MOS e, por conseguinte de COS, promove a ativação de diversos processos químicos, físicos e biológicos, resultando em uma melhora de diferentes qualidades do solo, como resistência à erosão, aumento da taxa de infiltração e retenção de água, resistência à compactação e melhorias na agregação e fertilidade dos solos (CONCEIÇÃO et al., 2005; BRAIDA et al., 2007; BALDOTTO et al., 2015).

Desse modo, o sequestro de carbono atmosférico através da fixação de CO₂ pelas plantas e seu posterior armazenamento no solo (MARSCHNER, 2012; LOSS et al., 2019), age como mitigador das mudanças climáticas, restaura solos degradados, aumenta a produção de biomassa e melhora a capacidade do solo em cumprir suas funções (LAL, 2004b; VEZZANI &

MIELNICZUK, 2009), e pode ser compreendido como um serviço ecossistêmico de extrema relevância, por contemplar ao mesmo tempo aspectos de regulação, provisão e suporte (PARRON et al., 2019). Estima-se que 40% de todo o C armazenado em solos da América Latina esteja em território Brasileiro, sendo da ordem de 39, 52, 72 e 105 Gt para as camadas de 0–30, 0–50, 0–100 e 0–200 cm de solo, respectivamente (BERNOUX & VOLKOFF, 2006), evidenciando que os acúmulos são proporcionalmente maiores nas camadas mais superficiais.

3.2. Características e estado atual de pastagens no Brasil e região sul

O Brasil possui o maior rebanho bovino comercial do mundo, e mundialmente ocupa a segunda posição no ranking dos maiores exportadores de carne bovina, sendo predominante a produção pecuária extensiva a base de pasto, cujas áreas ocupam aproximadamente 20% do território nacional (EMBRAPA, 2021; DIAS-FILHO, 2011; PARENTE et al., 2019). Em 2021, o país possuía mais de 220 milhões de bovinos distribuídos em mais de 2,5 milhões de propriedades rurais (IBGE, 2021, 2019a).

Nas últimas décadas houve um crescimento acentuado da atividade pecuária, tendo sido acompanhado por um aumento da área ocupada por pastagens, a partir da conversão de outros usos da terra para esta modalidade (VIEIRA-FILHO & FISHLOW, 2017; PARENTE et al., 2019), revelando, portanto, a importância que o tema pastagens representa em termos econômicos e ambientais para o país. Sob a categoria de uso do solo com pastagens podem ser subdivididos três grandes grupos, conforme sumarizado por Costa (2003):

- **Pastagens naturais:** Quando a vegetação original em estágio clímax é composta principalmente de espécies herbáceas, ou espécies herbáceas e arbustos (WILLIAMS & BLAKELY, 1967; COSTA, 1973; COSTA, 1976).
- **Pastagens nativas:** Quando após a destruição parcial ou total da vegetação original, a área é ocupada por espécies nativas espontâneas de caráter herbáceo e com valor forrageiro (WILLIAMS & BLAKELY, 1967; COSTA, 1976).
- **Pastagens artificiais ou cultivadas:** Pastagens estabelecidas pela introdução de espécies exóticas ou nativas em áreas onde a vegetação original não fosse caracterizada como pastagem natural (COSTA, 2003).

Destas três classes listadas, a terceira classe é a mais representativa em termos de ocupação do território nacional, com o gênero *Brachiaria spp.* concentrando as espécies forrageiras mais utilizadas em pastagens nacionais, presente em aproximadamente 70% das áreas de pasto cultivado, com destaque para as espécies *Brachiaria decumbens*, introduzida na década de 1960, e *Brachiaria brizantha*, introduzida em 1984 (ZIMMER et al., 2007; MACHADO et al., 2010).

Espécies do gênero *Panicum* também representam percentual representativo das variedades utilizadas, conforme identificado por Macedo (2005) em levantamento realizado para o bioma Cerrado. A ausência de uma base de dados oficial sobre área de pastagem plantada e informações sobre a distribuição espacial de variedades de espécies é identificada como uma lacuna pelo autor. Outros gêneros que podem ser encontrados em pastagens cultivadas nacionais incluem *Cynodon*, *Andropogon*, *Stylosanthes*, *Hemarthria*, *Arachis*, *Avena*, *Pennisetum*, *Sorghum*, *Arachis* e *Paspalum* (MACHADO et al., 2010).

Levantamentos realizados a partir de sistemas de classificação de imagens de satélite, buscando monitorar a evolução da área total e nível de degradação das pastagens brasileiras, mostraram que para o ano de 2021, o Brasil apresentava mais de 150 milhões de hectares de terra sob uso de pastagem, com mais da metade apresentando algum nível de degradação (LAPIG, 2023; MAPBIOMAS, 2023), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Níveis de degradação de pastagens do Brasil em 2021.

Nível de Degradação	LAPIG		MapBiomias	
	Área total (Mha)	Área relativa (%)	Área total (Mha)	Área relativa (%)
Ausente	58,16	36,59	56,59	37,20
Moderada	65,82	41,41	62,33	40,98
Severa	34,98	22,00	33,19	21,82
Total	158,96	18,68²	152,11	17,87²

² Em relação à área total do país. Fontes: LAPIG (2023) e MapBiomias (2023).

A série histórica de dados para qualidade de pastagem disponibilizada pelo LAPIG (2023) apresenta uma evolução de um total de 73,97% dos 164,465 Mha de áreas de pastagem no ano de 2000 apresentando algum nível de degradação – divididos em 40,22% de degradação moderada e 33,75% degradação severa – para 158,985 Mha em 2021 com 63,41% das áreas de pasto apresentando algum nível de degradação, divididos em 41,41% de degradação moderada e 22,00% de degradação severa.

Já para a região sul, a série histórica evolui de um total de 17,528 Mha em áreas de pastagens em 2020 com 50,98% apresentando degradação – divididos em 40,14% de degradação moderada e 10,84% de degradação severa – para uma área total de 10,665 Mha em 2021, porém com 52,34% apresentando algum nível de degradação, divididos em 38,19% de degradação moderada e 14,15% de degradação severa (LAPIG, 2023), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Níveis de degradação de pastagens da região sul em 2021.

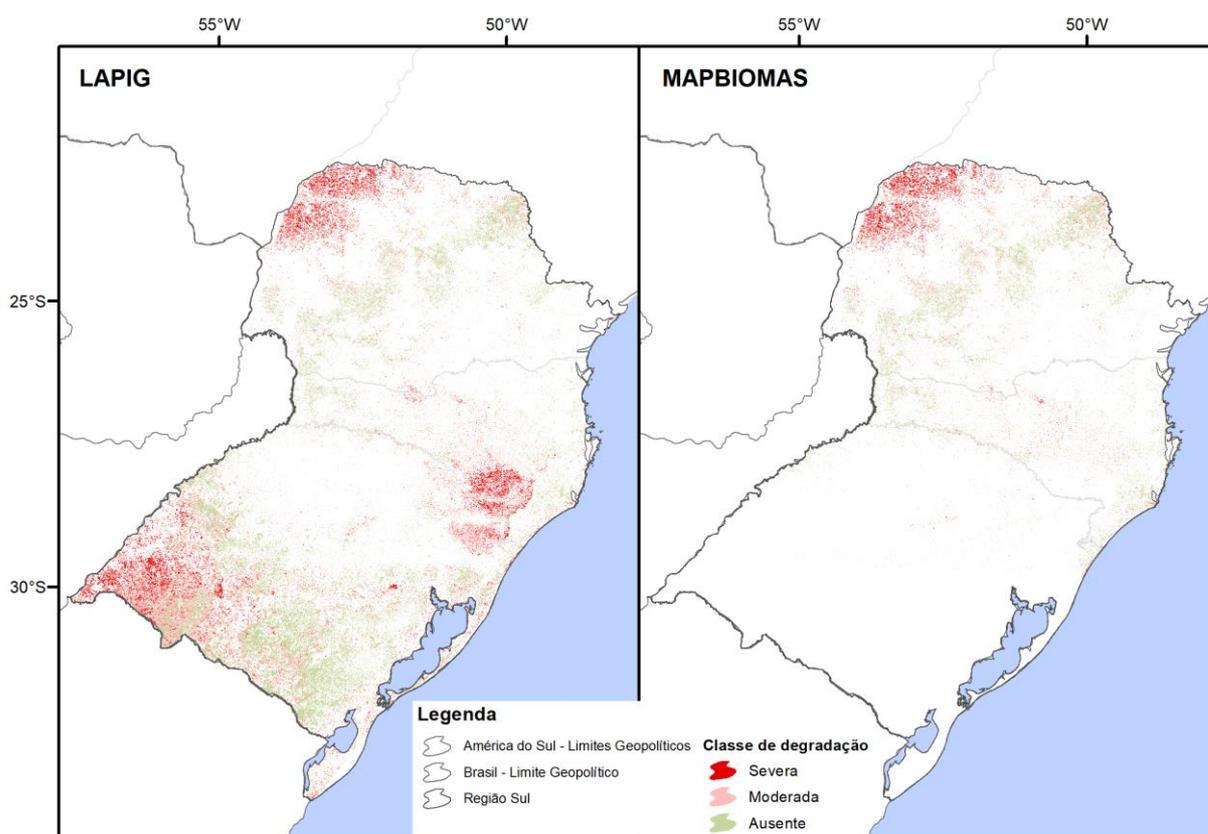
Nível de Degradação	LAPIG		MAPBIOMAS	
	Área total (Mha)	Área relativa (%)	Área total (Mha)	Área relativa (%)
Ausente	5,08	47,65	1,67	50,37
Moderada	4,07	38,19	1,12	33,80
Severa	1,51	14,16	0,52	15,83
Total	10,66	18,49³	3,31	5,75³

³ Em relação à área total da região sul. Fontes: LAPIG (2023) e MapBiomias (2023).

Considerando-se os dados disponibilizados pelo LAPIG (2023), enquanto a nível nacional houve uma retração de 3,33% da área total ocupada por pastagens entre os anos 2000 e 2021, com o remanescente melhorando os índices de qualidade em 10,56%, já a região sul

apresentou uma retração de 60,84%, e com os índices de qualidade mantendo-se relativamente estáveis, porém com um acréscimo de 1,36% aos níveis de degradação, com aumentos ainda maiores para os índices de degradação severa. É válido também destacar as divergências observadas entre os dados disponibilizados pelo LAPIG e MapBiomias, especialmente para a região sul. Isto se dá principalmente pela ausência dos dados do bioma Pampa na segunda plataforma, mas também são observadas divergências espaciais quanto a classificação do nível de degradação da pastagem para um mesmo pixel quando comparadas as duas bases de dados.

Figura 1. Classes de degradação de pastagens da região sul, comparação entre base de dados do LAPIG e MapBiomias.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de LAPIG (2023) e MapBiomias (2023).

A evolução evidenciada pela série histórica revela uma melhora na qualidade das pastagens nacionais ao longo das últimas duas décadas, indicando que a recuperação da qualidade de pastagens brasileiras é um desafio de superação possível, com resultados substanciais podendo ser alcançados no médio prazo. Também revela que apesar dos resultados já alcançados, os índices de degradação ainda podem ser significativamente melhorados.

3.3. Degradação, manejo e sequestro de carbono em pastagens bem manejadas

A degradação de uma pastagem é um processo evolutivo de perda de vigor, produtividade e da capacidade de sustentar os níveis de produção e qualidade exigidas pelos animais, assim como de superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e plantas invasoras, em razão de manejos inadequados, culminando com a degradação avançada (MACEDO & ZIMMER, 1993; TOWNSEND et al., 2012). Uma das características indicativas mais notadas

no processo de degradação das pastagens é a perda da capacidade de suporte animal ao longo do tempo. Em fases mais avançadas, ou concomitantemente, podem ocorrer infestação de plantas invasoras, ocorrência de pragas e a degradação da qualidade do solo (ZIMMER et al., 2012). O conceito de qualidade do solo (QS) compreende o conjunto de funções e características que o permitem aceitar, estocar e reciclar água, nutrientes e energia, sustentando a produtividade e promovendo a saúde das plantas e animais (CARTER, 2001; DORAN, 1997). Assim, *degradação* pode ser também entendida como a perda ou diminuição em algum nível destas propriedades que asseguram ao solo a capacidade de cumprir suas funções na natureza.

Figura 2. Exemplos ilustrativos de pastagens degradadas (esquerda) e pastagens sem degradação (direita).



Fonte: Elaborado pelo autor com imagens obtidas de Compre Rural, Agropecuária Agroparceria, Esteio Gestão Agropecuária e Aprenda Fácil Editora.

O processo de degradação de pastagens é dinâmico e caracterizado por um conjunto de causas e efeitos que interagem e ocasionam a gradativa diminuição da sua capacidade de suporte, estando associado sobretudo às características de manejo adotadas (TOWNSEND et al., 2012). De maneira ampla, a definição de *manejo* pode ser entendida como a forma como se dá a intervenção humana em uma paisagem pelo conjunto de práticas adotadas. Em respeito ao manejo de pastagens, pressão de pastejo e/ou taxa de lotação animal é um aspecto crítico, pois em condições inadequadas leva a eliminação da população de forragem, não permitindo sua recuperação adequada entre ciclos de pastejo, seja pelo corte abaixo das gemas de rebrote das touceiras, seja pelo pisoteio excessivo. Esse fator leva à compactação do solo e deterioração geral da população de plantas forrageiras, criando falhas e solo exposto, que leva a um segundo problema, a proliferação das plantas daninhas nas áreas de solo desnudo (CÁCERES, 2020).

Quando consolidado este cenário, a estratégia de intervenção para sua reversão depende do estágio de degradação observado. Em casos de menor severidade pode ser adotada a prática de recuperação, que consiste na eliminação de plantas daninhas, ajuste da fertilidade do solo com adubação, e replantio da forragem onde o pasto está descoberto. Em casos de degradação mais severa, pode ser necessária a renovação/reforma da pastagem, que consiste na completa reestruturação de toda cobertura vegetal da área, suspendendo a atividade pecuária temporariamente. Quanto mais avançado o estágio de degradação, maiores serão os investimentos necessários (CÁCERES, 2020; TOWNSEND et al., 2012).

