



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

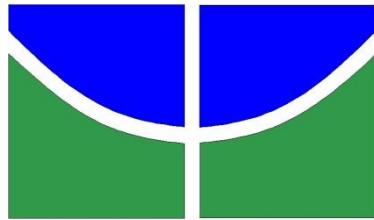
ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO EM ÁREAS DE CERRADO EM PROCESSO DE SUCESSÃO SECUNDÁRIA

Ramom Sousa Marcial

Brasília, 14 de Fevereiro de 2025

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

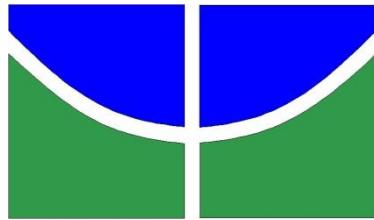
**ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO EM ÁREAS DE CERRADO
EM PROCESSO DE SUCESSÃO SECUNDÁRIA**

Ramom Sousa Marcial

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador(a): Profa. Dra. Alba Valéria Rezende

Brasília-DF, 14 de Fevereiro de 2025



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Tecnologia - FT
Departamento de Engenharia Florestal – EFL**

**Estoque de carbono no solo em áreas de Cerrado em processo de
sucessão secundária**

Estudante: Ramom Sousa Marcial
Matrícula: 190058838
Orientadora: Profa. Dra. Alba Valéria Rezende

Menção: _____

Profa. Dra. Alba Valéria Rezende
Universidade de Brasília - UnB
Departamento de Engenharia Florestal
Orientadora

PhD. Bárbara de Oliveira Bonfim
WWF - Brasil
Membro da Banca

Dra. Roberta Franco Pereira de Queiroz
Analista ambiental - ICMBio

FICHA CATALOGRÁFICA

MARCIAL, RAMOM SOUSA

Estoque de carbono no solo em áreas de Cerrado em processo de sucessão secundária.

xx p., 210 x 297mm (EFL/FT/UnB, Engenheira, Engenharia Florestal, 2025).

Trabalho de conclusão de curso - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MARCIAL, R. S. (2025). ESTOQUE DE CARBONO EM ÁREAS DE CERRADO EM PROCESSO DE SUCESSÃO SECUNDÁRIA. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, XX p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR(A): Ramom Sousa Marcial

TÍTULO: *Estoque de carbono no solo em áreas de Cerrado em processo de sucessão secundária.*

GRAU: Engenheiro(a) Florestal

ANO: 2025

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Projeto Final de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Ramom Sousa Marcial

rsousa.rsm@gmail.com

Dedico este à minha família, cujo amor e incentivo foram fundamentais para minha formação acadêmica. Aos amigos que estiveram ao meu lado, compartilhando momentos de aprendizado e superação. E, sobretudo, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste estudo, inspirando-me a seguir em frente e a dar o meu melhor.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio e incentivo de diversas pessoas e instituições. Agradeço primeiramente à minha família, pelo suporte incondicional ao longo da minha jornada acadêmica, por sempre acreditarem em mim e me encorajarem a seguir em frente, mesmo diante dos desafios. Aos meus orientadores e professores, pela paciência, orientação e conhecimento compartilhado, fundamentais para o desenvolvimento deste estudo.

Aos colegas e amigos, por todo o incentivo, apoio mútuo e pelos momentos de descontração que tornaram essa caminhada mais leve. Importante citar meus colegas Kennedy, Danilo e Laura, que compartilharam momentos de trabalho durante as pesquisas, assim como todos os profissionais da FAL e da UNB que sempre ajudaram. Também agradeço ao Caio que foi fundamental para a organização final da ideias e para a minha preparação pessoal. Agradeço também à instituição de ensino e aos laboratórios envolvidos, que forneceram estrutura e suporte técnico para a realização das análises, viabilizando a obtenção dos dados necessários para este trabalho.

Meu sincero reconhecimento às agências de fomento e demais instituições que contribuíram direta ou indiretamente para a execução desta pesquisa. Por fim, sou imensamente grato a todos que, de alguma forma, colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho, seja com palavras de incentivo, sugestões ou apoio técnico, contribuindo para a concretização desta importante etapa da minha vida acadêmica.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....
2	MATERIAL E MÉTODOS.....
2.1	Área de estudo.....
2.2	Coleta de dados.....
2.2.1	Amostragem da Vegetação Lenhosa.....
2.2.2	Amostragem de Solos.....
2.3	Análise de dados.....
3	RESULTADOS.....
4	DISCUSSÃO.....
5	REFERÊNCIAS.....

