



Cartografando o silêncio do solo: a dinâmica do carbono orgânico no solo de 1987 a 2023 em Mato Grosso

Mapping the silence of the soil: the dynamics of soil organic carbon from 1987 to 2023 in Mato Grosso

G. D. S. Bisinoto*; D. F. Dias; F. L. Santos; E. V. P. Brum; R. B. Zanin;
E. S. Oliveira Junior

Centro de Pesquisa em Limnologia, Biodiversidade e Etnoecologia; Laboratório de Ictiologia do Pantanal Norte; Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais; Universidade do Estado do Mato Grosso, 78217-900, Cáceres-MT, Brasil

*gustavo.bisinoto@unemat.br

(Recebido em 30 de julho de 2025; aceito em 20 de setembro de 2025)

Manter o carbono no solo é fundamental para a fertilidade, retenção hídrica e equilíbrio climático. Contudo, o desmatamento sem um programa de manejo adequado acelera a perda de carbono orgânico do solo (COS), intensificando a erosão e liberando CO₂, o que compromete os serviços ecossistêmicos. Este estudo investiga a dinâmica espaciotemporal do COS no estado de Mato Grosso, Brasil, com foco nas implicações do desmatamento e expansão agropecuária sobre a estabilidade deste elemento. O objetivo do estudo é analisar tendências entre 1987 e 2023, utilizando dados integrados da plataforma MapBiomas Solo v2.0, Google Earth Engine e QGIS, aliando geotecnologias ao cruzamento de históricos de uso da terra. A metodologia envolveu a análise de séries temporais e elaboração de mapas temáticos, validados por métricas estatísticas como RMSE e R². Os resultados indicam aumento global modesto (0,88%) dos estoques de COS no período, mas ressaltam um preocupante aumento de áreas com baixo teor de carbono; regiões de desmatamento intenso, como no Pantanal e Cerrado, apresentaram grande vulnerabilidade à perda de carbono, enquanto terras indígenas e unidades de conservação se destacaram como hotspots de estoque. As discussões salientam que, embora práticas conservacionistas possam mitigar perdas, a restauração dos estoques naturais exige ações contínuas, políticas específicas e incentivos como créditos de carbono. Conclui-se que o monitoramento sistemático e a proteção de áreas prioritárias são indispensáveis para a resiliência edáfica regional. O fortalecimento de bancos de dados e um inventário nacional de COS são recomendados para subsidiar políticas públicas e adaptação climática.

Palavras-chave: mudanças climáticas, desmatamento, geotecnologias.

Maintaining soil carbon is fundamental for fertility, water retention, and climate equilibrium. However, deforestation without an adequate management program accelerates the loss of soil organic carbon (SOC), intensifying erosion and releasing CO₂, thereby compromising ecosystem services. This study investigates the spatiotemporal dynamics of SOC in the state of Mato Grosso, Brazil, focusing on the implications of deforestation and agricultural expansion for the stability of this element. The aim of the study is to analyze trends between 1987 and 2023, using integrated data from the MapBiomas Solo v2.0 platform, Google Earth Engine, and QGIS, combining geotechnologies with analyses of historical land use. The methodology involved time series analysis and the production of thematic maps, validated through statistical metrics such as RMSE and R². Results indicate a modest overall increase (0.88%) in SOC stocks during the period, but highlight a concerning expansion of areas with low carbon content; regions of intense deforestation, such as the Pantanal and Cerrado, exhibited pronounced vulnerability to carbon loss, whereas Indigenous lands and conservation units emerged as carbon stock hotspots. The discussion emphasizes that, although conservation practices can mitigate losses, restoring natural stocks requires continuous action, specific policies, and incentives such as carbon credits. It is concluded that systematic monitoring and the protection of priority areas are indispensable for regional edaphic resilience. Strengthening databases and establishing a national SOC inventory are recommended to support public policies and climate adaptation strategies.

Keywords: climate change, deforestation, geotechnologies.

1. INTRODUÇÃO

O carbono orgânico do solo (COS) representa a maior reserva de carbono terrestre, superando o carbono armazenado na vegetação e na atmosfera combinadas [1]. Estima-se que os solos

contenham cerca de 1.500 gigatoneladas de carbono nos primeiros 100 cm de profundidade, sendo fundamentais na regulação do clima global e no ciclo biogeoquímico do carbono [2].

O estado de Mato Grosso, localizado na região Centro-Oeste do Brasil, possui uma posição central na agenda ambiental e agropecuária nacional, abrangendo três importantes biomas: Amazônia, Cerrado e Pantanal. Considerando, sua vasta extensão territorial, Mato Grosso exerce influência direta sobre fluxos de carbono associados à mudança do uso da terra, desmatamento, expansão agrícola e regeneração florestal [3].

Recentemente, avanços nas tecnologias de sensoriamento remoto e acesso a bases de dados públicos, têm possibilitado uma nova abordagem para estimar o estoque de carbono no solo de maneira integrada e espacialmente explícita. A plataforma MapBiomas Solo (versão 2.0) disponibiliza informações sobre textura, profundidade, densidade aparente e carbono orgânico do solo para todo o território nacional, com base em modelos de *machine learning* aplicados a dados de amostras de solo georreferenciadas [4]. A análise dessas informações por meio do *Google Earth Engine* [5], combinada com a produção de mapas temáticos no QGIS, permite visualizar padrões espaciais de estoque de carbono e identificar áreas prioritárias para conservação e restauração. O avanço metodológico permitiu um monitoramento mais preciso, possibilitando um melhor controle da dinâmica de carbono do solo em escala regional e global [6].

A compreensão da distribuição espacial do carbono orgânico no solo é essencial para subsidiar políticas públicas voltadas à agricultura de baixo carbono, pagamentos por serviços ambientais e impactos nas estratégias de adaptação climática, uma vez que o manejo adequado do solo e consequentemente do carbono promove práticas agrícolas que reduzem emissões de CO₂ e aumentam a capacidade de suporte dos sistemas produtivos. Além disso, a identificação de áreas com alto potencial de estoque contribui para ações de planejamento territorial, conservação de recursos naturais e valorização dos serviços ecossistêmicos associados ao solo [7].

Mato Grosso desempenha um papel fundamental na dinâmica de uso e cobertura da terra no Brasil, destacando-se como um dos estados com maior taxa histórica de conversão florestal para atividades agropecuárias. Sua localização estratégica, cobrindo áreas dos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal, confere ao estado uma diversidade de paisagens naturais e um grande potencial produtivo. Contudo, essa diversidade também o torna um dos principais focos de pressão antrópica, especialmente pelo avanço da agricultura mecanizada e da pecuária extensiva sobre áreas nativas [8]. O desmatamento em Mato Grosso representa o principal fator de alteração dos estoques de COS, e no Brasil, dados mostram que 75% das emissões nacionais de gás carbônico (CO₂) para a atmosfera são provenientes do desmatamento [7].

A conversão de florestas e savanas para pastagens e lavouras tem implicações diretas nos estoques de carbono, tanto na vegetação quanto no solo. Estudos apontam que mudanças no uso da terra em Mato Grosso foram responsáveis por grande parte das emissões de carbono do Brasil entre 2000 e 2018, com destaque para a perda de COS em áreas desmatadas ou degradadas [9]. Além disso, a substituição de vegetação nativa por monoculturas como soja e milho tem provocado alterações nos ciclos hidrológicos, no microclima regional e na biodiversidade, comprometendo a resiliência ecológica do território [10].

O cruzamento de uso e cobertura da terra, desmatamento e séries históricas de estoques de COS revelou a dinâmica do carbono em Mato Grosso através da análise estatística do impacto das atividades agropecuárias (pastagens e lavouras). Pesquisadores analisaram dados históricos em diferentes sistemas de uso da terra (pastagens, pastagens integradas com árvores, lavouras de soja, milho e algodão em sistemas de irrigação, lavoura-pecuária-floresta e agricultura irrigada) e detectaram uma tendência de aumento no estoque de COS nos diferentes usos do solo, exceto nas áreas irrigadas com pastagem [11].