Tendo a degradação entendida como a perda da QS e conseqüentemente de suas capacidades produtivas e propriedades funcionais, o manejo adequado ou conservacionista de um sistema produtivo pode ser entendido como aquele capaz de evitar ou reverter as características de degradação. Ou na perspectiva contrária, aquele capaz de sustentar ou recuperar a QS. Sabe-se que diferentes tipos de manejo agrícola em áreas de plantio de lavouras, silvicultura e pastagens influenciam diretamente na QS, especialmente no que diz respeito a sua agregação e teores de carbono (BRAIDA et al., 2007; VEZZANI & MIELNICZUK, 2009). Dessa forma, o manejo adotado pode contribuir para a observação de melhores ou piores condições destes indicadores, sendo a adoção de práticas de manejo sem revolvimento do solo como aração e gradagem, e a presença constante de plantas, preferencialmente de espécies variadas, algumas das práticas que favorecem a manutenção e melhoria dos EC e da QS (FAYAD et al., 2019).

Neste sentido, tratando-se especificamente do manejo de pastagens, diferentes estudos publicados em literatura destacam o potencial e a capacidade de sistemas como o Pastoreio Racional Voisin (PRV), *Adaptive Multi-Paddock Grazing* (AMP) e o Manejo Holístico de Pastagens (MHP) em contribuir com aumento dos estoques de carbono (EC) no solo e atingindo patamares maiores do que sistemas de manejo convencionais (MOSIER et al., 2021; STANLEY et al., 2018; SEÓ et al., 2017). Tal capacidade decorre do fato de que estes sistemas favorecem a redução da erosão por sobrepastoreio, que pode remover a cobertura do solo o expondo à erosão. Além disso, também por contribuírem para um melhor aporte e distribuição de nutrientes provenientes de excretas, bem como do período de pousio ideal para manutenção da zona de raízes e recomposição da parte aérea da vegetação (MACHADO, 2004; MACHADO FILHO et al., 2021), o que não é controlado nos sistemas de manejo extensivo. Áreas de confinamento intensivo, por sua vez, geralmente estão associadas com erosão das áreas, e conseqüente perda de carbono no solo (IZAURRALDE et al., 2007; OLSON et al., 2016).

Para além das práticas de manejo, níveis de estoque e taxas de sequestro de carbono no solo variam em função de diferentes fatores, como material de origem, processos pedogenéticos, textura do solo, quantidade de ciclagem e aporte de MO e condições climáticas, com estoques maiores de carbono em geral sendo alcançados para condições de menores temperaturas e maiores pluviosidades (JENNY, 1941; HENGL et al., 2015; GOMES et al., 2019). Segundo Lal et al. (1998) para se atingir o estoque máximo possível são necessários pelo menos 50 anos de manutenção do solo, porém a taxa de incremento não necessariamente será constante ao longo de todo este período.

Em estudo publicado nos EUA, pastagens conduzidas sob método de manejo AMP, apresentaram em média 13% a mais de carbono no solo para a profundidade de 0–100cm

quando comparadas as pastagens manejadas convencionalmente (MOSIER et al., 2021). Considerando que o efeito da dinâmica de raízes do pasto sobre o EC é preponderante principalmente na camada de 0–50cm, para os horizontes superficiais do solo esse ganho é ainda maior. Nas camadas de 0–20cm e 20–40cm, por exemplo, valores de EC em pastagens manejadas pelo método de PRV, foram 20 e 25% superiores, respectivamente, quando comparadas a áreas cultivadas sem aração e gradagem (SEÓ et al., 2017).

Sistemas de manejo AMP, avaliados durante um período de 4 anos de manejo, apresentaram variações do EC do solo de aproximadamente 2 a 5 Mg C ha⁻¹ ano para a camada de 0–30cm, sendo: 2,04 Mg C ha⁻¹ ano para solos de textura arenosa; 3,84 Mg C ha⁻¹ ano para solos de textura argilo-arenosa; e 4,94 Mg C ha⁻¹ ano para solos argilosos (STANLEY et al., 2018). Uma taxa de sequestro com valor de 3,59 Mg C ha⁻¹ ano foi proposta pelos autores, considerando a média obtida a partir das três diferentes texturas de solo avaliadas. A hierarquia de valores para taxa de sequestro de carbono em diferentes classes texturais de solo apresentados por Stanley et al. (2018) corroboram os resultados encontrados em revisão de literatura por Oliveira et al. (2015).

Dados compilados por Mello et al. (2006) sugerem uma taxa de sequestro de carbono de 2,71 Mg C ha⁻¹ ano para a camada 0–20cm em pastagens no bioma Mata Atlântica. Para pastagens bem manejadas no bioma Amazônia, foram reportados valores de sequestro na ordem de 2,7 a 6,0 Mg C (MORAES et al., 1996; NEILL et al., 1997; BERNOUX et al., 1998; CERRI et al., 1999, 2003 apud CARVALHO et al., 2010b). Estudos realizados no bioma Cerrado apontaram valores variando da ordem de 0,45 a 3,00 Mg C ha⁻¹ ano, com valores médios na ordem de 1,25 Mg C ha⁻¹ ano (OLIVEIRA et al., 2021; CARVALHO et al., 2010b; SEGNINI et al., 2007; BUSTAMANTE et al., 2006). São relatadas divergências para valores de taxa de sequestro em áreas de pastagens degradadas, bem como variabilidades significativas em função do tipo de manejo, espécie de forragem, e fertilidade do solo (CARVALHO et al., 2010b).

Diante da ausência de valores de referência consolidados e disponibilidade de metodologias para cálculo de emissões e remoções de GEE na agricultura brasileira que pudessem ser utilizados para a elaboração de inventários, um trabalho conduzido pelo *World Resources Institute* (WRI) e *GHG Protocol* fez o esforço de levantar e sistematizar diversos fatores de emissão e remoção de GEE disponíveis em literatura para atividades agrícolas. Dentre estes, são apresentados valores de emissão ou captura de CO₂ por hectare para mudanças de uso do solo entre diferentes sistemas de manejo, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Fatores de emissão para mudança do uso e ocupação do solo.

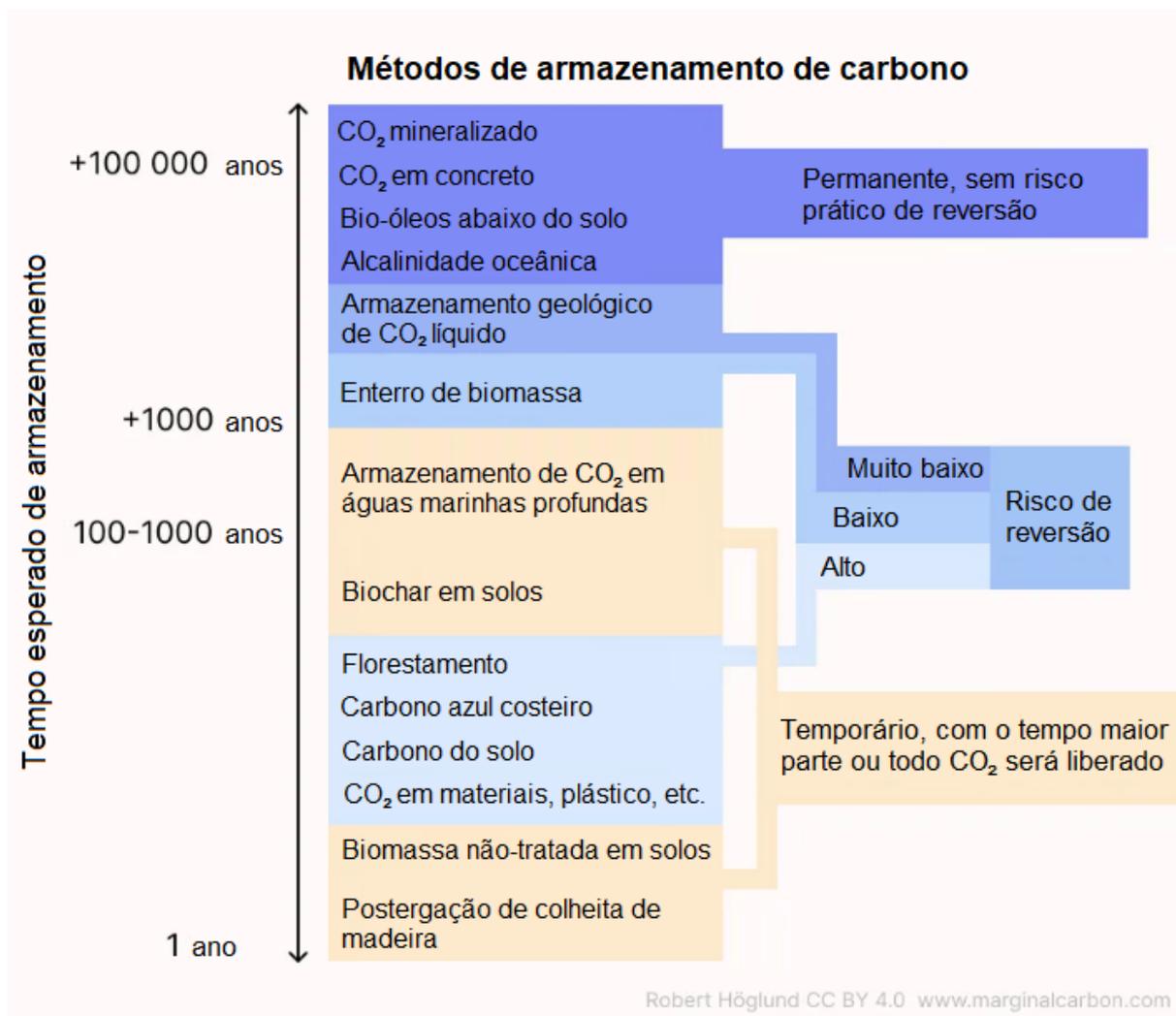
Uso anterior	Uso atual	Fator de emissão (Mg CO ₂ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Referência
Pastagem degradada	Plantio direto	-0,70	MAIA et al. (2013)
Pastagem severamente degradada	Pastagem/pastagem melhorada	-4,50	Adaptado de IPCC (2006); ASSAD e MARTINS (2015)
Pastagem/pastagem melhorada	Pastagem/pastagem melhorada	-4,63	IPCC (2006)
Pastagem/pastagem melhorada	Integração lavoura-pecuária	-3,67	ASSAD e MARTINS (2015)
Cultivo convencional	Integração lavoura-pecuária	-6,23	ASSAD e MARTINS (2015)

Fonte: WRI (2015).

Uma limitação da ferramenta, entretanto, é que os valores de referência apresentados não fazem distinção entre os diferentes aspectos que influenciam nestas taxas, como por exemplo classe textural do solo e condições climáticas. Ainda no que diz respeito ao sequestro de carbono e a remoções de carbono atmosféricas, outro aspecto a ser considerado é a permanência desse carbono no seu novo reservatório de armazenamento, tanto em termos de durabilidade quanto de risco de reversão (HÖGLUND, 2022). Esta é uma nuance relevante tanto do ponto de vista da contribuição para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, quanto de precificação do resultado gerado de remoção atmosférica de carbono, estando ambos os fatores diretamente relacionados, e exercendo uma influência no valor da tonelada de carbono removida que em preços atuais vai da ordem de dezenas a centenas de dólares.

O carbono armazenado no solo na forma orgânica pode ser considerado como tendo durabilidade relativamente baixa em comparação com outros métodos possíveis de armazenamento (Figura 3), e um alto risco de reversão com liberação para a atmosfera. Porém deve-se destacar que do ponto de vista agrônomo o carbono do solo pode ser dividido em uma fração denominada lábil (ativa) e outra fração denominada estável ou recalcitrante (passiva, humificada), cada uma apresentando diferentes tempos de permanência. Enquanto a fração lábil possui um tempo de ciclagem mais curto, da ordem de algumas semanas a poucos anos, a fração recalcitrante pode apresentar durabilidade que vai de algumas dezenas de anos chegando a passar de um milhar (PILON et al., 2002). É importante considerar ainda a tendência de estabilização do EC uma vez mantidas as práticas de manejo (LAL et al., 1998), bem como outros benefícios relacionados e indiretos das práticas que levam ao aumento destes níveis, como a melhora potencial de índices socioeconômicos e de qualidade ambiental (TITO et al., 2009). Deste modo, mesmo observados estes aspectos, o sequestro de carbono pelo solo pode ser considerado uma estratégia válida e com papel relevante para mitigação da concentração dos níveis de CO₂ atmosférico (UNEP, 2022b), integrando o conjunto de diferentes estratégias relevantes e necessárias para este fim.

Figura 3. Durabilidade de remoções de carbono para diferentes métodos de armazenamento.



Fonte: Elaborado pelo autor, traduzido de Höglund (2022).

Não obstante, um dos maiores desafios que permanecem atualmente para que o sequestro de carbono pelo solo seja um aspecto considerado e adotado em larga escala enquanto solução, contribuindo para a recuperação de áreas degradadas, é a ausência de soluções tecnológicas que permitam realizar a medição dos níveis de carbono no solo forma confiável, custo-efetiva, periódica e eficiente, do ponto de vista de viabilidade de implementação. Alguns avanços notáveis e recentes neste sentido que podem ser mencionados são publicações em literatura científica apontando para a possibilidade de predição dos níveis e estoques de carbono do solo através de sensoriamento aéreo próximo e remoto, utilizando uma combinação de espectroscopia de reflectância difusa e modelos numéricos (FARIA et al., 2023; HORST-HEINEN, 2021), bem como o desenvolvimento de dispositivos para medição contínua dos estoques de carbono do solo através de sensores instalados *in loco* e com transferência de dados por telemetria a custo reduzido, a exemplo do que vem sendo desenvolvido pela Arable, um *agritech* estadunidense.

3.4. Instrumentos de precificação e valoração econômica de carbono

Desde o Protocolo de Kyoto, uma série de instrumentos econômicos foram desenhados com o intuito de reduzir e controlar emissões de GEE. Dentre eles o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que regeu o primeiro mercado regulado global de carbono, anterior ao Acordo de Paris; mercados de carbono regulados de formato *cap-and-trade* – baseados na definição de um teto de emissões e transações de permissões de emissão limitadas entre atores regulados – jurisdicionais implementados em diferentes regiões do mundo com abrangência nacional, subnacional e transnacional (ex: *New Zealand Emissions Trading Scheme – NZ ETS*, *California’s Cap-and-Trade Program* e *European Union Emissions Trading System – EU ETS*, respectivamente); taxações diretas sobre emissões de carbono internas ou embutidas em importações (ex: *Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM*); precificações e taxas internas de carbono corporativas estabelecidas voluntariamente por empresas (MILKYWIRE, 2022; CDP, 2021); e metodologias para certificação de projetos de redução de emissões e remoções de carbono desenvolvidas por certificadoras independentes de natureza privada, voltadas para o mercado voluntário.

Créditos de carbono são atualmente o instrumento mais popular de precificação de carbono (WORLD BANK, 2023; ECOSYSTEM MARKETPLACE, 2022), e podem ser gerados a partir de projetos voltados tanto para redução de emissões quanto para remoções de CO₂ atmosférico. A principal diferença é que enquanto a primeira categoria é certificada por evitar novas emissões de GEE, os créditos de remoção promovem a diminuição da concentração de CO₂ já emitido, podendo ser desenvolvidos através de dinâmicas de uso do solo pautadas em soluções baseadas na natureza (SbN), promovendo também outros benefícios socioambientais. O conceito de SbN compreende um conjunto de ações voltadas à proteção e gestão sustentável de ecossistemas e ao uso de recursos e processos naturais, de modo a contribuir para a superação de desafios socioambientais como as mudanças climáticas, promoção da saúde humana, segurança alimentar e hídrica e a redução do risco de catástrofes, proporcionando simultaneamente benefícios para o bem-estar humano e a biodiversidade (COHEN-SHACHAM et al., 2016; WORLD BANK, 2022a).

No contexto brasileiro, os setores de agricultura, florestas e energia foram identificados como tendo o maior potencial para geração e comercialização de créditos de carbono, podendo contribuir para incorporação de uma receita adicional de até R\$ 100 bilhões à economia nacional (ICC, 2021). A geração e comercialização de créditos de carbono em sistemas produtivos agrícolas, pode constituir uma importante ferramenta econômica para viabilizar e acelerar o alcance das metas de redução de emissões assumidas pelos países do Acordo de Paris. O estudo publicado pela *International Chamber of Commerce* (ICC, 2021) apontou que o Brasil pode ter capacidade de suprir até 22% da demanda global por créditos de carbono em mercados internacionais regulados, e até 37,5% do volume projetado para transações em mercados voluntários.

Embora atualmente e nas projeções a maior fração destes créditos venha de projetos de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+), o setor agropecuário demonstra potencial igualmente relevante, e neste contexto a receita adicional proveniente dos projetos pode funcionar como um incentivo econômico para a transição às práticas agrícolas sustentáveis, que além de eliminar impactos negativos do uso indiscriminado

de fertilizantes e agrotóxicos, potencializam ainda outros serviços ecossistêmicos como a conservação do solo e da água e recuperação de biodiversidade (COHEN-SHACHAM et al., 2016; TITO et al., 2009). Além disso, práticas capazes de promover o sequestro de carbono e mitigação de impactos das mudanças climáticas muitas vezes podem promover também adaptação à impactos projetados, tornando estes sistemas produtivos mais resilientes, constituindo-se assim medidas *no-regret*, i.e., sem arrependimento.

Por outro lado, é importante destacar a existência de percepções que sugerem contradições e até mesmo a inefetividade dos mecanismos de precificação de carbono, a exemplo de colocações como do Grupo Carta de Belém e associações de povos indígenas, vide “Carta Munduruku do Alto e Médio Tapajós e Baixo Teles Pires”. Mais recentemente, acusações envolvendo projetos REDD+ majoritariamente certificados pela Verra, maior certificadora do mercado voluntário, tiveram grande repercussão na mídia após matérias veiculadas no jornal *The Guardian* apresentarem análises metodológicas alternativas apontando que mais de 90% dos créditos existentes não representavam reduções reais de emissão, por terem sido calculados em cima de linhas de bases possivelmente infladas de desmatamento. Os créditos gerados a partir deste tipo de projeto passaram e ainda tentam se recuperar de uma crise de reputação e queda de preços. Ainda assim, diferentes atores argumentam que atualmente os projetos de carbono são uma das poucas formas efetivas de direcionar recursos para a preservação de ambientes naturais e serviços ecossistêmicos de forma financeiramente sustentável e independente.

A despeito dos diferentes julgamentos, para os próximos anos é esperado um crescimento substancial dos mercados de carbono e da quantidade de recursos financeiros destinados para créditos de remoção, em virtude das iniciativas globais *Net Zero*, que objetivam alcançar saldo líquido global de emissões zerado até o ano de 2050, necessitando para isso de soluções combinadas de redução de emissões e remoções de CO₂ (UNEP, 2022a; MCKINSEY, 2021; IPCC, 2018). Entretanto, existem dificuldades associadas aos custos ainda elevados para mensuração efetiva das quantidades de carbono sequestrado, e formas de assegurar que o mesmo permaneça estocado e fora da atmosfera após sua captura. Além disso, existem limitações significativas para acessar mercados de carbono, especialmente no caso de pequenos e médios produtores rurais. Dentre os principais desafios que limitam a adoção de intervenções para viabilizar o acesso de agricultores e comunidades rurais aos mercados de carbono, pode-se listar:

- A falta de mecanismos adequados e viáveis para uma correta quantificação e monitoramento de estoques de carbono;
- O insuficiente conhecimento de técnicas e práticas de manejo agroecológico;
- Políticas inadequadas e a falta de segurança jurídica para promover tais investimentos;
- O tamanho mínimo recomendado para viabilizar financeiramente um projeto de carbono e a dificuldade de agrupar pequenos produtores em projetos de escala adequada;
- A inexistência de instituições e mecanismos que promovam vínculos equitativos destes produtores com mercados de carbono.

A isso se acrescentam a falta de acesso a métodos precisos e de baixo custo para a quantificação e monitoramento de estoques de carbono, como um dos principais obstáculos para a implementação de projetos voltados à inserção de comunidades de produtores familiares nos mercados de carbono (TITO et al., 2009).

Estas lacunas já têm sido reconhecidas e começam a ser endereçadas por diferentes atores para que tais obstáculos possam ser superados, a exemplo dos dispositivos para medição de carbono no solo que *agritech* Arable vem tentando desenvolver, e plataformas como as desenvolvidas pela empresa Moss e pelo banco multinacional holandês Rabobank. A proposta do último grupo objetiva viabilizar a geração de créditos de carbono agroflorestais através de técnicas de sensoriamento remoto, em projetos cujos requisitos se adequem à pequenos e médios produtores (RABOBANK, 2022). No ano de 2021 foram gerados os primeiros créditos de carbono agroflorestais brasileiros, através de uma parceria entre a plataforma Rabobank e reNature, uma *startup* também sediada nos países baixos (RENATURE, 2021). Mais recentemente, a Moss desenvolveu uma plataforma semelhante, voltada para a originação de créditos florestais em áreas a partir de 1 hectare, certificados por nova metodologia que aguarda lançamento. Outros atores também estão endereçando estes aspectos com diferentes soluções, entre os quais se pode citar como exemplo *Agroforestry Carbon*, *Carbify*, *Regen.Network*.

Diversas iniciativas vêm sendo construídas nos âmbitos regulado e voluntário, nacional e internacionalmente, buscando fomentar a adoção de medidas que promovam a redução de emissões de GEE ou a captura de CO₂ da atmosfera de forma intencional, planejada e/ou certificada. Como exemplo podem ser citados o Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC+), uma política federal de fomento à adoção de boas práticas agrícolas para diminuir as emissões de GEEs e promover o sequestro de CO₂; o *Green Deal* europeu; o *Green New Deal* estadunidense; bem como as já mencionadas políticas de precificação de carbono jurisdicionais como taxaço e mercados regulados de carbono. Além destes, também existem mecanismos voluntários de comercialização de créditos de carbono, gerados a partir de metodologias verificadas por certificadoras privadas ou arranjos alternativos de validação.

Para o recorte específico do setor agropecuário, merece destaque o que vem sendo conduzido pela Austrália, onde a indústria nacional de carne vermelha comprometeu-se com uma meta aspiracional de emissões líquidas zero até 2030. O aumento do armazenamento de carbono no solo em pastagens foi identificado pelo setor como um dos métodos para ajudar a alcançar este objetivo. O governo Australiano por sua vez estabeleceu enquanto mecanismo regulado o *Australian Carbon Credit Unit (ACCU) Scheme*, e dentre outras ações está promovendo a adoção de práticas de redução as emissões entéricas de metano e aumento dos estoques de carbono do solo através de incentivos financeiros (MCDONALD et al., 2023; DCCEEW, 2023).

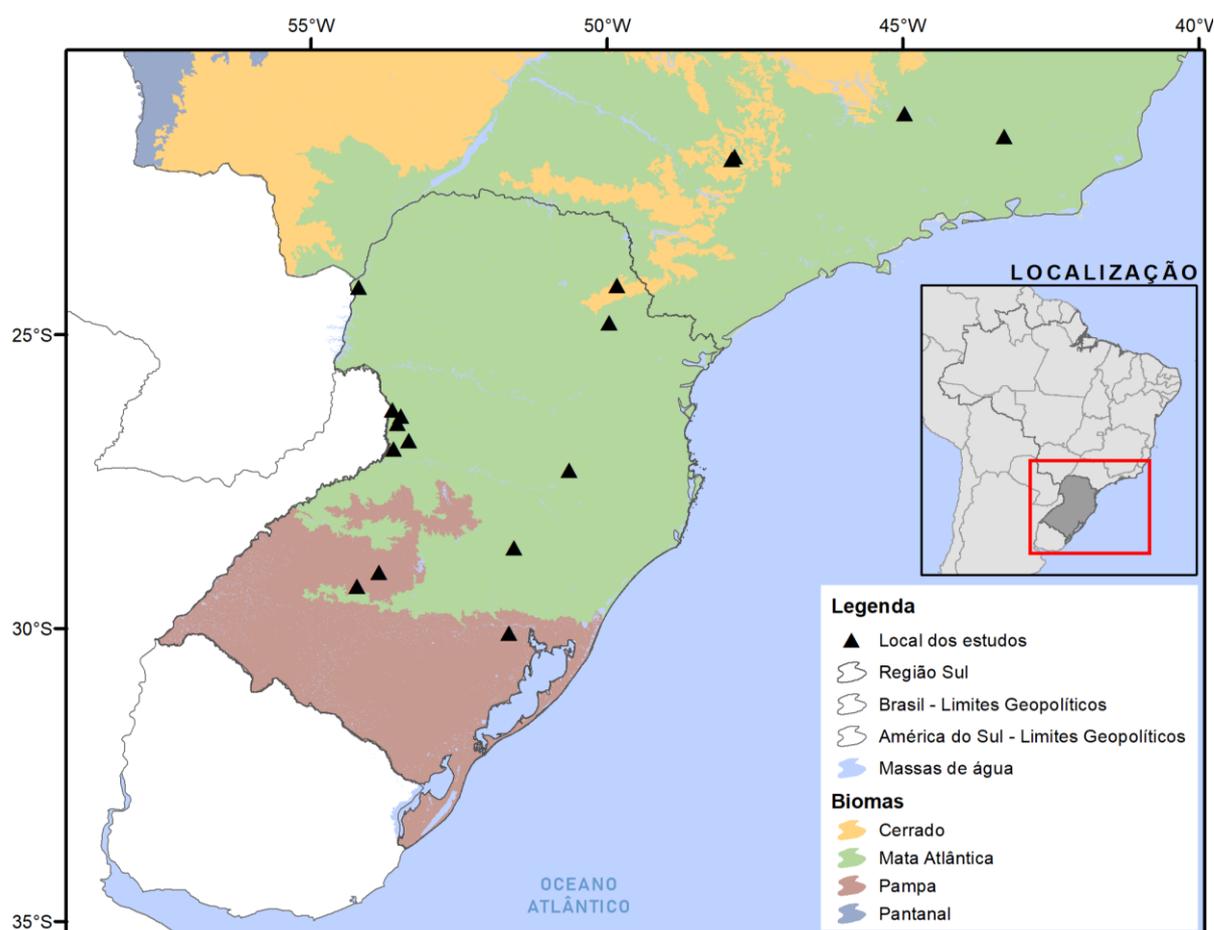
Já num contexto nacional, recentemente, o governo brasileiro anunciou um conjunto de diferentes medidas e projetos de lei que se tem chamado de “pacote verde”, dentre as quais está uma proposta para regulação de um mercado de carbono nacional, batizado de Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE). Internacionalmente, a quantidade de regulações de precificação de carbono vem crescendo, chegando em 2022 a um total de 73 instrumentos cobrindo cerca de 23% das emissões globais de GEE. Enquanto instrumentos de taxaço são maiores em quantidade, os ETS cobrem a maior parte das emissões globais, e tornaram-se em

2021 responsáveis pela maior parte da receita proveniente dos instrumentos regulados de precificação (WORLD BANK, 2023, 2022b). O relatório do Banco Mundial mostra que no período mais recente o preço médio das transações de créditos de remoção de carbono atmosférico foi da ordem de 15 USD por tonelada, fechando o segundo semestre de 2023 com um valor de três a seis vezes maior do que o observado para créditos de carbono de outras modalidades.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A área delimitada para o levantamento de estudos pela revisão sistemática foi a região sul da divisão geopolítica brasileira, que tem como tipologias de clima predominantes as classificações de Köppen subtropical húmido (Cfa) e oceânico (Cfb), e contempla os biomas Mata Atlântica e Pampa. O bioma Pampa se estende também para o território dos países Argentina e Uruguai, porém estudos nessas regiões não foram levantados, devido ao estudo ser apenas no Brasil. Em função do volume reduzido de artigos encontrados, publicações presentes em bioma Mata Atlântica também na região sudeste foram incorporadas à pesquisa. O mapa de localização da área de estudo e coordenadas geográficas das publicações selecionadas para as análises está apresentado na Figura 4.

Figura 4. Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor com dados disponibilizados por IBGE (2019b).