Por outro lado, Mato Grosso também abriga iniciativas relevantes de restauração, agricultura de baixo carbono e intensificação sustentável, que vêm ganhando espaço nos últimos anos. O potencial para regeneração natural e para sistemas produtivos integrados, como a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), representa uma oportunidade concreta de reverter parte das perdas de carbono e promover uma transição ecológica no uso do solo [12]. Diante da magnitude das áreas já convertidas e da pressão contínua por novas áreas produtivas, identificar regiões com alto potencial de estoque de carbono no solo torna-se fundamental para orientar políticas públicas e ações estratégicas que conciliem produção agropecuária com conservação ambiental.

O COS é reconhecido como um indicador-chave da sustentabilidade dos ecossistemas, pois influencia diretamente a fertilidade do solo, a retenção de água, a biodiversidade edáfica e a resiliência frente a perturbações climáticas e antrópicas [1]. Solos com altos estoques de carbono são mais estruturados, promovem maior infiltração de água e tem menor erosão, além de servirem como tampões contra variações extremas de temperatura e umidade. A manutenção ou aumento do COS está diretamente associada à capacidade de suporte dos serviços ecossistêmicos, como fertilidade, capacidade de retenção de hídrica, e estabilidade estrutural do solo, tornando-se essencial para práticas agrícolas sustentáveis, programas de restauração ecológica e ações de mitigação das mudanças climáticas [13].

Além de sua função ecológica, o estoque de carbono no solo tem se consolidado como métrica de avaliação em políticas públicas e programas internacionais de clima e uso da terra, como a Iniciativa 4p1000 (“Quatro por mil”) a qual representa um movimento internacional lançado durante a Conferência do Clima de Paris (COP21), em 2015, com o objetivo de combater as mudanças climáticas por meio do aumento do carbono orgânico nos solos [14]. A resiliência ecológica – entendida como a capacidade dos ecossistemas de resistir e se recuperar de distúrbios – está fortemente vinculada à manutenção de estoques de carbono no solo, especialmente em regiões tropicais sujeitas a pressões intensas de uso da terra [15].

Apesar dos avanços na modelagem de atributos do solo, ainda persistem lacunas no conhecimento sobre a distribuição espacial do COS em escalas subnacionais, como a estadual. Muitas estimativas globais e nacionais de estoque de carbono baseiam-se em médias generalizadas ou em bancos de dados com baixa densidade amostral, o que reduz a precisão em regiões heterogêneas como Mato Grosso, onde coexistem solos de diferentes classes, profundidades e usos da terra [2, 16]. A ausência de mapeamentos detalhados e atualizados dificulta a identificação de *hotspots* de carbono no solo, bem como a avaliação dos impactos das mudanças no uso da terra e a implementação de políticas locais de mitigação climática fundamentadas em evidências.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo analisar o potencial de estoque de carbono orgânico no solo para o estado de Mato Grosso, utilizando dados da plataforma MapBiomass Solo, com processamento no *Google Earth Engine* e visualização em QGIS. A pesquisa busca identificar os principais padrões espaciais de distribuição do COS, com foco em sua relação com os diferentes usos e coberturas da terra, e apontar áreas estratégicas para conservação e manejo sustentável dos solos, visto que para projetos de crédito de carbono (como a plataforma Verra) utiliza-se metodologias no âmbito do REDD – Redução de Emissão por Desmatamento e Degradação florestal e um dos fatores que fundamentam a precificação final do crédito de carbono, principalmente em mercados não regulados.

A organização Verra inclui vários padrões de certificação de créditos de carbono, tendo como mais relevantes o *VCS – Verified Carbon Standard*, e o *CCB – Climate, Community and Biodiversity*. Após atender aos princípios de qualidade explicitados no padrão VCS, como demonstrar que a redução/remoção é real, adicional, mensurável, permanente, única e verificada, são emitidos as *VCU's – Verified Carbon Units* que são os créditos propriamente ditos e passíveis de comercialização. De acordo com as regras vigentes do padrão VCS da Verra, a linha de base precisa ser revisada após o sexto ano de implementação do projeto. De modo geral, projetos REDD com área inferior a 10 mil hectares tendem a se tornar economicamente inviáveis, ao passo que regiões de acesso mais fácil e cercadas por maiores índices de desmatamento passam a mostrar maior viabilidade [17].

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A escolha do estado do Mato Grosso, no centro-oeste do Brasil, assume grande importância para o estudo da dinâmica do COS, dado que abrange a conexão entre três importantes biomas (Amazônia, Cerrado e Pantanal), os quais possuem particularidades climáticas, geomorfológicas

e hidrológicas, que influenciam o ciclo do carbono. Na Amazônia, em decorrência do clima equatorial úmido, da textura argilosa dos solos e da vegetação densa, os estoques de carbono orgânico do solo são elevados, principalmente em áreas preservadas. O Cerrado apresenta clima sazonal e diferentes tipos de textura do solo e grande taxa de conversão para uso agrícola e pastagem, o que leva a estoques intermediários e risco de perda do COS. Já o Pantanal apresenta solos franco-arenosos e menor estoque de carbono, com maior sensibilidade à conversão para atividades agrícolas [18-20].

Com a variação espacial do desmatamento e da atividade agrícola, um gradiente no estoque de COS se estabelece, indicando que as áreas com remanescentes de vegetação nativa e áreas protegidas são locais importantes para a conservação e restauração dos estoques de COS. As características físicas do solo e o uso da terra têm influência direta no estoque de COS, e a granulometria se correlaciona com os teores de carbono dependendo do bioma. No Pantanal, por exemplo, solos com textura franco-arenosa, apresenta correlação negativa entre a argila e o carbono orgânico. Já no Cerrado, Mata Atlântica e Pampa, essa correlação pode ultrapassar 0,50 em profundidades superiores a 100 cm [19, 20].

2.2 Base de Dados

A aquisição de dados do estoque de COS de Mato Grosso foi realizada através da utilização da base de dados MapBiomas Solo v.2.0, a qual disponibiliza séries temporais de alta resolução para os anos de 1987 até 2023. Tais arquivos abrangem o uso e cobertura da terra, textura, densidade aparente e profundidade, sendo requisitos para a obtenção do COS, devido à sua complexidade e à visão multiescalar de Mato Grosso [19, 21].

A base MapBiomas Solo v.2.0 cobre os principais biomas (Amazônia, Cerrado e Pantanal) e variações dos estoques de COS do Estado em relação aos usos da terra, permitindo a análise espacial e temporal, com foco na dinâmica e tendência do COS em Mato Grosso. Os arquivos foram padronizados no tempo para possibilitar o cruzamento com as séries de dados de desmatamento e a identificação de relações causais entre as atividades agropecuárias, o avanço das pastagens e os estoques de COS [21].

O cruzamento dos dados históricos de desmatamento com os dados atuais permite uma análise retroativa dos impactos de políticas públicas e eventos climáticos (seca ou enchente) na dinâmica do carbono, fornecendo maior detalhamento, de acordo com o bioma, microbacia ou classe de solos. A validação dos dados utilizados é baseada em referências e estudos sobre solos brasileiros e análises estatísticas sobre a distribuição espacial do COS. A dimensão dos dados utilizados minimiza as incertezas da amostragem, com mais de 1.700 amostras de solos brasileiros [19].

2.3. Processamento no *Google Earth Engine* e visualização no QGIS

Os *scripts* implementados no *Google Earth Engine* (GEE) possibilitaram o pré-processamento dos dados, além da automatização do cálculo do estoque de COS em escala local através da equação de estimativa, que engloba a profundidade, a densidade aparente e o teor de carbono orgânico [6].