Além dos valores de referência encontrados a partir da revisão de literatura, outros dados utilizados para condução das análises foram o mapeamento de classes de degradação de pastagens brasileiras referente ao ano de 2021, disponibilizado pelo Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento da Universidade Federal de Goiás (LAPIG/UFG), e o agrupamento de classes de solo do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) de Bernoux et al. (2002) disponibilizado por MCTI (2020). Os dados utilizados estão sumarizados na Tabela 4, e a Figura 5 traz uma representação visual dos dois produtos

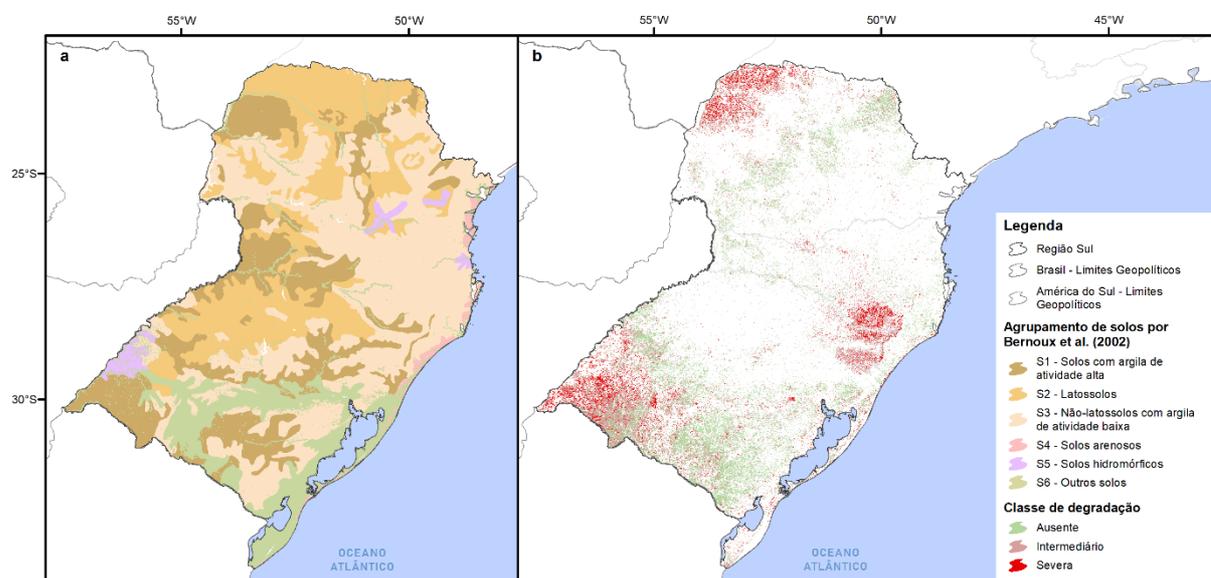
georreferenciados utilizados nas análises. Os dados utilizados para condução das análises estão sumarizados na Tabela 4.

Tabela 4. Variáveis utilizadas para a condução das análises.

Variável	Fonte	Ano	Natureza
Classes de degradação de pastagens (2021)	Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento, Universidade Federal de Goiás (LAPIG/UFG)	2023	Georreferenciado, semi-quantitativo
Agrupamento de classes de solo do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS)	Bernoux et al. (2002), disponibilizado por MCTI (2020)	2002	Georreferenciado, qualitativo
Fatores de emissão e remoção de CO ₂ para pastagens manejadas	Revisão sistemática de literatura (<i>Scopus</i>)	-	Quantitativo, referenciado por atributos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5. Ilustração dos dados georreferenciados utilizados para condução das análises, sendo (a) Agrupamento de classes de solo do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos por Bernoux et al. (2002) e (b) Classes de degradação de pastagens no ano de 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor com dados disponibilizados por LAPIG (2023) e MCTI (2020).

Destaca-se que a plataforma MapBiomias também disponibiliza um dado de qualidade de pastagens similar ao do LAPIG, porém este não foi considerado para as análises devido à ausência de informações para o bioma Pampa. A justificativa se dá pelo fato de que esta ausência gera uma divergência significativa na área total de pastagens, e pelo alto tempo de processamento computacional demandado em razão do formato em que são disponibilizados pela plataforma. Desta forma, as estimativas de potencial total de sequestro de carbono pelas pastagens da região sul foram conduzidas utilizando somente o dado do LAPIG (2023).

4.1. Qualidade dos dados

Os dados de classes de degradação de pastagens fornecidos pelo LAPIG (2023) em formato georreferenciado são produzidos a partir de classificação supervisionada de imagens de satélite através da plataforma *Google Earth Engine*, e posteriormente confrontados com dados obtidos em campo para aumento da precisão e controle de qualidade dos resultados. O levantamento das áreas é dividido entre duas etapas, sendo primeiro realizada a classificação dos pixels como pastagem e não-pastagem, e posteriormente avaliada a classe de degradação.

4.1.1. Áreas de pastagem

A classificação dos *pixels* como área de pastagem é realizada a partir de imagens *Landsat* com resolução de 30 metros, através de algoritmo de classificação supervisionada *Random Forest* aliado a técnicas estatísticas de amostragem para treinamento. Este conjunto contou com aproximadamente 30 mil pontos aleatórios inspecionados visualmente para validação da primeira versão do dado produzido pelo LAPIG (2021). A análise de acurácia é feita a partir da tabulação cruzada das frequências amostrais das classes mapeadas e reais. As frequências n_{ij} representam o número de *pixels* na amostra classificados como classe i , e avaliados como classe j , e a acurácia é avaliada a partir das métricas de:

- **Acurácia do usuário:** São as estimativas das frações de *pixels* do mapeamento, para cada classe, corretamente classificados. A acurácia do usuário está associada ao erro de comissão, que é o erro cometido ao atribuir um pixel à classe i , quando este pertence a alguma outra classe. Está associada a confiabilidade de cada classe mapeada.
- **Acurácia do produtor:** São as frações amostrais de *pixels* de cada classe corretamente atribuídos às suas classes pelos classificadores. A acurácia do produtor está associada ao erro de omissão, que ocorre quando deixa-se de mapear um pixel da classe j corretamente.
- **Acurácia global:** É a estimativa da proporção de acerto global dos classificadores.

A identificação das áreas de pastagem pelo LAPIG (2023) foi desenvolvida no âmbito do projeto MapBiomass em parceria com a plataforma, porém a diferença encontrada para área total de pastagens indicada nos dados disponíveis em cada uma das bases não é explicada. Na primeira versão anterior do produto disponibilizada pelo LAPIG (2021), o conjunto de dados apresentou precisões de 95% para acurácia do usuário e variação de 60 a 72% para acurácia do produtor, tendo acurácia global de 91%. Para a versão mais atual, de 2023, este relatório de qualidade não foi disponibilizado.

4.1.2. Qualidade de pastagens

A análise de qualidade da pastagem usa como indicador o vigor vegetativo para separar as pastagens em três classes: (i) degradação severa; (ii) degradação moderada; e (iii) sem degradação. O LAPIG descreve que as imagens das médias anuais de *Enhanced Vegetation Index* (EVI) foram normalizadas por biomas para reduzir as diferenças esperadas nos valores deste parâmetro em resposta às condições edafoclimáticas, o que torna o índice equivalente entre os diferentes biomas.

Posteriormente, as imagens anuais são analisadas pixel a pixel, por meio de análise de tendências em anomalias acumuladas, baseada em dados satelitários (NDVI/MOD13Q1) avaliando perdas ou ganhos em produtividade. Os resultados para EVI.dNorm resultantes variam de 0 a 1 e são estratificados em classes de estado de degradação das pastagens, sendo considerado (i) degradação severa para valores $\leq 0,4$; (ii) degradação moderada para valores $> 0,4$ e $\leq 0,6$ e (iii) ausente para valores $> 0,6$. Áreas com tendência significativas de perda em produtividade ($p < 0.05$) foram consideradas áreas com indícios de degradação (LAPIG, 2021).

4.2. Procedimentos metodológicos

4.2.1. Definição dos fatores de sequestro de carbono por pastagens

A primeira etapa do fluxo metodológico de atividades foi a condução de uma revisão sistemática de literatura, com objetivo de mapear e sumarizar o volume de dados de sequestro de carbono pelo solo por pastagens disponíveis para a região sul. Este levantamento foi conduzido através de uma varredura na plataforma Scopus em março de 2023, utilizando a combinação de palavras-chave (*Pasture OR Grassland OR Grazing*) & *Carbon & Soil & (Sequestration OR Removal OR Addition OR Accumulation)*. Posteriormente, os artigos foram sequencialmente filtrados de acordo com critérios descritos nas etapas abaixo.

- i. **Universo amostral:** Todos os artigos retornados pela busca combinada de palavras-chave, filtrados para região do Brasil.
- ii. **Banco de artigos para análise:** Artigos localizados em bioma Mata Atlântica ou na Região Sul, que possuíam dados quantitativos de carbono orgânico do solo (COS).
- iii. **Tabulação de dados:** Artigos que apresentavam valores de referência para taxas de variação de EC do solo em pastos manejados, ou para os quais era possível inferir esta variação a partir de outros dados apresentados, como tempo de experimento e EC de uma área de referência.
- iv. **Conjunto amostral selecionado:** Artigos com experimentos localizados na região sul ou sudeste, cujas taxas de variação de EC do solo resultavam em sequestro de carbono pelo manejo da pastagem. Para estudo com valores reportados para diferentes camadas, buscou-se adotar o valor da camada de maior profundidade até o limite de 40 cm.

Para cada publicação foram tabeladas todas as informações disponíveis de aspectos que exercem influência sobre as taxas de sequestro de carbono observadas. Entre eles, dados geofísicos incluindo localização geográfica, altitude, bioma, características climáticas e de classe textural do solo. Informações relativas as características do sistema como espécie(s) cultivada(s), tipo de uso do solo, tipo de manejo, pressão de pastejo (em termos de altura de pastejo e/ou lotação animal), produtividade de forragem, produtividade animal, adoção de práticas de revolvimento do solo e fertilização. E também outras informações relevantes para os resultados encontrados pelas análises dos estoques e taxas de sequestro de carbono apresentados, como ano de conversão da vegetação nativa, uso prévio da área anteriormente à implantação do sistema, tempo de duração do experimento, profundidade da camada e base

comparativa de EC adotada para determinação das taxas de sequestro de carbono encontradas. A partir dos valores encontrados foi convencionado o estabelecimento de faixas de valores máximos, médios e mínimos para SEQ nas diferentes condições de classe textural do solo como condição para a etapa seguinte de cálculo, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Distribuição conceitual dos fatores de sequestro de carbono (SEQ) a serem utilizados nos cálculos de potencial estimado de SEQ por pastagens.

Parâmetro	Classe textural do solo		
	Argilosa (arg)	Argilo-arenosa (agn)	Arenosa (arn)
SEQ _{máx} (Mg CO ₂ ha ⁻¹)	SEQ _{máx-arg}	SEQ _{máx-agn}	SEQ _{máx-arn}
SEQ _{med} (Mg CO ₂ ha ⁻¹)	SEQ _{méd-arg}	SEQ _{méd-agn}	SEQ _{méd-arn}
SEQ _{mín} (Mg CO ₂ ha ⁻¹)	SEQ _{mín-arg}	SEQ _{mín-agn}	SEQ _{mín-arn}

Fonte: Elaborado pelo autor. SEQ_{máx}: Taxa de sequestro máxima; SEQ_{méd}: Taxa de sequestro média; SEQ_{mín}: Taxa de sequestro mínima.

Considerando a hierarquização $SEQ_{\text{argiloso}} > SEQ_{\text{argilo-arenoso}} > SEQ_{\text{arenoso}}$ apontada pela literatura para as mesmas condições climáticas e de manejo, bem como a representatividade e características dos dados retornados pela busca de revisão, como abordagem conservadora a faixa de valores máximos, médios e mínimos para SEQ foi definida de modo atributivo para a classe textural argilosa, e dela desdobrada para as demais. Para isto, aplicou-se com base nos dados observados de Stanley et al. (2018), fatores de correção de 80% para transpor os valores de SEQ encontrados para solos argilosos a solos argilo-arenosos, e de 40 a 50% para transpor os valores de solos argilosos a solos arenosos. Dado que usualmente os valores de referência para SEQ estão expressos nas publicações em termos de Mg C ha⁻¹, para realização dos cálculos de sequestro de carbono atmosférico, estes foram convertidos para Mg CO₂ ha⁻¹ utilizando como base a estequiometria CO₂-C de 44/12 (massa molar CO₂/massa molar C).

4.2.2. Potencial de sequestro de carbono pela recuperação e manejo de pastagens

Para definição dos fatores de sequestro a serem empregados para cada polígono de pastagem, foram cruzados os dados georreferenciados de classe de degradação atual e de agrupamento de tipos de solos do SiBCS produzido por Bernoux et al. (2002). Para esta etapa, assumem-se as seguintes premissas:

- Fatores de remoção de CO₂ apresentados em literatura para pastagens bem manejadas e em recuperação podem ser transpostos para calcular o potencial de aumento de EC em outras áreas de pastagem;
- Nível de degradação da pastagem influencia diretamente na quantidade de carbono estocado em uma determinada parcela de solo;
- A recuperação e o manejo adequado de pastagens promovem remoções de CO₂ atmosférico em uma base contínua durante períodos que vão de 20 a 50 anos até que o estoque de COS estabilize (IPCC, 2019; LAL et al., 1998);

Sabendo-se que teores de COS tendem a ser maiores em áreas com menor índice de degradação, taxas máximas de sequestro foram atribuídas para áreas com maior degradação, e vice-versa. Já o dado produzido por Bernoux et al. (2002) foi utilizado como um *proxy* para

convencionar a classe textural do solo sob cada polígono de pastagem, sendo atribuídas as correspondências apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Derivação de classes texturais a partir de agrupamentos de solo.

Agrupamento de solos segundo Bernoux et al. (2002)	Classe textural considerada
S1 – Solos com argila de atividade alta	
S2 – Latossolos	Argilosa
S5 – Solos hidromórficos	
S3 – Não-Latossolos com argila de atividade baixa	Argilo-arenosa
S4 – Solos arenosos	
S6 – Outros solos	Arenosa

Fonte: Elaborado pelo autor.

Deste modo, o dado georreferenciado de qualidade de pastagens (LAPIG, 2023) foi cruzado com o dado de agrupamento em classes de solo do SBCS (Bernoux et al., 2002), definindo assim a classe textural de solo sob cada polígono de pastagem. Posteriormente, levando-se em consideração a alta incerteza associada ao valor de SEQ provável de ser obtida pelo manejo das pastagens, foram elaborados três diferentes cenários para consideração do cálculo de sequestro potencial de carbono nestas áreas, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7. Cenários considerados e respectiva aplicação dos fatores de sequestro.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Severamente Degradada	SEQmáx	SEQmáx	SEQméd
Moderadamente Degradada	SEQmáx	SEQméd	SEQméd
Sem Degradação	SEQmed	SEQmín	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, a partir da caracterização de classe textural obtida para cada polígono de pastagem, e da respectiva atribuição dos fatores de SEQ conforme apresentado na Tabela 5, foram calculados os potenciais de sequestro de carbono nestas áreas para cada um dos cenários para um horizonte de 20 anos.

4.2.3. Análise crítica dos resultados e de desafios e perspectivas associados à recuperação de pastagens em escala

A partir dos valores potenciais de sequestro de carbono calculados, foi feita uma avaliação da sua relevância em termos de mitigação da concentração de CO₂ atmosférico, considerando a equivalência de 7.8 Mg CO₂ para 1 ppm de CO₂ na atmosfera (CDIAC, 1990), seguida por uma discussão e análise crítica dos resultados obtidos em termos de desafios e perspectivas associadas à viabilidade e escalabilidade de práticas de sequestro de carbono pelo manejo e uso da terra.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1.1. Definição dos fatores de sequestro de carbono por pastagens

A revisão sistemática retornou um total de 5.718 artigos, sendo 336 classificados com localização no Brasil. Destes, 67 artigos foram selecionados para a análise, resultando na tabulação de dados de um conjunto de 23 publicações, sendo 22 artigos retornados pela busca na plataforma Scopus e uma referência adicional incorporada, identificada em um destes artigos. Para duas publicações, a tabulação de dados qualitativos foi complementada por referências citadas pelos estudos, uma para cada. Por fim, foi selecionado um conjunto amostral de 17 destes estudos para definição dos fatores aplicados às estimativas de potencial de sequestro de carbono pelo solo em pastagens da região sul.

Nos resultados obtidos, é observada uma considerável amplitude de valores para as taxas de SEQ encontradas entre as diferentes publicações, que vai da ordem de 7,43 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ a 0,15 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ com uma série de valores intermediários entre estes dois extremos (Tabela 8). Em razão da grande quantidade de variáveis que influenciam nos resultados de sequestro de carbono observados e reportados, e a quantidade reduzida de publicações disponíveis, não é possível fazer uma inferência assertiva ou estatística, como Análise de Componente Principal ou Regressão Linear Multivariada, sobre os motivos que explicam essa variabilidade, sendo este um aspecto limitante da pesquisa. Resultados contraintuitivos para experimentos com características distintas também são observados, como por exemplo valores de sequestro em áreas de pastagem implantadas logo após a conversão de floresta nativa (DOS SANTOS et al., 2019) maiores do que valores observados em pastagens convertidas de outros usos não-conservacionistas anteriores (TARRÉ et al., 2001; PIVA et al., 2020). Isso reforça a presença de uma ampla quantidade de variáveis presentes no manejo de pastagens que influenciam a capacidade do solo em sequestrar carbono.

Entre as variáveis que influenciam as taxas de SEQ encontradas estão: a base comparativa adotada, profundidade da camada amostrada, textura do solo, tempo de observação do experimento (duração), tipo de sistema de manejo, pressão e altura de pastejo, adoção ou não-adoção de revolvimento do solo, fertilização, culturas utilizadas e condições climáticas (PINTO et al., 2014; CARDOZO JR et al., 2016; SEÓ et al., 2017; DOS SANTOS et al., 2019; SEGNINI et al., 2019), com destaque para os quatro primeiros aspectos citados. Em função da complexidade resultante da combinação destas diferentes variáveis relacionadas ao sequestro de carbono, das características e do volume dos dados disponíveis, não é possível fazer uma análise estatística ou empírica conclusiva sobre a preponderância de cada variável sobre os valores de sequestro encontrados, a partir do conjunto amostral obtido por esta pesquisa.

Uma constatação que se pode fazer, no entanto, é que tempos maiores de observação dos experimentos tendem a apresentar uma redução nos valores de SEQ observados, vide análise de publicações que reportaram diferentes valores para um mesmo experimento (PINTO et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2020b). Isso é um indicativo que acúmulos maiores de carbono tendem a acontecer nos anos iniciais, sendo amortizados com o passar do tempo. Já a comparação entre diferentes publicações não pode ser realizada pelos motivos supracitados, vista a heterogeneidade de condições identificadas para os aspectos que influenciam nos

resultados encontrados pelos estudos. De outro modo, poderia se afirmar equivocadamente que sistemas de manejo contínuo (PINTO et al., 2014) apresentam acúmulo de carbono superior a sistemas rotacionados (SEÓ et al., 2017; SEGNINI et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2020a), o que não condiz com o estado-da-arte do conhecimento sobre a dinâmica de acúmulo de MOS e aumento dos EC nestes tipos de sistema (MACHADO, 2004; MACHADO FILHO et al., 2021; MOSIER et al., 2021).

Ainda que seja possível obter indícios sobre as melhores práticas de manejo em termos de sequestro de carbono através de estudos que isolaram algumas das variáveis, outras limitações permanecem em função da falta de representatividade de publicações. Por exemplo, enquanto autores que trabalharam tendo a altura de pastejo como variável de controle reportaram acúmulos de carbono pelo solo maiores para alturas de pastejos maiores (CECAGNO et al., 2018), outros encontraram valores divergentes para diferentes horizontes temporais (SOUZA et al., 2009). A constatação obtida por Cecagno et al. (2018) é reforçada por Souza et al. (2009) para um período observado de seis anos, porém resultados inversos são reportados para o primeiro período de três anos de observação.

A heterogeneidade dos dados reportados pelas publicações é outro aspecto relevante, seja em termos de completude, ou de adoção de diferentes referenciais e abordagens. Um exemplo deste segundo aspecto é a profundidade da camada amostrada, com valores de sequestro sendo reportados entre os diferentes estudos para camadas que variam entre 5, 10, 20, 40 e 100 cm (Tabela 8). Outro exemplo são as bases comparativas consideradas para estimar o sequestro de carbono pelo manejo da pastagem. Enquanto algumas publicações possuem como base comparativa o EC medido em um ponto anterior no tempo na área de experimento (BIELUCZYK et al., 2020; RESENDE et al., 2020; RIBEIRO et al., 2020; ASSMAN et al., 2014; SOUZA et al. 2009; NICOLOSO et al., 2008) ou em áreas com a mesma cultura, porém com manejos distintos (RAMALHO et al., 2020; ALVES et al., 2020), já outras consideram como EC referencial áreas com outros tipos de cultura (PIVA et al., 2020; SEÓ et al., 2017; PINTO et al., 2014) ou até mesmo de vegetação nativa (OLIVEIRA et al., 2020b; OLIVEIRA et al., 2017; SEGNINI et al., 2019). Isso torna-se um fator limitante para que os resultados obtidos possam ser agrupados em conjuntos representativo de valores médios de sequestro de carbono por tipo solo, classe textural, classe de uso do solo e de sistema de manejo.

Uma recomendação já destacada em literatura para novos estudos envolvendo práticas agrícolas sustentáveis e regenerativas, em termos de escolha da base comparativa para avaliação das variações de EC em função de mudanças no uso do solo e técnicas manejo empregadas, é adotar como *baseline* comparativo valores de EC encontrados em sistemas correlatos que melhor representam as condições iniciais da área onde o experimento intervém, ou as práticas comuns adotadas em cenários *business-as-usual*. Estas, em geral, possuem capacidade inferior de sequestro, armazenamento e manutenção dos ECs do solo quando comparadas com áreas de vegetação nativa, por exemplo, e podem permitir uma avaliação mais assertiva do ponto de vista dos benefícios que práticas adequadas de manejo podem trazer quando empregadas nestas condições. Neste sentido, são elencadas como sugestão para estimar variações de EC promovidas pela adoção de práticas como ILP e ILPF, a adoção de valores de EC observados em sistemas de monocultura ou pastagem degradada como base comparativa (OLIVEIRA et al., 2023). Nestes casos, deve ser observada também a compatibilidade dos

demais parâmetros relacionados à dinâmica do COS e ECs entre os dois sistemas avaliados, como condições climáticas e de classe textural do solo, por exemplo.

Embora sejam encontrados valores positivos reportados de sequestro de carbono quando comparados os EC do solo de pastagens manejadas com o de áreas sob vegetação nativa, também se encontra o oposto (WENDLING et al., 2011; DALAL et al., 2005), sendo importante destacar que de maneira geral a substituição de florestas por pastagens leva a uma perda da quantidade total de carbono armazenada pelo sistema (OLIVEIRA et al., 2017), especialmente se levados em consideração outros aspectos, como por exemplo, a biomassa aérea. Utilizar valores de referência de EC em áreas de vegetação nativa como base comparativa para estimar sequestro ou emissões de carbono promovidas por sistemas manejados implica em limitações quanto a interpretação que se pode fazer destes valores. Entretanto, considera-se que essa característica confere um aspecto conservador para as estimativas realizadas sob as premissas desta pesquisa, uma vez que o cenário linha de base são pastagens degradadas nas quais assume-se o emprego de práticas regenerativas. Assim, a tendência esperada é de aumento dos EC nestas áreas, na qual exclui-se o fator de uma potencial perda de carbono de origem florestal após conversão destas áreas.

Outra observação importante a respeito dos resultados obtidos é que em alguns casos, os valores de sequestro são apresentados diretamente pelos estudos (BIELUCZYK et al., 2020; OLIVEIRA et al. 2020b; RAMALHO et al., 2020; SOUZA et al., 2009), e em outros casos é preciso calcular a partir da diferença entre dois valores distintos de EC apresentados pelo estudo (ex: EC em área de pastagem e EC em vegetação nativa), dividida pelo horizonte de tempo desde a conversão, ou da implantação do sistema de manejo (RESENDE et al., 2020; SEGNINI et al., 2019; SEÓ et al., 2017; PINTO et al., 2014). Isso revela que nem sempre existe uma preocupação dos autores em evidenciar esta informação. Em literatura são encontradas variações de EC tanto positivas (Tabela 8) quanto negativas (OLIVEIRA et al., 2020b, 2020c; PIVA et al., 2020; SEGNINI et al. 2019; NICOLOSO et al., 2008), sendo que as variações de ordem negativa podem estar associadas à diferentes motivos, como conversão de áreas de vegetação nativa e comparação com EC destas, ou práticas de manejo inadequadas do ponto de vista de acúmulo de matéria orgânica.

Tabela 8. Resumo dos resultados encontrados para sequestro de carbono em pastagens a partir de revisão sistemática de literatura.

Índice	Referência	Bioma	Região	Classe de Solo	Textura	Uso do solo	Sistema de Manejo	Base comparativa	Duração (anos)	Camada (cm)	SEQ-C (Mg C ha ⁻¹ ano ⁻¹)	SEQ-CO2 (Mg CO ₂ ha ⁻¹ ano ⁻¹)
1	Pinto et al. (2014)	Mata Atlântica	Sudeste	Latossolo Vermelho Distrófico	Argilosa	Pastagem	Contínuo	EC monocultura de milho convencional.	3	40	7,43	27,26
									3	40	7,27	26,64
									20	40	2,54	9,30
2	Seó et al. (2017)	Mata Atlântica	Sul	N/I	Argilo-arenosa	Pastagem	Rotacional	EC de lavoura com sistema de plantio direto.	5	40	¹ 5,28	19,36
					Argilosa				8	40	¹ 4,53	16,61
									17	40	¹ 1,89	6,93
									14	40	² 1,61	5,90
									30	40	¹ 0,62	2,27
									9	40	¹ 0,40	1,47
3	Resende et al. (2020)	Mata Atlântica	Sudeste	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Argilosa	IPF	N/I	EC inicial na área de experimento.	8	N/I	3,84	14,07
											3,50	12,84
											3,21	11,76
											2,59	9,48
4	Bieluczyk et al. (2020)	Mata Atlântica	Sudeste	Latossolo	Argilo-arenosa	Pastagem	Extensivo	EC inicial na área de experimento.	6	40	1,96	7,19
											1,74	6,38
											1,68	6,16
5	Oliveira et al. (2020b) ³	Mata Atlântica	Sudeste	Transição Latossolo Vermelho-Latossolo Amarelo	Argilosa	Pastagem	Rotacional	EC vegetação nativa.	9	100	1,92	7,04
									15	100	1,80	6,60
6	Souza et al. (2009)	Pampa	Sul	Latossolo Vermelho Distroférrico	Argilosa	ILP	Contínuo	EC inicial na área do experimento.	6	20	1,40	5,13
									6	20	1,20	4,40
									6	20	0,60	2,20
7	Ribeiro et al. (2020)	Mata Atlântica	Sul	Latossolo	Argilosa	ILP	Contínuo	EC inicial na área do experimento.	3,5	100	1,14	4,18
									3,5	100	0,28	1,03

8	Assman et al. (2014)	Pampa	Sul	Latossolo Vermelho Distroférico	Argilosa	ILP	Contínuo	EC inicial na área do experimento.	9	20	0,96	3,52
9	Oliveira et al. (2017)	Mata Atlântica	Sul	Latossolo Vermelho	Argilosa	Pastagem	N/I	EC vegetação nativa.	20	40	0,95	3,47
10	Segnini et al. (2019) ³	Mata Atlântica	Sudeste	Transição Latossolo Vermelho-Latossolo Amarelo	Argilosa	Pastagem	Rotacional	EC vegetação nativa.	15	30	0,94	3,46
									9	30	0,47	1,73
11	Ramalho et al. (2020)	Mata Atlântica	Sul	Latossolo Bruno	Argilosa	ILP	N/I	EC de área de controle com pasto conduzido com aração e gradagem.	9	20	0,57	2,09
12	Alves et al. (2020)	Pampa	Sul	Argissolo	Argilo-arenosa	ILP	Rotacional	EC do tratamento com menor acúmulo.	14	30	0,50	1,83
13	Santana et al. (2013)	Mata Atlântica	Sul	Latossolo	Argilosa	Pastagem	Híbrido	EC de pastagem nativa sem roçada e queimada há 8 anos.	17	5	0,44	1,62
14	Rosset et al. (2014)	Mata Atlântica	Sul	Latossolo Vermelho Eutroférico	Argilosa	Pastagem	Extensivo	EC de conjunto de sistemas sem aração e gradagem.	38	40	0,34	1,24
15	Piva et al. (2020)	Mata Atlântica	Sul	Latossolo Bruno	Argilosa	ILP	Rotacional	EC de área sob cultivo convencional.	3,5	20	0,25	0,92
16	Piva et al. (2014)						Rotacional	N/I.	3,5	20	0,19	0,71
17	Nicoloso et al. (2008)	Mata Atlântica/Pampa (transição)	Sul	Argissolo Vermelho-Amarelo Aluminico típico	Argilo-Arenosa	ILP	Contínuo	EC inicial na área do experimento.	3,75	10	0,15	0,55

Fonte: Elaborado pelo autor.

¹Para a obtenção destes resultados, dados complementares não presentes na publicação foram concedidos pela autora.

²Valor é uma média composta para 5 diferentes propriedades avaliadas pelo artigo.

³Ambas referências abordam um mesmo experimento.

Para valores de SEQ diferentes dentro de uma mesma referência onde não são observadas diferentes características na tabela, consultar o Apêndice para ter acesso a maiores detalhes sobre o dado.

N/I: Não informado.