Neste estudo, foram utilizados os dados da Coleção 2 do MapBiomas Solo para estimar o estoque de Carbono Orgânico do Solo (COS) na camada superficial de 0 a 30 cm. Os mapas fornecem a distribuição do carbono expressa em toneladas por hectare (t/ha), com resolução espacial de 250 metros, possibilitando análises em diferentes escalas geográficas. A modelagem espacial do estoque de carbono foi realizada por meio de algoritmos de aprendizado de máquina (Random Forest), utilizando como variáveis preditoras dados de uso e cobertura da terra (MapBiomas – Coleção 8), características climáticas (precipitação, temperatura), relevo (altitude, declividade), textura do solo (frações de areia, silte e argila), entre outros fatores ambientais e edáficos. As estimativas foram obtidas com base nos dados do projeto internacional SoilGrids250m, calibrados com informações nacionais provenientes de bancos de solos da Embrapa, IBGE e do Projeto RadamBrasil. Os resultados foram expressos em toneladas por

hectare (t/ha) para os 30 cm iniciais do perfil do solo. As classes de concentração de carbono orgânico do solo adotadas pelo MapBiomass são as seguintes: 0 a 10 t/ha; 10 a 20 t/ha; 20 a 30 t/ha; 30 a 40 t/ha; 40 a 50 t/ha; 50 a 60 t/ha; 60 a 70 t/ha; 70 a 80 t/ha; mais de 80 t/ha.

O processamento foi realizado na plataforma *Google Earth Engine*, e os mapas finais foram analisados no QGIS para visualização e geração de produtos cartográficos. A validação do modelo foi feita com dados de campo e métricas estatísticas como o Erro Quadrático Médio (RMSE) e o coeficiente de determinação (R^2), assegurando robustez aos resultados. Esta análise do COS pode ser observada em <https://data.mapbiomas.org/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.58053/MapBiomass/3KXXVV>.

Embora o modelo de estimativa de Carbono Orgânico do Solo (COS) do MapBiomass Solo – Coleção 2 utilize técnicas robustas de aprendizado de máquina e dados nacionais calibrados, apresenta limitações significativas, especialmente em áreas próximas a corpos hídricos. A resolução espacial de 250 metros dificulta a representação da alta heterogeneidade ambiental de margens de rios, áreas alagáveis e zonas de transição, onde o acúmulo de carbono é altamente influenciado por variações locais de umidade e vegetação. Além disso, corpos d’água e áreas úmidas frequentemente são sub-representados ou classificados como “sem dados”, o que pode levar à subestimação dos estoques reais de carbono, uma vez que solos hidromórficos tendem a armazenar grandes quantidades de matéria orgânica devido às condições anóxicas. O modelo também não incorpora a dinâmica sazonal do lençol freático, fator fundamental em zonas ribeirinhas e várzeas, e depende em parte de bases globais como o SoilGrids, que possuem baixa densidade de amostragem em ambientes tropicais úmidos, reduzindo a acurácia das estimativas nesses contextos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise das áreas de carbono estocado no solo de MT

Entre 1987 e 2023, o estoque total de carbono orgânico no solo em Mato Grosso apresentou uma variação positiva de 0,88%, passando de aproximadamente 176.935.617 toneladas em 1987 para 178.494.104 toneladas em 2023 (Figura 1).

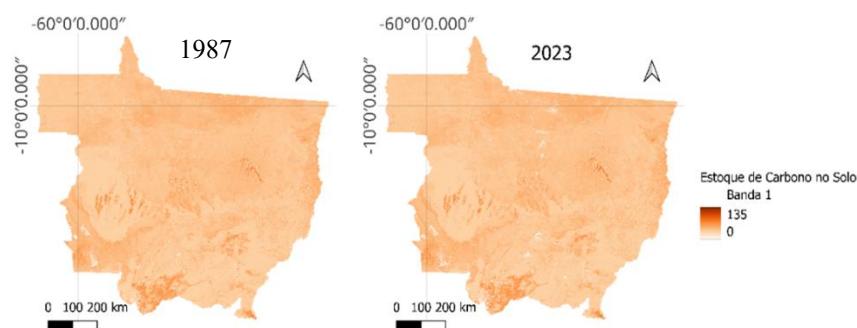


Figura 1 - Estoque de carbono no solo (t/ha) nos anos 1987 e 2023 no estado de Mato Grosso. Fonte: MapBiomass coleção 2.0.

Apesar da relativa estabilidade, quando se olha para o estado como um todo, observou-se uma leve tendência de crescimento ao longo das décadas, culminando em um pico em 2021, com um total de 178.716.782 toneladas. O menor valor da série corresponde ao próprio ano inicial da série, 1987, evidenciando que, embora o crescimento tenha sido modesto, houve um acréscimo contínuo em parte do período analisado. A taxa média anual de acréscimo foi de cerca de 41.013 toneladas por ano (Figura 2).

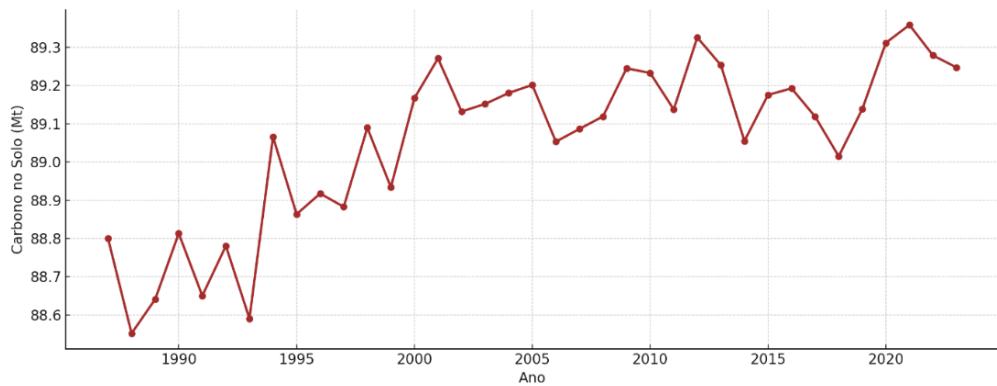


Figura 2 - Tendência do estoque de carbono no solo em Mato Grosso entre 1987 e 2023. Fonte: MapBiomass coleção 2.0.

De acordo com a Figura 3, a distribuição proporcional média do estoque de carbono no solo em Mato Grosso entre 1987 e 2023 revela forte concentração em duas faixas principais: a classe “30 a 40 t/ha”, com média de 49,2% do estoque total, e a classe “40 a 50 t/ha”, que representa 42,9%. Juntas, essas faixas concentram mais de 92% do COS no Estado. A classe “0 a 10 t/ha”, por sua vez, apresenta uma média menor que 1%. Já as classes mais elevadas, como “50 a 60 t/ha” e “60 a 70 t/ha”, representam respectivamente 5,7% e 1,9% do total, enquanto as faixas superiores (“70 a 80 t/ha” e “> 80 t/ha”) são residuais, juntas somando menos de 0,3% do estoque. A faixa “20 a 30 t/ha” praticamente não aparece na composição, indicando baixa ocorrência ou possível subestimativa nas bases utilizadas.