A partir da relação de fatores de sequestro de carbono por pastagens manejadas identificadas pela revisão sistemática de literatura, a tabela de distribuição conceitual de fatores de SEQ a serem utilizados nos cálculos de estimativa do potencial de sequestro de carbono por pastagens foi populada com valores de referência, tendo como base o julgamento e análise crítica dos resultados encontrados na literatura. Assim, foram definidos como fatores de SEQ máximo, médio e mínimo para textura argilosa os valores 2,50; 1,25; e 0,50 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente, e estes desdobrados para as outras classes texturais de acordo com as razões derivadas de Stanley et al. (2018) conforme descrito na metodologia, resultando nos valores 2,00; 1,00; e 0,40 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ para textura argilo-arenosa, e 1,25; 0,50; e 0,25 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ para textura arenosa, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9. Fatores de SEQ considerados para cálculo do potencial estimado de sequestro de carbono pelo solo através de manejo adequado de pastagens da região sul do Brasil.

Parâmetro	Classe textural do solo		
	Argilosa	Argilo-arenosa	Arenosa
SEQ _{máx} (Mg C ha ⁻¹)	2,50	2,00	1,25
SEQ _{med} (Mg C ha ⁻¹)	1,25	1,00	0,50
SEQ _{mín} (Mg C ha ⁻¹)	0,50	0,40	0,25

Fonte: Elaborado pelo autor. SEQ_{máx} adaptado de Pinto et al. (2014); SEQ_{méd} adaptado de Seó et al. (2017); SEQ_{mín} adaptado de Alves et al. (2020).

5.1.2. Potencial de sequestro de carbono pela recuperação e manejo de pastagens

Os resultados de potencial de sequestro de carbono pelas áreas de pastagem encontrados para os cálculos realizados variam de 0,433 Gt CO₂ a 1,273 Gt CO₂ para os diferentes cenários considerados. A Tabela 10 apresenta a representatividade proporcional de classes texturais de solo obtidas através das premissas adotadas pela presente pesquisa, e a Tabela 11 apresenta o resultado de potencial de sequestro de carbono pelas áreas de pastagem obtido através dos cálculos.

Tabela 10. Representatividade de classes texturais obtidas pela premissa aplicada ao agrupamento do SiBCS em classes de solo por Bernoux et al. (2002).

	Argilosa	Argilo-arenosa	Arenosa
Região sul (total)	49,06%	38,88%	11,26%
Pastagens	49,01%	37,11%	13,88%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11. Sequestro de carbono potencial calculado para os cenários considerados.

	Cenário 1 – Otimista	Cenário 2 – Moderado	Cenário 3 – Conservador
Potencial de sequestro	1,273 Gt CO ₂	0,719 Gt CO ₂	0,433 Gt CO ₂

Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora considere-se na definição dos cenários um potencial maior de incremento do EC nas áreas degradadas, a depender do nível de degradação e das práticas que a serem empregadas, o horizonte de tempo necessário para que as taxas de sequestro de carbono dos anos iniciais atinjam níveis satisfatórios pode variar, considerando que em função da degradação estas áreas podem partir de um menor potencial de produtividade de biomassa, e conseqüentemente uma menor quantidade de matéria orgânica para ser incorporada ao solo, fator primordial para a manutenção dos ECs (DOS SANTOS et al., 2019; CECAGNO et al., 2018). Assim, é possível que na prática as taxas de sequestro de carbono de anos iniciais sejam inferiores nos cenários de maior degradação, até se estabilizarem em níveis maiores com a recuperação da capacidade produtiva. Apesar disso, é possível encontrar taxas significativas de sequestro de carbono para curtos horizontes de tempo, após intervenção com manejo em pastagens sob áreas mantidas com manejos não-conservacionistas (MARTINS et al., 2017; PINTO et al., 2014).

Outro aspecto importante de ser mencionado é que, enquanto a premissa de um maior potencial de sequestro em áreas de maior degradação, como já sustentado anteriormente em literatura (SZAKÁCS, 2003), baseia-se no racional de que a perda anterior de carbono resulta numa capacidade maior de acumulação de carbono quando da recuperação dessa área em razão do déficit originado por essa parte anterior, a noção de que existe um ponto de saturação do carbono no solo que implique na limitação da capacidade sequestro pelo mesmo é questionada por alguns autores na literatura científica (FONTAINE et al., 2018; MATHIEU et al., 2015).

Há que se considerar ainda, que as atividades de recuperação e manejo da pastagem podem resultar num aumento de emissões em relação à linha de base, seja pelas emissões de metano provenientes de fermentação entérica, seja pela utilização de maquinários e outras associadas à utilização e deslocamento de matérias-primas, de modo que é possível o saldo líquido de sequestro de carbono gerado pelas intervenções de manejo e recuperação ser inferior aos resultados encontrados. Entretanto, atividades como intensificação da pecuária à base de pasto com manejo rotacional, e de integração pecuária-floresta, podem ser desenvolvidas para amortizar esse balanço (STANLEY et al., 2018; MACHADO FILHO et al., 2021). Destaca-se, portanto, a importância de se ter um olhar sistêmico e integrador das práticas de manejo agrícola e de paisagens a serem considerados por políticas públicas e incentivos de mercado, para orientar as práticas do setor rumo a uma trajetória de descarbonização alinhada a meta de limitar o aquecimento do planeta entre 1,5° e 2°C conforme preconizado pelo Acordo de Paris.

5.1.3. Análise crítica dos resultados e de desafios e perspectivas associados à recuperação de áreas degradadas em escala

Os resultados de potencial de sequestro de carbono pelas áreas de pastagem encontrados para os cálculos realizados variam de 0,433 Gt CO₂ a 1,273 Gt CO₂ para os diferentes cenários

considerados, e revelam que o poder de mitigação dos efeitos da mudança climática pelo sequestro de carbono nestas áreas de pastagens é pouco representativo, dado que o saldo de remoções para um período de 20 anos no cenário mais otimista é de aproximadamente 6,5 vezes inferior à quantidade de remoção de CO₂ necessária para reduzir 1 ppm de concentração do gás na atmosfera. Atualmente a concentração de CO₂ na atmosfera encontra-se em aproximadamente 140 ppm de CO₂ acima dos níveis pré-industriais. Este resultado reforça que a melhor medida para conter o agravamento dos efeitos da mudança do clima é evitar novas emissões de GEE para a atmosfera.

Todavia, a capacidade dos solos de sequestrar e armazenar carbono em um nível global não pode ser considerada desprezível. Pelo contrário, estudo recentemente publicado pelo United Nations Environment Programme (UNEP), revela que ao considerar os solos sob diferentes tipos de ocupação agrícola ao redor do mundo, o melhoramento das práticas de manejo poderia resultar num saldo de remoções anual de 31 Gt CO₂ (UNEP, 2022b), o suficiente para reduzir a concentração de CO₂ atmosférica em aproximadamente 4 ppm ao ano.

Neste sentido, observa-se atualmente um movimento em estágio inicial, porém crescente, que reúne desde grandes corporações e agentes até iniciativas difusas, voltado ao desenvolvimento de soluções que direta ou indiretamente contribuam para superar gargalos da regeneração de paisagens e pastagens em escala, com um apelo muito forte da perspectiva de capacidade destes sistemas em sequestrarem carbono. Estes arranjos envolvem desde inovações em modelo de negócio e/ou produto (ex: Inocas, Belterra, Agroforestry Carbon, InPlanet); novos empreendimentos com foco em reflorestamento surgidos da coalizão de grandes atores e/ou agentes com capacidade de grandes captações de investimento (ex: Biomas, Mombak, Re.Green); soluções tecnológicas e de inteligência para aumentar a integridade e potencial de escalabilidade de medições e projetos de carbono (ex: Pachama, Sylvera, Moss, Arable); e modelos alternativos e de baixo custo para certificação de carbono aumentando a acessibilidade do mercado voluntário a pequenos e médios produtores (ex: Bluebell Index, Carbify, Regen.Network, ONCRA).

Por fim, é fundamental que os setores público e privado criem as condições de incentivo e suporte necessárias à transição dos sistemas produtivos agropecuários com adoção de práticas conservacionistas e regenerativas, como assistência técnica e extensão rural (ATER), programas de incentivo e linhas de crédito, tendo desenhos adequados às necessidades dos diferentes atores que podem desempenhar um papel de contribuição neste contexto.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados revelam que pastagens manejadas podem sustentar taxas de sequestro de carbono pelo solo tão altas quanto 2,50 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, acima da média encontrada em literatura, por períodos prolongados de tempo, da ordem de 20 anos. Em razão da grande quantidade de variáveis que influenciam nas taxas de SEQ, da quantidade limitada de publicações encontradas e a ausência de dados sobre algumas destas variáveis entre diferentes publicações, um conjunto maior de publicações e dados precisam ser analisados para conseguir estabelecer relações causais e de preponderância sobre o efeito de cada uma destas variáveis nas taxas de SEQ reportadas, através de análises multivariadas.

Para o recorte específico de pastagens restritas ao território da região sul do Brasil, o potencial de sequestro de carbono seja pouco representativo para promover uma redução significativa da concentração de CO₂ atmosférico em termos de mitigação das mudanças climáticas. Entretanto, de modo mais amplo a literatura sugere que o sequestro de carbono por solos sob manejo agropecuário pode desempenhar um papel relevante para este fim, integrando o conjunto de soluções e ações necessárias para uma trajetória compatível com as metas do Acordo de Paris, de limitar o aquecimento do planeta entre 1,5° e 2°C até o final do século.

Para isto, são necessários esforços coordenados e assegurar incentivos governamentais e financeiros para dar conta da escala e velocidade necessária de implementação destas medidas. Dentre os principais aspectos para o qual estes esforços devem ser direcionados, estão a formação de profissionais qualificados para atuarem no planejamento e implementação das práticas e estratégias para regeneração em escala, a estruturação das cadeias produtivas de insumos e infraestrutura necessárias, e mecanismos de financiamento robustos e acessíveis. Para que os instrumentos financeiros de carbono possam contribuir de forma relevante para impulsionar este cenário, é necessário acelerar o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias e abordagens que permitam medir a variação dos níveis de carbono no solo de maneira confiável, custo-efetiva e periódica em larga escala.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSAD, E. D., MARTINS, S. Agricultura de baixa emissão de carbono: a evolução de um novo paradigma. *Revista Agroanalysis*, 2015.
- ALVES, L. A., DENARDIN, L. G. O., MARTINS, A. P., BAYER, C., VELOSO, M. G., BREMM, C., CARVALHO, P. C. F., MACHADO, D. R., TIECHER, T. The effect of crop rotation and sheep grazing management on plant production and soil C and N stocks in a long-term integrated crop-livestock system in Southern Brazil. *Soil & Tillage Research* 203, 104678, 2020.
- ASSMAN, J. M., ANGHINONI, I. MARTINS, A. P., COSTA, S. E. V. G. A., CECAGNO, D., CARLOS, F. S., CARVALHO, P. C. F. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop–livestock system under no-tillage in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 190, 52–59, 2014.
- AVILA-DIAZ, A., BENEZOLI, V., JUSTINO, F., TORRES, R., WILSON, A. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Climate Dynamics*, ISSN 0930-7575, Springer. Germany, 2020.
- BALDOTTO, M. A. et al. Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. *Revista Ceres*, v. 62, n. 3, p. 301–309, 2015.
- BERNOUX, M. & VOLKOFF, B. Soil carbon stock in soil ecoregions of Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth, p. 65-75, 2006.
- BERNOUX, M, CARVALHO, M. C. S., VOLKOFF, B., CERRI, C. C. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Science Society of America Journal*, v. 66, p. 888-896, 2002.
- BERNOUX, M., ARROUAYS, D., CERRI, C. C., BOURENNANE, H. Modelling vertical distribution of carbon in Oxisols of the Western Brazilian Amazon (Rondônia). *Soil Sci.* 163, 941–951, 1998.
- BIELUCZYK, W., PICCOLO, M. C., PEREIRA, M. G. et al. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil, *Geoderma* 371, 114368, 2020.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*, v. 9, p. 177-213, 1989.
- BRAIDA, J. A., BAYER, C., ALBUQUERQUE, J. A., REICHERT, J. M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. Em: FILHO, O. K., MAFRA, A. L., GATIBONI, L. C. Tópicos em ciência do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG. Vol. 1, 2007.
- BUSTAMANTE, M. M. C., CORBEELS, M., SCOPEL, E., ROSCOE, R. Soil carbon and sequestration potential in the Cerrado Region of Brazil. In: LAL, R., CERRI, C. C., BERNOUX, M., ETCHEVERS, J., CERRI, C. E. P. (Eds.), Carbon Sequestration in soils of Latin America. pp. 285–304, 2006.

CÁCERES, N. T. Pastagem degradada: Reforma ou recupero?. 2020. Disponível em: <https://www.comprerural.com/pastagem-degradada-reforma-ou-recupero/>. Acessado em 21/10/2023.

CARBONBRIEF. Analysis: Which countries are historically responsible for climate change?. Disponível em: <https://www.carbonbrief.org/analysis-which-countries-are-historically-responsible-for-climate-change>. Acessado em 06/11/2021.

CARDOZO JR., F. M., CARNEIRO, R. F. V., LEITE, L. F. C., ARAUJO, A. S. F. Soil carbon pools in different pasture systems. Spanish Journal of Agricultural Research, Volume 14, Issue 1, e11SC01, 2016.

CARTER, M.R. Organic matter and sustainability. In: REES, B.C.; BALL, B.C.; CAMPBELL, C.D. & WATSON, C.A., eds. Sustainable management of soil organic. Wallingford, CAB International, p.9-22, 2001.

CARVALHO, J. L. N. et al. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, p.277-289, 2010a.

CARVALHO, J. L. N., RAUCCI, G. S., CERRI, C. E. P., BERNOUX, M., FEIGL, B. J., WRUCK, F. J., CERRI, C. C. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. Soil & Tillage Research 110, p. 175–186, 2010b.

CDIAC – CARBON DIOXIDE INFORMATION ANALYSIS CENTER. Glossary: Carbon Dioxide and Climate. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 1990. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20170118004650/http://cdiac.ornl.gov/pns/convert.html>. Acessado em 19/08/2023.

CDP – CARBON DISCLOSURE PROJECT. Puttin a price on carbon: The state of internal carbon pricing by corporates globally. 2021.

CECAGNO, D., GOMES, M. V., COSTA, S. E. V. G, MARTINS, A. P., DENARDIN, L. G. O., BAYER, C., ANGHINONI, I., CARVALHO, P. C. F. Soil organic carbon in an integrated crop-livestock system under different grazing intensities. Rev. Bras. Cienc. Agrar., Recife, v.13, n.3, e5553, 2018.