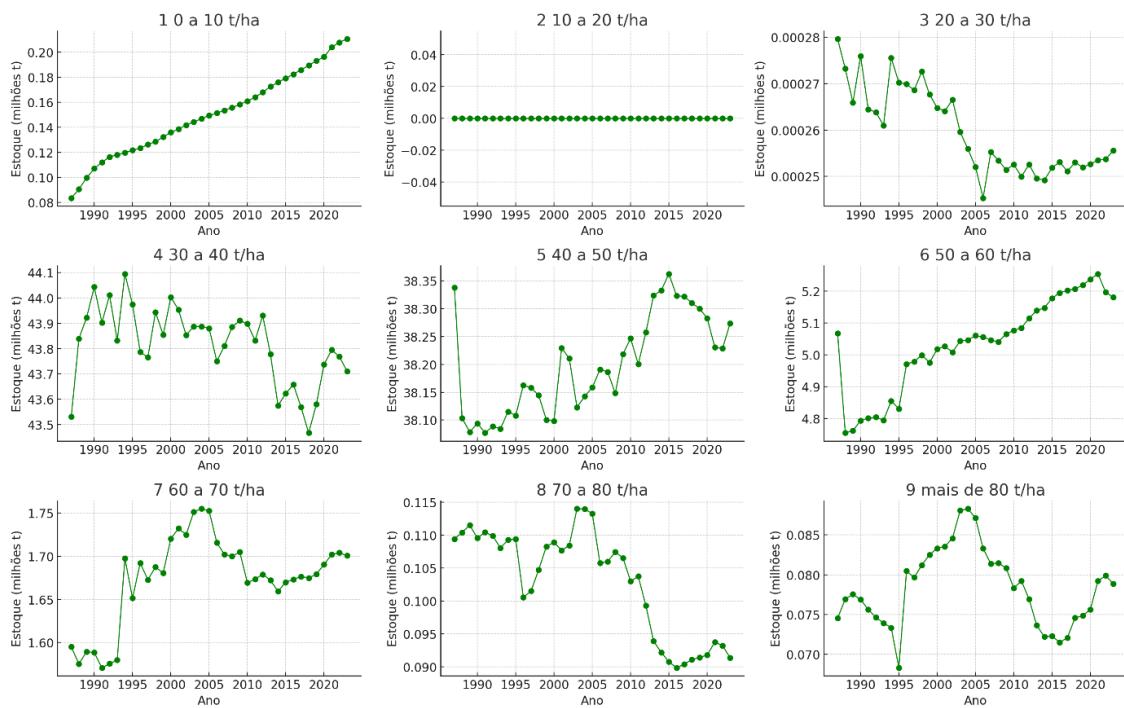


Figura 3 - Tendência de área do estoque de carbono no solo em Mato Grosso de 1987 a 2023 de acordo com as classes de concentração de carbono orgânico do solo adotadas pelo MapBiomass (1 a 9). Fonte: MapBiomass Coleção 2.0.

A análise temporal dos estoques de Carbono Orgânico do Solo (COS) por classes revela limitações metodológicas relevantes nos dados do MapBiomass Solo, especialmente nas faixas de 0 a 10 t/ha e 10 a 20 t/ha. Observa-se um crescimento linear e contínuo na classe de 0 a 10 t/ha,

sem oscilações ou estabilizações ao longo de mais de três décadas, o que sugere uma possível superclassificação de áreas como de baixo carbono em decorrência de processos de degradação não suficientemente detalhados pelo modelo. Ainda mais crítico, a classe de 10 a 20 t/ha apresenta valores nulos durante todo o período analisado, o que não é ecologicamente plausível e indica uma provável falha na atribuição ou representação desta faixa na modelagem ou na discretização dos dados. Esses padrões não refletem a variabilidade esperada em sistemas naturais e apontam para possíveis erros de categorização, ausência de calibração específica para faixas intermediárias e limitações na resolução espacial (250 m), que podem mascarar a heterogeneidade real do solo, sobretudo em áreas de transição ou marginais. Tais inconsistências reforçam a necessidade de cautela na interpretação dos resultados, sobretudo em estudos que dependem da acurácia das classes de menor estoque de carbono, recomendando-se a complementação com dados de campo e análises locais de alta resolução.

3.2 Análise da dinâmica do desmatamento no solo de Mato Grosso

Entre 1987 e 2023, Mato Grosso registrou um acumulado de aproximadamente 11,7 milhões de hectares desmatados, com variações anuais expressivas. O pico ocorreu em 2004, quando foram suprimidos cerca de 1,37 milhão de hectares de vegetação nativa, representando mais de 11% do desmatamento total do período. Houve uma queda acentuada até 2010 tendendo a se estabilizar nos anos seguintes. No entanto, a partir de 2019, a área desmatada voltou a crescer, alcançando 485 mil hectares em 2022, um aumento de mais de 119% em relação a 2012 (Figura 4).

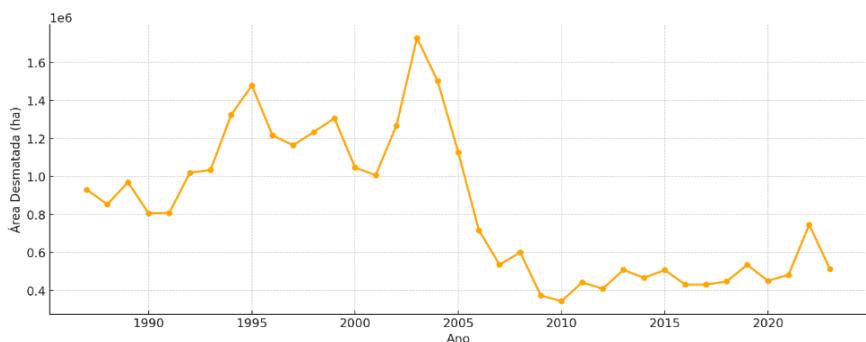


Figura 4 - Desmatamento anual em Mato Grosso de 1987 a 2023. Fonte: MapBiomass Coleção 2.0.

3.3 Relação entre carbono estocado e desmatamento em MT

A análise da relação entre o desmatamento anual e o estoque total de COS em Mato Grosso, no período de 1987 a 2023, revelou uma correlação negativa moderada e estatisticamente significativa (Spearman $R = -0,41$; $p = 0,012$; Figura 5). A regressão linear demonstrou uma tendência de declínio do estoque de carbono conforme aumentam os valores anuais de desmatamento, com um intervalo de confiança de 95% que reforça a consistência da relação observada.

A análise da relação entre o desmatamento anual e o estoque de carbono no solo em Mato Grosso (1987–2023), desagregada por classes de densidade (t/ha), revelou padrões estatisticamente significativos em sete das nove classes analisadas, com magnitudes de associação distintas (Figura 6). A classe “70 a 80 t/ha” apresentou a maior correlação com o desmatamento, com $R^2 = 0,47$ ($p < 0,001$), indicando que o menor desmatamento ocorreu em anos em que houve uma redução na concentração do carbono na área. Nota-se que já houve maior desmatamento quando a área dessa classe era maior e isto pode ter causado a redução desta área. Em seguida, destacam-se as classes “40 a 50 t/ha” ($R^2 = 0,42$; $p < 0,001$) e “20 a 30 t/ha” ($R^2 = 0,40$; $p < 0,001$), reforçando que mesmo os estoques intermediários e elevados de carbono no solo são sensíveis à pressão antrópica exercida pela conversão da vegetação nativa.

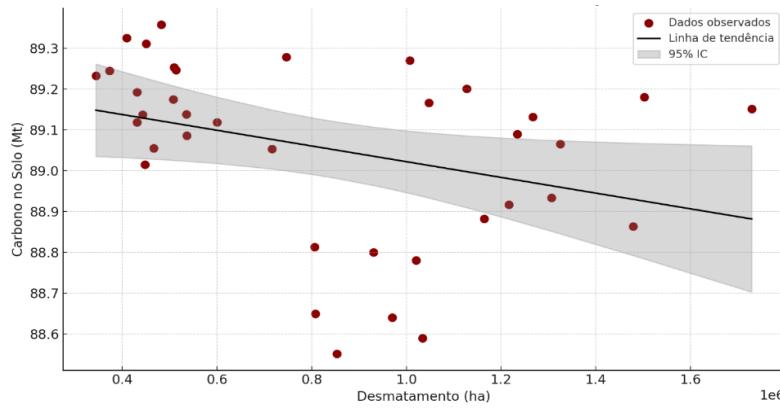


Figura 5 - Relação entre o desmatamento e o estoque de carbono no solo em Mato Grosso de 1987 a 2023. Fonte: MapBiomass Coleção 2.0.

A classe “0 a 10 t/ha”, representando solos degradados ou com baixa fertilidade, apresentou $R^2 = 0,36$ ($p < 0,001$), demonstrando que o aumento do desmatamento contribui diretamente para o crescimento dessa área de faixa de estoque. A classe “50 a 60 t/ha” também revelou associação significativa ($R^2 = 0,30$; $p < 0,001$), assim como a faixa “30 a 40 t/ha” ($R^2 = 0,22$; $p = 0,003$), evidenciando a vulnerabilidade até mesmo de solos relativamente estáveis frente ao avanço do desmatamento.