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. PIB do Agronegócio cresceu abaixo das projeções. USP/ESALQ, Piracicaba, 2022. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/releases/pib-agro-cepea-pib-do-agro-cresce-8-36-em-2021-participacao-no-pib-brasileiro-chega-a-27-4.aspx>. Acessado em 12/08/2023.

CERRI, C. E. P. et al. Modeling Soil Carbon from Forest and Pasture Ecosystems of Amazon, Brazil. Soil Science Society of America Journal, v. 67, n. 6, p. 1879–1887, 2003.

CERRI, C. C., BERNOUX, M., ARROUAYS, D., FEIGL, B. J., PICCOLO, M. C. Carbon stocks in soils of the Brazilian Amazon. In: LAL, R., KIMBLE, J., FOLLET, R., STEWART, B. A. (Eds.), Global Climate Change and Tropical Ecosystems, Advances in Soil Science. pp. 33–50, 1999.

CERÓN, W. L., KAYANO, M. T., ANDREOLI, R. V., AVILA-DIAZ, A., AYES, I., FREITAS, E. D., MARTINS, J. A., SOUZA, R. A. F. Recent intensification of extreme precipitation events in the La Plata Basin in Southern South America (1981-2018). *Atmospheric Research*, 249 (2021) 105299, Elsevier. 2020.

CHAGAS, V. B. P. Mudanças nos regimes de chuva e vazão no Brasil, de 1980 a 2015. Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2019.

COHEN-SHACHAM, E., WALTERS, G., JANZEN, C. AND MAGINNIS, S. Nature-based Solutions to address global societal challenges. Gland, Switzerland: IUCN. Xiii, 97pp, 2016.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, n. 5, p. 777–788, 2005.

COSTA, B. M. Método ecológico de manejo de pastagens naturais. Cruz das Almas: IPEAL, 32p., 1973.

COSTA, B. M. Tipos de pastagens. Em: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA. Salvador, p. 180-181, 1976.

COSTA, B. M. Tipos de pastagens sob o ponto de vista ecológico. *Agronline/Agrociência*, 2003.

DALAL, R. C., HARMS, B. P., KRULL, E. S., WANG, W. Total soil organic matter and its labile pools following mulga (*Acacia aneura*) clearing for pasture development and cropping 1. Total and labile carbon. *Australian Jour. of Soil Res.*, v. 43, n. 1, p. 13-20, 2005.

DCCEEW – DEPARTMENT OF CLIMATE CHANGE, ENERGY AND THE ENVIRONMENT AND WATER. Reducing agricultural and land sector emissions. Disponível em: <https://www.dcceew.gov.au/climate-change/emissions-reduction/agricultural-land-sectors>. Acessado em 21/10/2023.

DHILLON, R. S.; VON WUEHLISCH, G. Mitigation of global warming through renewable biomass. *Biomass and Bioenergy*, v. 48, p. 75–89, 2013.

DIAS-FILHO, M. B. Degradação de Pastagens: Processos, Causas e Estratégias de Recuperação, 4th ed.; Embrapa Amazônia Oriental: Belém, Brazil, 2011.

DORAN, J.W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. Anais. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997.

DOS SANTOS, C. A., REZENDE, C. P., PINHEIRO, E. F. M., PEREIRA, J. M., ALVES, B. J. R., URQUIAGA, S., BODDEY, R. M. Changes in soil carbon stocks after land-use change from native vegetation to pastures in the Atlantic Forest region of Brazil. *Geoderma* 337, 394–401, 2019.

ECOSYSTEM MARKETPLACE. Ecosystem Marketplace insights brief – The art of integrity: State of the voluntary carbon markets 2022 Q3. 2022. Disponível em:

<https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-the-voluntary-carbon-markets-2021/>. Acessado em 19/08/2023.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Estoque de carbono nos solos do Brasil. Embrapa Solos: Rio de Janeiro, 2007.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Mapa de estoque de carbono orgânico do solo do Brasil (90 m - Versão 2021). Disponível em: <http://geoinfo.cnps.embrapa.br/>. Acessado em 19/02/2022.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Brasil é o quarto maior produtor de grãos e o maior exportador de carne bovina do mundo, diz estudo. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62619259/brasil-e-o-quarto-maior-produtor-de-graos-e-o-maior-exportador-de-carne-bovina-do-mundo-diz-estudo>. Acessado em 12/03/2022.

EEA – ENVIRONMENTAL EUROPEAN AGENCY. Trends in atmospheric concentrations of CO₂ (ppm), CH₄ (ppb) and N₂O (ppb), between 1800 and 2017. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/atmospheric-concentration-of-carbon-dioxide-5>. Acessado em 10/02/2022.

FARIA, O. C. O., TORRES, G. N., DI RAIMO, L. A. L., COUTO, E. G. Estimativa do estoque de carbono no solo via espectroscopia de reflectância difusa (vis/nir) sensoriamento remoto aéreo e orbital. Rev. Caatinga, Mossoró, v. 36, n. 3, p. 675–689, 2023.

FAYAD, J. A., ARL, V., COMIN, J. J., MAFRA, A. L., MARCHESI, D. R. Sistema de Plantio Direto de Hortaliças. Epagri, Florianópolis, 431p. 2019.

FONTAINE, S. STAHL, C., KLUMPP, K. et al. Response to Editor to the comment by Schipper & Smith to our paper entitled “Continuous soil carbon storage of old permanent pastures in Amazonia”. Glob Change Biol. 24:e732–e733, 2018.

FRIEDLINSSTEIN, P. et al. Global Carbon Budget 2020. Earth Syst. Sci. Data, 12, 3269–3340, 2020.

FRONZA, E. E. Caracterizando ondas de calor no centro-sul do Brasil, de 1980 a 2019. Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2018.

GOMES, L. C. et al. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. Geoderma, v. 340, n. January, p. 337–350, 2019.

HENGL, T., HEUVELINK, G. B. M., KEMPEN, B., LEENAARS, J. G. B., WALSH, M. G., SHEPHERD, K. D., SILA, A., MACMILLAN, R. A., JESUS, J. M. D., TAMENE, L., TONDOH, J. E. Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: Random forests significantly improve current predictions. PLoS ONE, v. 10, n. 6, p. 1–26, 2015.

HÖGLUND, R. Carbon can be temporarily stored for long time. 2022. Disponível em: <https://roberthoglund.medium.com/carbon-can-be-temporarily-stored-for-a-long-time-4bd7f94e3156>. Acessado em 19/08/2023.

HORST-HEINEN, T. Z. Soil organic carbon prediction by diffuse reflectance spectroscopy: Analytical methods, preprocessing techniques, and model architectures. Doctoral Thesis, Federal University of Santa Maria (UFSM), 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Agropecuário 2017. Rio de Janeiro, 2019a.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapa de Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2019b.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção Agrícola Municipal. Rio de Janeiro, 2021.

ICC – INTERNATIONAL CHAMBER OF COMMERCE. Oportunidades para o Brasil em Mercados de Carbono. Autores: ALBUQUERQUE, L., GAVIOLI, L., MARGULIS, S., BARRETO, C., CLEMENTE, F., GOULART, J., ESPOSITO, S. Revisão Técnica: PEREIRA, H., WANDERLEY, R., PINHEIRO, A. 63p., 2021.

IPCC. Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2022.

IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [MassonDelmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2021.

IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 2: Generic methodologies applicable to multiple land-use categories. Published: IPCC, Switzerland, 2019.

IPCC. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press, 2018.

IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel

on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp, 2014.

IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp. 2007.

IZAURREALDE, R. C., WILLIAMS, J. R., POST, W. M., THOMSON, A. M., MCGILL, W. B., OWENS, L. B., LAL, R. Long-term modeling of soil C erosion and sequestration at the small watershed scale. *Clim. Chang.* 80 (1–2), p. 73–90, 2007.

JENNY, H. Factors of soil formation. McGraw-Hill, New York, 1941.

JONES, M. B., DONNELLY, A. Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO₂. *New Phytologist*, v. 164, n. 3, p. 423–439, 2004.

LAL, R., KIMBLE, J. M., FOLLETT, R., COLE, C. V. The Potential of US Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect. Chelsea, MI: Sleeping Bear Press. 1998.

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

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, v. 123, n. 1–2, p. 1–22, 2004b.

LAPIG – LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E GEOPROCESSAMENTO. Atlas Digital das Pastagens Brasileiras. Universidade Federal de Goiás. Disponível em: <https://lapig.iesa.ufg.br/p/38972-atlas-das-pastagens>. Acessado em 12/08/2023.

LEMOS, A. L. F., VITAL, M. H. F., PINTO, M. A. C. As florestas e o painel de mudanças climáticas da ONU. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 32, p. 153-192, 2010.

LOSS, A., GONZATTO, R., CESCO, S., MIMMO, T., PII, Y., VENTURA, B. S., GIUMBELLI, L. D., SOARES, C. R. F. S., PAULA, B. D., BRUNETTO, G. Rizosfera e as reações que ocorrem no seu entorno. Em: FAYAD, J. A., ARL, V., COMIN, J. J., MAFRA, A. L., MARCHESI, D. R. Sistema de Plantio Direto de Hortaliças. Epagri, Florianópolis, 431p. 2019.

LÜTZOW, M. V. et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions - A review. *European Journal of Soil Science*, v. 57, n. 4, p. 426–445, 2006.

MACEDO, M. C. M., ZIMMER, A. H. Sistema pasto-lavoura e seus efeitos na produtividade agropecuária. In: Simpósio Sobre Ecossistema de Pastagens, 1993. Jaboticabal: FUNEP, 1993.

MACHADO, L. C. P. Pastoreio Racional Voisin: tecnologia agroecológica para o terceiro milênio. Porto Alegre: Cinco continentes, 2004.

MACHADO FILHO, L. C. P., SEÓ H. L. S., DAROS, R. R., ENRIQUEZ-HIDALGO, D., WENDLING, A. V., MACHADO L. C. P. Voisin Rational Grazing as a Sustainable Alternative for Livestock Production. *Animals*, 11:3494, 2021.

MACHADO L. A., LEMPP, B., DO VALLE, C. B., et al. Principais espécies forrageiras utilizadas em pastagens para gado de corte. Em: PIRES, A. V. (Ed.). *Bovinocultura de corte*. Piracicaba: FEALQ, 2010.

MAIA, S. M. F., CARVALHO, J. L. N., CERRI, C. E. P., LAL, R., BERNOUX, M., GALDOS, M. V., CERRI, C. C. Contrasting approaches for estimating soil carbon changes in Amazon and Cerrado biomes. *Soil & Tillage Research* 133, 75-84, 2013.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomass – Coleção 6 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>. Acessado em 12/08/2023.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 3.ed London: Elsevier, p. 643, 2012.

MARTINS, A. P., DENARDIN, L. G. O., BORIN, J. B. M., CARLOS, F. S., BARROS, T., OZÓRIO, D. V. B., CARMONA, F. C., ANGHINONI, I., CAMARGO, F. A. O., CARVALHO, P. F. C. Short-term impacts on soil-quality assessment in alternative land uses of traditional paddy fields in southern brazil. *Land Degrad. Develop.* 28: 534–542, 2017.

MATHIEU, J., HATTE, C., BALESSENT, J., PARENT, E. Deep soil carbon dynamics are driven more by soil type than by climate: A worldwide meta-analysis of radiocarbon profiles. *Global Change Biology*, 21, 4278–4292, 2015.

MCDONALD, S. E., BADGERY, W., CLARENDON, S., ORGILL, S., SINCLAIR, K., MEYER, R., BUTCHART, D. B., ECKARD, R., ROWLINGS, D., GRACE, P., DORAN-BROWNE, N., HARDEN, S., MACDONALD, A., WELLINGTON, M., PACHAS, A. N. A., EISNER, R., AMIDY, M., HARRISON, M. T. Grazing management for soil carbon in Australia: A review. *J Environ Manage.* 2023.

MCKINSEY. A blueprint for scaling voluntary carbon markets to meet the climate challenge. Report, 2021. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/a-blueprint-for-scaling-voluntary-carbon-markets-to-meet-the-climate-challenge>. Acessado em 27/08/2023.

MCTI – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Quarto inventário nacional de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa – Relatório de referência: setor uso da terra, mudança do uso da terra e florestas. 2020.

MELLO, F.F.C.; CERRI, C.E.P.; BERNOUX, M.; VOLKOFF, B. & CERRI, C.C. Potential of soil carbon sequestration for the Brazilian Atlantic Region. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth. p.349-368, 2006.

MILKYWIRE. Guidance for setting an internal carbon fee. 2022. Disponível em: https://assets.ctfassets.net/8dzj5s79jaus/23ccBFadsLIZWbA6tJEawe/8ebf3573a5486f9ec4084d7e57e04b41/White_paper_Guidance_for_setting_an_internal_carbon_fee_.pdf. Acessado em 19/08/2023.

MORAES, J. F. L., VOLKOFF, B., CERRI, C. C., BERNOUX, M. Soil properties under Amazon Forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma* 70, 63–81, 1996.

MOSIER, S., APFELBAUM, S., BYCK, P., CALDERON, F., TEAGUE, R., THOMPSON, R., COTRUFO, M. F. Adaptive multi-paddock grazing enhances soil carbon and nitrogen stocks and stabilization through mineral association in southeastern U.S. grazing lands. *Journal of Environmental Management*, v. 288, 2021.

NEILL, C., MELILLO, J. M., STEUDLER, P. A., CERRI, C. C., MORAES, J. F. L., PICCOLO, M. C., BRITO, M. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in the southwestern Brazilian Amazon. *Ecol. Appl.* 7, 1216–1225, 1997.

NICOLOSO, R. S., LOVATO, T., AMADO, T. J. C., BAYER, C., LANZANOVA, M. E. Balanço do carbono orgânico no solo sob Integração lavoura-pecuária no sul do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2425-2433, 2008.

NOAA – NATIONAL OCEAN AND ATMOSPHERIC AGENCY. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Global Monitoring Lab: Earth System Research Laboratories. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. Acessado em 27/08/2023.

OLIVEIRA, D. M. S., TAVARES, R. L. M., LOSS, A., MADARI, B. E., CERRI, C. E. P., ALVES, B. J. R., PEREIRA, M. G., CHERUBIN, M. R. Climate-smart agriculture and soil C sequestration in Brazilian Cerrado: a systematic review. *Rev Bras Cienc Solo* 2023;47nspe:e0220055, 2023.