A classe “> 80 t/ha” mostrou uma correlação mais modesta, porém ainda significativa ($R^2 = 0,16$; $p = 0,013$). Por outro lado, a classe “60 a 70 t/ha” não apresentou correlação estatisticamente significativa ($R^2 = 0,02$; $p = 0,44$). Já a classe “10 a 20 t/ha” não pode ser avaliada devido à ausência de dados válidos para regressão. Esses resultados revelam que o desmatamento em Mato Grosso tem repercussões diretas sobre diferentes áreas de faixas de COS, desde as mais empobrecidas até as mais ricas, exigindo atenção especial a políticas de uso da terra que levem em conta a resiliência e a vulnerabilidade dos estoques edáficos.

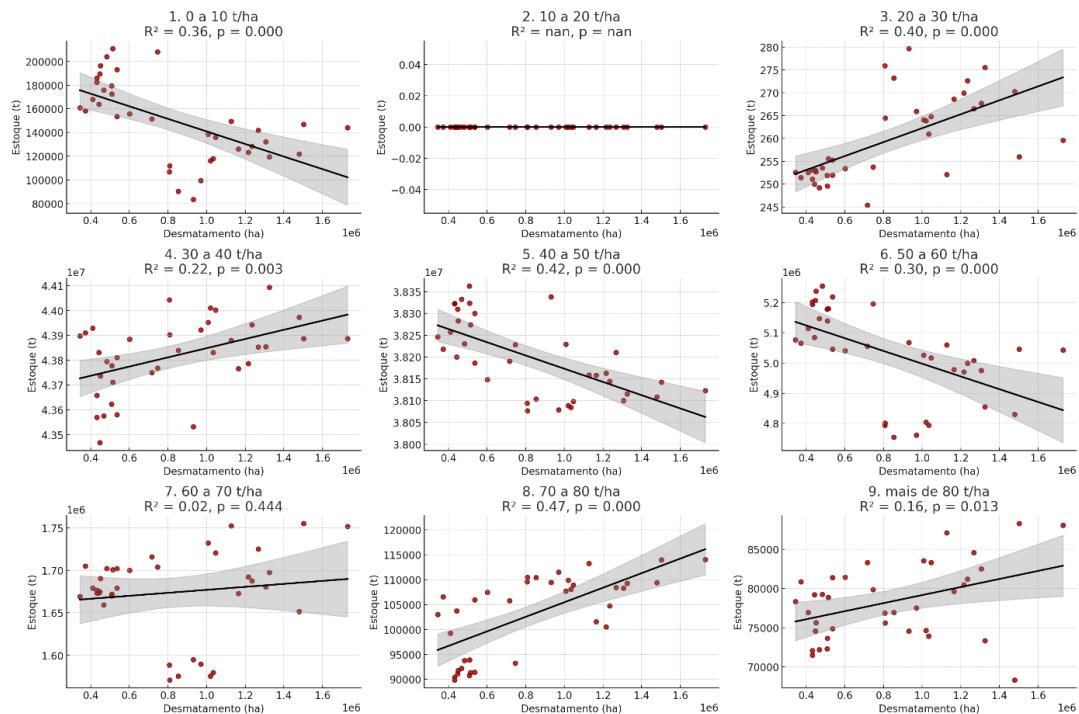


Figura 6 - Relação entre o desmatamento e o estoque de carbono no solo entre 1987 e 2023 por classe (1 a 9). Fonte: MapBiomass Coleção 2.0.

O quadro 1 apresenta a identificação de *hotspots* de áreas de risco e áreas de estoque de carbono, considerando os dados obtidos.

Quadro 1 - Identificação de Hotspots de áreas de risco e áreas de estoque de carbono.

Tipo	Gráficos da Figura 06	Identificação
Áreas de Risco (baixo estoque e alto desmatamento) Essas áreas são mais vulneráveis à perda de carbono e à degradação ambiental.	Gráfico 1 (0 a 10 t/ha)	Forte correlação negativa ($R^2 = 0,45$; $p < 0,0001$) Aumento do desmatamento reduz a área de estoque de carbono. Área crítica de risco → Baixo estoque + uso intensivo.
	Gráfico 5 (40 a 50 t/ha)	Correlação negativa ($R^2 = 0,41$; $p < 0,0001$) Redução acentuada de área de estoque com maior desmatamento. Área de risco moderado.
	Gráfico 6 (50 a 60 t/ha)	Correlação negativa ($R^2 = 0,47$; $p < 0,0001$) Alta perda de carbono com avanço do desmatamento. Área de risco elevado, embora com estoque médio-alto.
<i>Hotspots</i> de Estoque (alto estoque e baixa pressão) Estas áreas são prioritárias para conservação e têm papel importante no sequestro de carbono.	Gráfico 3 (20 a 30 t/ha)	Correlação positiva ($R^2 = 0,50$; $p < 0,0001$) Aparentemente, áreas com mais desmatamento em áreas onde existem maiores estoques — pode indicar áreas em transição ou regeneração. Necessita validação em campo, pode indicar <i>hotspot</i> potencial de estoque.
	Gráfico 4 (30 a 40 t/ha)	Correlação positiva fraca ($R^2 = 0,18$; $p = 0,009$) Pode indicar estabilidade de estoque em áreas com pressão moderada.
	Gráfico 8 (70 a 80 t/ha)	Correlação positiva moderada ($R^2 = 0,49$; $p < 0,0001$) Estoques elevados mesmo em áreas com grande quantidade de desmatamento. <i>Hotspot</i> relevante para conservação, mas exige monitoramento constante.
Outros casos	Gráfico 2 (10 a 20 t/ha):	Problema nos dados (valores constantes), sem análise possível.
	Gráfico 7 (60 a 70 t/ha):	Correlação fraca e não significativa.
	Gráfico 9 (>80 t/ha):	Correlação negativa fraca ($R^2 = -0,14$; $p = 0,023$), mas o impacto é pequeno. Pode representar reservatórios importantes, porém sob baixa ameaça.

4. DISCUSSÃO

4.1 Conversão do uso das terras e a diminuição do carbono

Conforme Figura 3, A classe “0 a 10 t/ha” indica a expansão de áreas degradadas ou empobrecidas em carbono. Com a análise das séries temporais, revela-se que a expansão das terras aráveis de Mato Grosso representa um aumento de 78,52% no período, no qual se intensificou sobre áreas com vegetação nativa, resultando perdas significativas de COS. Estudos indicam que a conversão da floresta amazônica e do cerrado em lavouras e pastagens causaram perdas de 24% a 52% do estoque original, sobretudo pela remoção da biomassa e rápida mineralização da matéria orgânica do solo [21-23].

De acordo com a Figura 6, A classe “0 a 10 t/ha”, demonstrou que o aumento do desmatamento contribui diretamente para o crescimento dessa área de faixa de estoque — possivelmente por

empobrecimento da matéria orgânica e exposição do solo, bem como as classes “50 a 60 t/ha” e a faixa “30 a 40 t/ha” ($R^2 = 0,22$; $p = 0,003$), evidenciando a vulnerabilidade até mesmo de solos relativamente estáveis frente ao avanço do desmatamento. A classe “> 80 t/ha” sugere que mesmo os estoques mais altos podem ser impactados pela fragmentação da paisagem. Já o resultado da classe “60 a 70 t/ha” pode ser atribuído à baixa variabilidade ou à sua distribuição mais restrita a áreas específicas.

A maior parte do estoque de carbono está contido em profundidades entre 0 e 10 cm, e o estoque diminui com a profundidade. A retirada da cobertura vegetal e o revolvimento do solo, dentre outras causas, ocasionam a perda desse estoque e tornam o solo mais vulnerável à erosão, sendo necessário, portanto, que as camadas superficiais do solo sejam conservadas e protegidas [19, 20]. Em estudos acerca dos impactos da conversão da vegetação nativa para o uso agrícola convencional no Cerrado, foi encontrado que o estoque de carbono no solo diminui entre 24% a 52% em áreas de agricultura [24], enquanto a prática de manejo conservacionista na integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) mostra-se favorável, em sistemas bem manejados, para minimizar ou até mesmo reverter a depleção do carbono no solo [25].

Zomer et al. (2017) [26] abordam que a melhoria de práticas agrícolas - como adubação orgânica, plantio direto, agrofloresta, pastagem rotativa e cobertura permanente - pode reverter a perda histórica de carbono causada pelo cultivo intensivo e concluíram que a restauração do carbono orgânico nos solos agrícolas é uma estratégia viável e imediata de mitigação climática, alinhada a compromissos do Acordo de Paris, desde que políticas públicas e incentivos favoreçam a adoção em larga escala.

A intensificação agropecuária, quando alinhada a boas práticas de manejo, mostrou-se capaz de conter a depleção do carbono no solo - e em alguns casos até revertê-la pontualmente - mesmo com mudanças no uso da terra. Contudo, o equilíbrio entre expansão agrícola, conservação de vegetação nativa e estabilidade dos serviços ecossistêmicos depende de monitoramento contínuo, maior fiscalização e políticas públicas que viabilizem a geração de receitas por serviços ambientais, como os créditos de carbono [27].

O avanço agrícola em Mato Grosso foi muito acentuado no período de 1985 a 2023, principalmente para a região de Cerrado e Amazônia, em que extensas áreas de vegetação nativa foram substituídas por terras agricultáveis. O avanço de 78% de terras de uso agropecuário em Mato Grosso ocorreu sobre áreas de alto estoque de carbono. Esses *hotspots* sofreram uma depleção expressiva do COS e fragmentação no período de análise [21, 28].

As regiões de forte expansão agrícola no Cerrado e no Pantanal representam focos críticos na depleção de COS e podem ter grande potencial de restauração e uso mais sustentável da terra. É importante mencionar que os estoques de carbono no solo também apresentam grandes diferenças e capacidade de resiliência entre diferentes tipos de solo e biomas [12, 29].

4.2 Potencial e limites das práticas conservacionistas

Práticas conservacionistas, como o plantio direto, a adubação verde, a rotação de culturas e os sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta (ILPF) no bioma cerrado, têm contribuído para o acúmulo de matéria orgânica no solo e contribuindo para melhoria da pegada de carbono do solo [30]. Dados para o sudeste de Mato Grosso apontam para ganhos concretos: incremento de 11% na produtividade da soja, aumento da lotação de rebanhos entre 2012 e 2021 (aproximadamente de 19%) e um acréscimo líquido no estoque de carbono do solo de aproximadamente 0,8% [27].

Apesar dos avanços, essas práticas dos sistemas integrados ainda enfrentam entraves estruturais para pequenos e médios produtores, pois o alto custo de implementação, capacidade técnica limitada e falta de governança limitam a sua adoção [21]. Mesmo quando bem implementadas, as práticas conservacionistas nem sempre são capazes de restaurar completamente os estoques de carbono encontrados em áreas de vegetação nativa [31, 32].

A manutenção de fragmentos florestais, portanto, permanece essencial para a estabilidade de longo prazo do COS, sobretudo na Amazônia, onde sua integridade está diretamente relacionada à resiliência ecológica [18, 33]. Ainda assim, o potencial técnico de sequestro de carbono em solos mato-grossenses é elevado, podendo variar de 0,05 a 1,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, conforme a textura

do solo e o sistema de manejo adotado. As perdas acumuladas por conversão de florestas e campos, por outro lado, chegam a 30 a 40 Mg ha⁻¹ de carbono, o que reforça a urgência de ampliar a escala e a efetividade das ações conservacionistas [34].

4.3 Hotspots, vulnerabilidade e ações recomendadas

As áreas protegidas, como terras indígenas e unidades de conservação, representam a maior reserva do estoque de carbono, devido à ausência de manejos de uso da terra e utilização sustentável dos recursos, representando barreiras à perda de carbono [12]. Conforme Figura 3, as classes “40 a 50 t/ha” e “50 a 60 t/ha” sugerem a permanência de solos produtivos com capacidade de retenção de carbono em determinadas regiões.

Considerando a identificação de *hotspots* e áreas de risco é possível com base nestes dados sugerir as seguintes ações, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Ações para implementação de políticas públicas.

Tipo de Área	Classes de Biomassa (t/ha)	Ação Recomendada
Áreas de Risco	0–10; 40–60	Mitigação do desmatamento; restauração; créditos de carbono
<i>Hotspots</i>	20–30; 70–80	Conservação; políticas de proteção e créditos de carbono
Neutras	60–70; >80	Monitoramento e planejamento adaptativo

A leitura da Tabela 1 demonstra que cada território carrega uma demanda específica de cuidado, urgência e atenção. As áreas de risco, muitas vezes invisibilizadas nas decisões políticas, exigem ações imediatas de restauração e controle do desmatamento, sob pena de agravamento da perda de carbono e de outras funções ecológicas do solo. Já os *hotspots*, embora ainda preservados, não podem ser tratados como garantias infinitas, sua proteção ativa precisa ser fortalecida. As áreas neutras, por sua vez, pedem vigilância e planejamento, pois a estabilidade aparente não significa ausência de ameaça. Ao traduzir dados em ação, essa classificação territorial oferece um caminho possível para que políticas públicas saiam do papel e cheguem em ações palpáveis, respeitando as diferenças ecológicas e sociais que cada pedaço de terra carrega consigo.

4.4 Papéis das Populações Tradicionais e Conservação Ativa

Assim como demonstrado em outros estudos no Brasil e em outras regiões do mundo, os *hotspots* de carbono permaneceram nas áreas de reservas extrativistas, territórios indígenas e áreas de preservação permanente ao longo de todo o período avaliado, principalmente devido à conservação dos estoques de carbono promovida pelo manejo sustentável por parte das comunidades tradicionais [18, 33].

A redução do desmatamento na Amazônia brasileira apresentada por Nepstad et al. (2014) [35] durante o período de 2005 a 2013 foi resultado de políticas combinadas: restrições legais, barreiras de mercado e expansão de áreas protegidas (incluindo Terras Indígenas), e destaca que o sucesso só será consolidado se incentivos positivos, crédito de baixo carbono e pagamentos por serviços ambientais (como REDD+) avançarem para apoiar produtores, comunidades locais e indígenas.

Os resultados de Walker et al. (2020) [36] na Amazônia apontam que 94% do carbono total retido entre 2001 e 2018 na Amazônia foi protegido dentro de terras indígenas e unidades de conservação e que as emissões de carbono por degradação e distúrbios estão aumentando, principalmente em áreas próximas a fronteiras agrícolas e rodovias, onde se estimou que as perdas de carbono por degradação florestal superaram as emissões por desmatamento total nos últimos anos.

Considerando que uma das principais limitações para a estimativa de carbono orgânico do solo em áreas extensas é a escassez de dados laboratoriais, e levando em consideração que a supressão da vegetação natural causa grandes perdas de carbono orgânico do solo, torna-se necessário

apontar que territórios como terras indígenas e sistemas tradicionais de uso e ocupação, são zonas estratégicas para conservação do carbono orgânico do solo. Ademais, esses territórios são importantes na conservação da biodiversidade, serviços ecossistêmicos, incluindo o controle do clima regional e global. Esses espaços, no entanto, ainda sofrem fortes pressões de expansão agropecuária, e são importantes políticas públicas de incentivo econômico e de crédito de carbono, para que a conservação dos solos em diferentes biomas e regiões possam gerar retornos financeiros [37, 38].

4.5 Modelagem, desafios e caminhos Para o monitoramento

A mudança no uso e cobertura da terra afeta os estoques de COS de forma heterogênea, variando conforme os tipos de solo, clima e estratégias de manejo adotadas [2, 39]. A integração entre amostragem tradicional, dados de sensoriamento remoto e plataformas como MapBiomas Solo tem aprimorado o monitoramento desses estoques, possibilitando a identificação de padrões espaciais e áreas críticas de depleção. No entanto, esses modelos ainda exigem validação em campo e aprimoramento em múltiplas escalas, o que limita a precisão de estimativas regionais. Solos argilosos sob florestas naturais apresentam maior estabilidade estrutural e capacidade de retenção de carbono, ao contrário dos solos do Pantanal, que são fisicamente frágeis e mais suscetíveis à erosão e à mineralização da matéria orgânica [16, 19].