OLIVEIRA, D. C., OLIVEIRA, D. M. S., FREITAS, R. C. A., BARRETO, M. S., ALMEIDA, R. E. M., BATISTA, R. B., CERRI, C. E. P. Depth assessed and up-scaling of single case studies might overestimate the role of C sequestration by pastures in the commitments of Brazil's low-carbon agriculture plan. *Carbon Management*, 12:5, 499-508, 2021.

OLIVEIRA, G. M., VIDAL, D. G., MAIA, R. L., ESTRADA, R. O que significa descarbonizar? Uma visão da sociedade atual sem energia fóssil. *Sustentabilidade e Descarbonização: Desafios Práticos*, p. 9–27, 2020a.

OLIVEIRA, P. P. A., BERNDT, A., PEDROSO, A. F., ALVES, T. C., PEZZOPANE1, J. R. M., SAKAMOTO, L. S., HENRIQUE, F. L., RODRIGUES, P. H. M. Greenhouse gas balance and carbon footprint of pasture-based beef cattle production systems in the tropical region (Atlantic Forest biome). *Animal* (2020), 14:S3, pp s427–s437, 2020b.

OLIVEIRA, P. P. A., RODRIGUES, P. H. M., PRAES, M. F. F. M., PEDROSO, A. F., OLIVEIRA, B. A., SPERANÇA, M. A. BOSI, C., FERNANDES, F. A. Soil carbon dynamics in Brazilian Atlantic Forest converted into pasture-based dairy production systems. *Agronomy Journal*. 113:1136–1149, 2020c.

OLIVEIRA, D. M. S., LIMA, R. P., BARRETO, M. S. C., VERGURG, E. E. J., MAYRINK, G. C. V. Soil organic matter and nutrient accumulation in areas under intensive management and swine manure application. *J Soils Sediments* 17:1–10, 2017.

OLIVEIRA, E. S., REATTO, A., ROIG, H. L. Estoques de carbono do solo segundo os componentes da paisagem. *Cadernos de Ciência & Tec.*, Brasília, v. 32, n.1/2, p. 71-93, 2015.

OLSON, K. R., AL-KAISI, M., LAL, R., CIHACEK, L. Impact of soil erosion on soil organic carbon stocks. *J. Soil Water Conserv.* 71, 61A–67A. 71.3.61A, 2016.

OUR WORLD IN DATA. Greenhouse gas emissions. Disponível em: <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>. Acessado em 13/08/2023.

PARENTE, L., MESQUITA, V., MIZIARA, F., BAUMANN, L., FERREIRA, L. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. *Remote Sens. Environ.* 2019.

PARRON, L. M., FIDALGO, E. C. C., LUZ, A. P., CAMPANHA, M. M., TURETTA, A. P. D., PEDREIRA, B. C. C. G., PRADO, R. B. Research on ecosystem services in Brazil: a systematic review. *Rev. Ambient. Água*, 14 (3), 2019.

PILON, C. N., MIELNICZUK, J., NETO, L. M. Dinâmica da matéria orgânica no ambiente. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2002.

PINTO, J. C. PIMENTEL, R. M., ZINN, Y. L., CHIZZOTTI, F. H. M. Soil organic carbon stocks in a Brazilian Oxisol under different pasture systems. *Tropical Grasslands – Forrajes Tropicales*, V. 2, 121–123, 2014.

PIVA, J. T., DIECKOW, J., BAYER, C., PERGHER, M., ALBUQUERQUE, M. A., MORAES, A., PAULETTI, V. No-tillage and crop-livestock with silage production impact little on carbon and nitrogen in the short-term in a subtropical Ferralsol. *Rev. Bras. Cienc. Agrar.*, Recife, v.15, n.3, e7057, 2020.

PIVA, J. T., DIECKOW, J., BAYER, C., ZANATTA, J. A., MORAES, A., TOMAZI, M., PAULETTI, V., BARTH, G., PICCOLO, M. C. Soil gaseous N₂O and CH₄ emissions and carbon pool due to integrated crop-livestock in a subtropical Ferralsol. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 190, 87–93, 2014.

QUINTÃO, J. M. B., CANTINHO, R. Z., ALBUQUERQUE, E. R. G. M., MARACAHIPES, L., BUSTAMANTE, M. M. C. Mudanças do uso e cobertura da terra no Brasil, emissões de GEE e políticas em curso. *Ciência e Cultura*, v. 73, p. 18-24, 2021.

RABOBANK. Agroforestry In Action – Carbon removal units: Organically Restoring Nature. Disponível em: <https://www.rabobank.com/en/about-rabobank/innovation/acorn/index.html>. Acessado em 13/02/2022.

RAMALHO, B., DIECKOW, J., BARTH, G., SIMON, P. L., MANGRICH, A. S., BREVILIERI, R. C. No-tillage and ryegrass grazing effects on stocks, stratification and lability of carbon and nitrogen in a subtropical Umbric Ferralsol. *Eur J Soil Sci.* 71:1106–1119, 2020.

RAMOS, M. PL n. 528/2021 – Regulamenta o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE), determinado pela Política Nacional de Mudança do Clima. Câmara dos Deputados, Gabinete do Deputado Marcelo Ramos. Brasília, DF, 2009.

RENATURE. reNature generates first Agroforestry carbon credits in Brazil with Rabobank. 19 de agosto de 2021. Disponível em: <https://www.renature.co/articles/renature-generates-first-agroforestry-carbon-credits-in-brazil-with-rabobank/>. Acessado em 13/02/2022.

RESENDE, L. O., MÜLLER, M. D., KOHMANN, M. M., PINTO, L. F. G., JUNIOR, L. C., ZEN, S. D., REGO, L. F. G. Silvopastoral management of beef cattle production for neutralizing the environmental impact of enteric methane emission. *Agroforest Syst*, 94:893–903, 2020.

RIBEIRO, R. H., IBARR, M. A., BESEN, M. R., BAYER, C., PIVA, J. T. Managing grazing intensity to reduce the global warming potential in integrated crop–livestock systems under no-till agriculture. *British Society of Soil Science: Eur J Soil Sci*. 71:1120–1131, 2020.

ROCKSTRÖM, J., STEFFEN, W., NOONE, K. J., PERSSON, Å., CHAPIN III, F. S., LAMBIN, E. F., LENTON, T. M., SCHEFFER, M., FOLKE, C., SCHELLNHUBER, H. J., NYKVIST, B., DE WIT, C. A., HUGHES, T. P., DER LEEUW, S. V., RODHE, H., SÖRLIN, S., SNYDER, P. K., CONSTANZA, R., SVEDIN, U., FALKENMARK, M., KARLBERG, L., CORELL, R. W., FABRY, V. J., HANSEN, J., WALKER, B., LIVERMAN, D., RICHARDSON, K., CRUTZEN, P. J., FOLEY, J. A. A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475, 2019.

ROSSET, J. S., LANA, M. C., PEREIRA, M. G., SCHIAVO, J. A., RAMPIM, L., SARTO, M. V. M., SEIDEL, E. P. Carbon stock, chemical and physical properties of soils under management systems with different deployment times in western region of Paraná, Brazil. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, v. 35, n. 6, p. 3053-3072, 2014.

SANTANA, G. S., DICK, D. P., TOMAZI, M., BAYER, C., JACQUES, A. V. A. Chemical Composition and Stocks of Soil Organic Matter in a South Brazilian Oxisol under Pasture. *J. J. Braz. Chem. Soc.*, Vol. 24, No. 5, 821-829, 2013.

SEEG. Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Observatório do Clima. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acessado em 12/08/2023.

SEGNINI, A., XAVIER, A. A. P., OTAVINI-JUNIOR, P. L., OLIVEIRA, P. P. A., PEDROSO, A. F., PRAES, M. F. F. M., RODRIGUES, P. H. M., MILORI, D. M. B. P. Soil carbon stock and humification in pastures under different levels of intensification in Brazil. *Sci. Agric*. v.76, n.1, p.33-40, 2019.

SEGNINI, A., MILORI, D. M. B. P., SIMÕES, M. L., SILVA, W. T. L., PRIMAVESI, O., MARTIN-NETO, L. Potencial de sequestro de carbono em área de pastagem de *Brachiaria decumbens*. XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007.

SCHARLEMANN, J. P. W., TANNER, E., HIEDERER, R., KAPOS, V. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management* 5(1), p. 81-91, 2014.

SCHUCKMANN et al. Heat stored in the Earth system: where does the energy go? *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 2013–2041, 2020.

SEÓ, H. L. S., MACHADO FILHO, L. C. P., BRUGNARA, D. Rationally Managed Pastures Stock More Carbon than No-Tillage Fields. *Frontiers in Environmental Science*, v. 5, 2017.

SOUZA, D. D., COSTA, S. E. V. G. A., ANGHINONI, I., CARVALHO, P. C. F., ANDRIGUETI, M., CAO, E. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:1829-1836, 2009.

STANLEY, P. L., ROWNTREE, J. E., BEEDE, D. K., DeLONGE, M. S., HAMM, M. W. Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in Midwestern USA beef finishing systems. *Agr. Syst.* 162, p. 249–258, 2018.

STEFFEN, W., RICHARDSON, K., ROCKSTRÖM, J., CORNELL, S. E., FETZER, I., BENNET, E. M., BIGGS, R., CARPENTER, S. R., DE VRIES, W., DE WIT, C. A., FOLKE, C., GERTEN, D., HEINKE, J., MACE, G. M., PERSSON, L. M., RAMANATHAN, V., REYERS, B., SÖRLIN, S. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science* 347 (1259855) 2015.

SZAKÁCS, G. G. J. Sequestro de carbono nos solos – Avaliação das potencialidades dos solos arenosos sob pastagens, Anhembi – Piracicaba/SP. Dissertação de mestrado, CENA/USP, Piracicaba. 2003.

TARRÉ, R., MACEDO, R., CANTARUTTI, R. B., REZENDE, C. P., PEREIRA, J. M., FERREIRA, E., ALVES, B. J. R., URQUIAGA, S., BODDEY, R. M. The effect of the presence of a forage legume on nitrogen and carbon levels in soils under *Brachiaria* pastures in the Atlantic Forest region of the South of Bahia, Brazil. *Plant and Soil* 234: 15–26, 2001.

TITO, M. R., LEÓN, M. C., PORRO, R. Guia para determinação de carbono em pequenas propriedades rurais. 1. ed. Centro Mundial Agroflorestal (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA), 2009.

TOWNSEND, C. R., COSTA, N. L., PEREIRA, R. G. A. Recuperação e práticas sustentáveis de manejo de pastagens na Amazônia. Porto Velho, RO: Embrapa Rondônia, 2012.

TRENBERTH, K. E., JONES, P. D., AMBENJE, P., BOJARIU, R., EASTERLING, D., TANK, A., PARKER, A., RAHIMZADEH, F., RENWICK, J. A., RUSTICUCCI, M., SODEN, B. Observations: surface and atmospheric climate change. Chapter 3. *Climate Change*, 235–336, 2007.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. UN-convened Net-Zero Asset Owner Alliance: Target Setting Protocol—Second edition, 2022a.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies. Nairobi, 2022b.

USSIRI, D. A. N., JOHNSON, C. E. Characterization of organic matter in a northern hardwood forest soil by ¹³C NMR spectroscopy and chemical methods of organic matter could account

for variations in the structure and chemistry of organic matter in these forest soils. *Geoderma*, v. 111, p. 123–149, 2003.

VEZZANI, F. M., MIELNICZUK, J. Uma visão sobre a qualidade do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:743-755, 2009.

VIEIRA-FILHO, J. E. R., FISHLOW, A. *Agricultura e Indústria no Brasil Inovação e Competitividade*. Brasília, IPEA, 2017.

WEF – WORLD ECONOMIC FORUM. *The Global Risks Report 2023*. Switzerland, 2023.

WENDLING, B., JUCKSCH, I., MENDONÇA, E. S., VINHAL-FREITAS, I. C. Carbon and nitrogen changes in different compartments of the organic matter under agro-forestry pasture system. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 21, n. 4, p. 641-653, 2011.

WESTERHOLD et al. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*, 369, 1383-1387, 2020.

WILLIAMS, R. E., BLAKELY, B. D. Conservation of grazing land: the five general types of grazing lands. *Soil Conservation*, v. 3, n. 7, p. 115-157, 1967.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Copernicus confirms July 2023 was the hottest month ever recorded. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/media/news/copernicus-confirms-july-2023-was-hottest-month-ever-recorded>. Acessado em 13/08/2023.

WORLD BANK. *State and Trends of Carbon Pricing 2023*. 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10986/39796>. Acessado em 13/08/2023.

WORLD BANK *What You Need to Know About Nature-Based Solutions to Climate Change*. 2022a. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2022/05/19/what-you-need-to-know-about-nature-based-solutions-to-climate-change>. Acessado em 21/10/2023.

WORLD BANK. *State and Trends of Carbon Pricing 2022*. 2022b. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/37455>. Acessado em 27/08/2023.

WRI – WORLD RESOURCES INSTITUTE. *Agricultural Guidance for Brazil - Portuguese (Diretrizes Agropecuárias): Ferramenta de Cálculo Brasil*, v.3.10, 2020. In: *GHG Protocol – Agricultural Guidance*. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/node/602/%20>. Acessado em 08/02/2022.

XU, X., LIU, W., ZHANG, C., KIELY, G. Estimation of soil organic carbon stock and its spatial distribution in the Republic of Ireland. *Soil Use Manag.* v. 27, i. 2, p. 156-162, 2011.

ZHI, J., JING, C., LIN, S., ZHANG, C., LIU, Q., DEGLORIA, S. D., WU, J. Estimating Soil Organic Carbon Stocks and Spatial Patterns with Statistical and GIS-Based Methods. *PLoS ONE* 9(5): e97757, 2014.

ZIMMER, A. H., VERZIGNASSI, J. R., LAURA, V. A., DO VALLE, C. B., JANK, L., MACEDO, M. C. M. Escolha das forrageiras e qualidade de sementes. *Curso: formação, recuperação e manejo de pastagens*, 22-46, 2007.

ZIMMER, A. H., MACEDO, M. C. M., KICHEL, A. N., DE ALMEIDA, R. G. Degradação, recuperação e renovação de pastagens. Brasília, DF: Embrapa, 2012.

ZOMER, R. J., BOSSIO, D. A., SOMMER, R., VERCHOT, L. V. Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils. *Sci Rep* 7, 15554, 2017.

APÊNDICE

[Link de acesso Material Suplementar 1](#) – Tabela com relação completa de dados dos 23 artigos tabelados.

[Link de acesso Material Suplementar 2](#) – Tabela contendo somente a relação de dados selecionados do conjunto amostral de 17 artigos filtrados para condução das análises da pesquisa.