Além da textura, o uso inadequado do solo, como pastagem degradada ou lavouras mal manejadas, intensifica a perda de COS, sobretudo em solos arenosos. Estudos demonstram correlação positiva entre o teor de argila e o carbono até 40 cm de profundidade, com coeficientes superiores a 0,50 no Cerrado, reforçando a importância de considerar atributos edáficos no monitoramento [2, 40].

Ainda que haja avanços no mapeamento de *hotspots* de carbono e regiões de risco, as plataformas atuais — como MapBiomas Solo, *Google Earth Engine* e SoilGrids — ainda carecem de algoritmos mais robustos e validação sistemática. É urgente fortalecer bancos de dados nacionais com parâmetros edáficos detalhados e resolver a alta variabilidade amostral [41, 42].

A dinâmica do COS também sofre influência de eventos climáticos extremos, como secas e inundações, que geram oscilações nos estoques e alteram os padrões de distribuição em biomas tropicais. Detectar essas variações exige séries temporais mais longas e dados climáticos de alta resolução. Políticas de adaptação devem considerar esses riscos e promover o manejo climático-inteligente nas diferentes regiões do estado [41].

A ocupação agropecuária crescente, sobretudo no Pantanal e na transição Cerrado-Amazônia, intensifica o risco de depleção do COS. Isso exige ações pontuais de restauração, promoção de créditos de carbono e adequação das práticas ao tipo de solo. A correlação entre teor de argila e estabilidade do COS reforça que solos mais arenosos requerem práticas específicas, como adubação verde, cobertura permanente e rotação de culturas [19, 43].

Diante disso, é urgente a criação de uma rede nacional integrada de monitoramento do carbono do solo, aliada a um inventário espacializado de uso e cobertura da terra. Tais dados são essenciais para o desenvolvimento de modelos preditivos adaptados à realidade socioambiental brasileira, capazes de reduzir incertezas e orientar políticas públicas eficazes [44].

Os resultados deste trabalho revelam que em áreas críticas é essencial combinar políticas de uso da terra com práticas de manejo conservacionistas e de restauração para garantir a estabilidade do carbono orgânico do solo e prevenir os efeitos negativos do desmatamento no estoque de carbono orgânico do solo em Mato Grosso. Apesar do avanço metodológico na estimativa de carbono do solo, persistem lacunas estruturais na integração entre ciência, política e território. É pertinente criar protocolos nacionais de validação em campo com foco em zonas de transição e desenvolver modelos preditivos ajustados à realidade socioeconômica e pedológica local e envolver atores locais na coprodução de conhecimento.

5. CONCLUSÃO

O objetivo principal deste estudo foi avaliar a dinâmica e potencial do estoque de carbono orgânico do solo em Mato Grosso, entre os anos de 1987 e 2023, em face das inter-relações entre o desmatamento. Por meio deste estudo, buscou-se estabelecer estas inter-relações na estocagem de carbono nos biomas que integram o Estado.

Os resultados indicam que a distribuição do desmatamento no estado de Mato Grosso entre 1987 e 2023 ocorreu de forma desigual entre as classes de estoque de carbono no solo. Em determinadas classes (como 20 a 30 t/ha e 40 a 50 t/ha), observou-se uma relação positiva significativa entre o desmatamento e os estoques, indicando que áreas com maior concentração de carbono foram desmatadas em maior quantidade. Já em outras classes (como 1 a 10 t/ha e 50 a 60 t/ha), nota-se uma correlação negativa, sugerindo que o desmatamento se deu em áreas com menor acúmulo de carbono no solo. Essa análise não implica que o desmatamento aumentou ou reduziu o estoque de carbono diretamente, mas evidencia onde o carbono está concentrado e como essas áreas foram afetadas pelo avanço do desmatamento. Ressalta-se que, caso o desmatamento atinja áreas de alta densidade de carbono, há maior potencial de emissões de GEE, reforçando a importância de proteção dessas zonas, em especial, os solos arenosos do Pantanal se mostraram mais vulneráveis à erosão e à perda de matéria orgânica.

Os resultados corroboram o que tem sido apontado na literatura nacional e internacional, na qual o desmatamento e a utilização de técnicas de cultivo convencionais em solos tropicais contribuem com a redução do estoque de carbono no solo. De forma original, os dados apresentados demonstraram os gradientes/concentrações dos estoques de carbono no solo, sinalizando áreas estratégicas para sua conservação. O monitoramento em longo prazo do impacto de eventos climáticos extremos, como secas e inundações, assim como a análise da efetividade de novas políticas públicas e incentivos de mercado de crédito de carbono no manejo sustentável dos solos tropicais, com uso de sistemas integrados de produção, entre outros aspectos, devem ser abordados em futuros estudos. É altamente recomendável a intensificação da validação de dados em campo, especialmente nas zonas de transição entre biomas, onde há maior variabilidade edáfica, como forma de conferir maior robustez às projeções.

As políticas de manejo sustentável de ecossistemas naturais, restauração de ecossistemas, uso sustentável dos recursos naturais, valorização de territórios indígenas e sistemas agroflorestais são recomendadas como estratégias que permitem maior resiliência da produção regional e mitigação dos impactos adversos provocados pelas mudanças no uso da terra e mudanças climáticas. Áreas com alto potencial de estoque ou que possuem alto potencial de recuperação devem ser priorizadas para conservação e manejo sustentável para fins de composição de projetos de geração de créditos de carbono.

A realização deste trabalho e o aprofundamento das estratégias de análise de dados multitemporais de estoque de carbono do solo demonstraram a importância das técnicas de geotecnologia ambiental e de métodos interdisciplinares na compreensão dos processos ecológicos associados à dinâmica do carbono no solo. As análises e informações sobre o carbono no solo disponibilizadas neste estudo podem servir de referência para a formulação de políticas públicas com base em evidências e para o aprimoramento da legislação e licenciamento ambientais no uso da terra.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. 2004;123(1-2):1-22. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.01.032
2. Batjes NH. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. *Geoderma*. 2016;269:61-8. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.01.034
3. Silva Junior CHL, Aragão LEO, Anderson LO, et al. Persistent collapse of biomass in Amazonian forest edges following deforestation leads to unaccounted carbon losses. *Sci Adv*. 2020;6(40):eaaz8360. doi: 10.1126/sciadv.aaz8360
4. MapBiomass. Coleção MapBiomass Solo v2.0 – Carbono Orgânico do Solo [Internet]. 2023 [citado em 13 jul 2025]. Disponível em: <https://mapbiomas.org/solo>.

5. Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens Environ.* 2017;202:18-27. doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031
6. United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre; International Institute for Applied Systems Analysis. Remote sensing for monitoring impacts of land use change on biodiversity and carbon stocks: the role in the spatial planning process [Internet]. Cambridge: United Nations Environment Programme / SPACES coalition; 2023 [citado em 13 jul 2025]. Disponível em: https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/18924/1/202301_SPACES-Remote-Sensing-1.pdf.
7. Tôsto SG, Kano C, Mendes AM, et al. O carbono no contexto dos serviços ecossistêmicos e serviços ambientais da Amazônia. In: Tôsto SG, Pereira LC, Gomes MAF, Rodrigues JA, editores. *Serviços ecossistêmicos e serviços ambientais de solo, água e carbono – Amazônia*. Brasília (DF): Embrapa; 2023. p. 128-43. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1157738/1/6167.pdf>.
8. Macedo MN, DeFries RS, Morton DC, et al. Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2012;109(4):1341-6. doi: 10.1073/pnas.1111374109
9. Silva Junior CHL, Pessôa ACR, Carvalho NS, et al. The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade. *Nat Ecol Evol.* 2021;5(2):144-5. doi: 10.1038/s41559-020-01368-x
10. Fearnside PM. Deforestation of the Brazilian Amazon. *Oxford Res Encyc Environ Sci.* 2017. doi: 10.1093/acrefore/9780199389414.013.102
11. Oliveira JM, Gollany HT, Polumsky RW, et al. Predicting soil organic carbon dynamics of integrated crop-livestock system in Brazil using the CQESTR model. *Front Environ Sci.* 2022;10:826786. doi: 10.3389/fenvs.2022.826786
12. Strassburg BBN, Iribarrem A, Beyer HL, et al. Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature.* 2020;586(7830):590-4. doi: 10.1038/s41586-020-2784-9
13. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Soil organic carbon: the hidden potential [Internet]. Rome (IT): FAO; 2017 [citado em 13 jul 2025]. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/items/a9260c9f-71e8-46fa-a853-0d18f0de3bda>.
14. The International “4 por 1000” Initiative (4p1000). Os solos para a segurança alimentar e o clima [Internet]. Paris: 4p1000; 2015 [citado em 13 jul 2025]. Disponível em: <https://4p1000.org/the-resources/?lang=en>.
15. Minasny B, Malone BP, McBratney AB, et al. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma.* 2017;292:59-86. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.01.002
16. Poggio L, de Sousa LM, Batjes NH, et al. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil.* 2021;7:217-40. doi: 10.5194/soil-7-217-2021
17. Sanquetta CR. Créditos de carbono avançado. 1. ed. Curitiba (PR): Ed. do Autor; 2023.
18. Ramos A, Azevedo Ú, Xavier F, et al. Deforestation patterns in the Amazon, Cerrado and Pantanal Biomes in the upper Paraguay River Basin, Mato Grosso - Brazil. *Rev Geogr Acadêmica.* 2023;17(2):136-58.
19. Fontana A, Vivian AM, Arco MAL, et al. Níveis de referência do carbono orgânico no solo sob vegetação natural dos biomas brasileiros. Campo Grande (MS): Embrapa de corte; out 2024. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 59). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1169042/1/Niveis-referencia-carbono-organico-2024.pdf>.
20. Couto EG, Corrêa GR, Oliveira VA, et al. Soils of Pantanal: The Largest continental wetland. In: Schaefer CEGR, Cerri CEP, Andreote FD, Lima JM, editors. *Soils of Brazil*. Cham: Springer; 2023. p. 491-517. doi: 10.1007/978-3-031-19949-3_18
21. Nwaogu C, Diagi BE, Ekweogu CV, et al. Soil organic carbon stocks as driven by land use in Mato Grosso State: the Brazilian Cerrado agricultural frontier. *Discov Sustain.* 2024;5(382):1-21. doi: 10.1007/s43621-024-00592-w
22. Leite FFGD, Fontana A, Nóbrega GN, et al. Land use change effect on organic matter dynamics and soil carbon sequestration in the Brazilian Cerrado: A study case in Mato Grosso do Sul state (Midwest-Brazil). *Catena.* 2025;249:108670. doi: 10.1016/j.catena.2024.108670
23. Minasny B, Malone BP, McBratney AB, et al. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma.* 2017;292:59-86. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.01.002
24. Santos CA, Correia MEF, Vargas RR, et al. Changes in soil carbon stocks after land use change from native vegetation to pastures in the Atlantic forest region of Brazil. *Geoderma.* 2019;337:394-401. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.09.045
25. Zolin CA, Matos ES, Magalhães CAS, et al. Short-term effect of a crop-livestock-forestry system on soil, water and nutrient loss in the Cerrado-Amazon ecotone. *Acta Amaz.* 2021;51(2):102-12. doi: 10.1590/1809-4392202000391

26. Zomer RJ, Bossio DA, Sommer R, et al. Global sequestration potential of increased organic carbon in cropland soils. *Sci Rep.* 2017;7:15554. doi: 10.1038/s41598-017-15794-8
27. Macedo LOB, Costa MA, Oliveira IL, et al. Intensificação das práticas agropecuárias e impactos no sequestro de carbono no solo na região sudeste de Mato Grosso. *Rev Tocant Geogr.* 2025;14(33):59-60. doi: 10.70860/rtg.v14i33.19460
28. MapBiomass. MapBiomass General “Handbook”. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). Collection 9. Version 1 [Internet]; 2024 [citado em 13 jul 2025]. Disponível em: <https://amazonia.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/10/2024/09/ATBD-Collection-9-v2.docx.pdf>.
29. Campos CS, Oliveira RV. Estoque de carbono no solo sob diferentes tipos de uso no bioma Caatinga. *Caminhos Geogr.* 2025;26(104):86-105. doi: 10.14393/RCG2610474601
30. Oliveira DMS, Santos RS, Chizzotti FHM, et al. Crop, livestock, and forestry integration to reconcile soil health, food production, and climate change mitigation in the Brazilian Cerrado: A review. *Geoderma Reg.* 2024;37:e00796. doi: 10.1016/j.geodrs.2024.e00796
31. Amoakwah E, Shawn LT, Didenko NA, et al. Impact of deforestation and temporal land-use change on soil organic carbon storage, quality, and lability. *PLoS ONE.* 2022;17(8):e0263205. doi: 10.1371/journal.pone.0263205
32. Veldkamp E, Schmidt M, Powers JS, et al. Deforestation and reforestation impacts on soils in the tropics. *Nat Rev Earth Environ.* 2020;1:590-605. doi: 10.1038/s43017-020-0091-5
33. De Sy V, Herold M, Achard F, et al. Tropical deforestation drivers and associated carbon emission factors derived from remote sensing data. *Environ Res Lett.* 2019;14:094022. doi: 10.1088/1748-9326/ab3dc6
34. Severiano RM, Pierangeli MAP, Santos NS, et al. Soil organic carbon in no-tillage systems of different ages in Southwest Mato Grosso, Brazil. *Rev Bras Eng Agríc Ambient.* 2021;25(4):250-5. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v25n4p250-255
35. Nepstad DC, McGrath D, Stickler C, et al. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science.* 2014;344(6188):1118-23. doi: 10.1126/science.1248525
36. Walker WS, Gorelik SR, Baccini A, et al. The role of forest conversion, degradation, and disturbance in the carbon dynamics of Amazon indigenous territories and protected areas. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2020;117(6):3015-25. doi: 10.1073/pnas.1913321117
37. Almada HK, Macedo MN, Lenza E, et al. Indigenous lands and conservation units slow down non-GHG climate change in the Cerrado-Amazon ecotone. *Perspect Ecol Conserv.* 2024;22(2):177-85. doi: 10.1016/j.pecon.2024.03.002
38. Olorunfemi IE, Olufayo AA, Fasinmirin JT, et al. Dynamics of land use land cover and its impact on carbon stocks in Sub-Saharan Africa: an overview. *Environ Dev Sustain.* 2022;24:40-76. doi: 10.1007/s10668-021-01484-z
39. Fan L, Wigneron J-P, Ciais P, et al. Satellite observed pantropical carbon dynamics. *Nat. Plants.* 2019;5:944-51. doi: 10.1038/s41477-019-0478-9
40. Caballero CB, Ruhoff A, Biggs T. Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. *Sci Total Environ.* 2022;808:1-14. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152134
41. Neves de Melo MV, Gonçalves de Oliveira ME, Pontes de Almeida GL, et al. Spatiotemporal characterization of land cover and degradation in the agreste region of Pernambuco, Brazil, using cloud geoprocessing on Google Earth Engine. *Remote Sens Appl Soc Environ.* 2022;26:100756. doi: 10.1016/j.rsase.2022.100756
42. Chaddad F, Mello FAO, Tayebi M, et al. Impact of mining-induced deforestation on soil surface temperature and carbon stocks: A case study using remote sensing in the Amazon rainforest. *J S Am Earth Sci.* 2022;119:1-5. doi: 10.1016/j.jsames.2022.103983
43. Hernandes TAD, de Oliveira Bordonal R, Duft DG, Leal MRLV. Implications of regional agricultural land use dynamics and deforestation associated with sugarcane expansion for soil carbon stocks in Brazil. *Reg Environ Change.* 2022;22:49. doi: 10.1007/s10113-022-01907-1
44. dos Santos WP, Vaz CMP, Martin-Neto L, et al. Predição da densidade do solo em solos brasileiros para cálculo de estoques de carbono: um estudo comparativo de modelos de regressão linear múltipla e Random Forest usando variáveis contínuas e categóricas. *Desc Solo.* 2025;2:7. doi: 10.1007/s44378-025-00035-6