LISTA DE TABELAS

- TABELA 1** Descrição dos tratamentos amostrados nas áreas da Reserva Ecológica e Experimental da Universidade de Brasília, Fazenda Água Limpa - FAL e da Estação Ecológica de Águas Emendadas – ESECAE, em Brasília, DF.
- TABELA 2** Valores médios ECS ($Mg\ ha^{-1}$) para os diferentes tratamentos avaliados na Reserva Ecológica e Experimental da Universidade de Brasília, Fazenda Água Limpa - FAL e na Estação Ecológica de Águas Emendadas – ESECAE, em Brasília, DF. (Valores são estatisticamente iguais, $p > 0,05$)
- TABELA 3** Variáveis químicas e físicas do solo (P, K, MOS, DS, argila, silte e areia) registradas nas áreas de cerrado *sensu stricto* amostradas na FAL (T1 a T6) e na ESECAE (T7 e T8), cujos dados apresentaram distribuições estatisticamente similares pelo teste de Kruskal-Wallis ($p > 0,05$).
- TABELA 4** Resultados das comparações múltiplas não paramétricas entre os tratamentos analisados nas áreas de cerrado *sensu stricto* amostradas na FAL (T1 a T6) e na ESECAE (T7 e T8), considerando os postos medianos de variáveis do solo e da vegetação e utilizando o teste não paramétrico de Dunn Bonferroni Medianas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si ($P > 0,05$).

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1** Localização das áreas de estudo na Reserva Ecológica e Experimental da Universidade de Brasília, Fazenda Água Limpa - FAL e Estação Ecológica de Águas Emendadas – ESECAE, em Brasília, DF. Fonte: QUEIROZ et al., 2023
- FIGURA 2** Vista dos sítios de cerrado *sensu stricto* amostrados na (a) área experimental Reserva Ecológica e Experimental da Universidade de Brasília, Fazenda Água Limpa - FAL; na (b) área antropizada da Estação Ecológica de Águas Emendadas – ESECAE e na (c) área preservada da Estação Ecológica de Águas Emendadas – ESECAE. fonte: QUEIROZ et al., 2023.
- FIGURA 3** Representação gráfica da análise de correlação de Spearman entre o ECS e as variáveis edáficas e bióticas registradas nas áreas de cerrado *sensu stricto* dos tratamentos avaliados na Reserva Ecológica e Experimental da Universidade de Brasília, Fazenda Água Limpa - FAL e na Estação Ecológica de Águas Emendadas – ESECAE, em Brasília, DF.

RESUMO

Marcial, Ramom Sousa (MARCIAL, R. S.) **ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO EM ÁREAS DE CERRADO EM PROCESSO DE SUCESSÃO SECUNDÁRIA**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Este estudo quantificou e comparou o estoque de carbono no solo (ECS) em áreas de cerrado *sensu stricto* com diferentes tipos de distúrbios antrópicos, localizadas na Reserva Ecológica e Experimental Fazenda Água Limpa – FAL e na Estação Ecológica de Águas Emendadas - ESECAE, que são duas importantes Unidades de Conservação (UC) do Bioma Cerrado, situadas em Brasília, Distrito Federal, Brasil. Na FAL avaliamos uma área experimental que, em 1988, foi submetida a seis sistemas de manejo, baseados em diferentes técnicas de colheita e extração da vegetação lenhosa, e que, para efeito deste estudo denominamos de tratamentos T1, T2, T3, T4, T5 e T6. Na ESECAE avaliamos duas áreas. A primeira, que denominamos de tratamento 7 (T7), encontra-se antropizada, mas protegida e em processo de sucessão secundária desde 1988, após sua ocupação por atividades agropecuárias entre 1976 e 1987. A segunda área da ESECAE, que denominamos de tratamento 8 (T8), encontra-se em condição preservada, sem registros de distúrbios antrópicos, com exceção de incêndios florestais ocasionais, comumente registrados no bioma Cerrado. Em 2021 realizamos coletas de solo no interior de parcelas permanentes de 0,1 ha implantadas nas áreas dos 8 tratamentos. Na FAL, as coletas foram realizadas em parcelas permanentes implantadas em 1996 nas áreas de cada um dos seis tratamentos. Na ESECAE, as coletas foram realizadas nas parcelas permanentes implantadas em 1998 no cerrado antropizado, e em 2008 no cerrado preservado. Em cada parcela, as coletas de solo ocorreram na camada de 0-20 cm de profundidade e em três pontos da parcela (repetições), ou seja, no centro e em dois vértices diagonais. As coletas em cada parcela de 0,1 ha foram de amostras deformadas quanto indeformadas. Todas as amostras foram identificadas pelo respectivo tratamento (T1 a T8), pelo número da parcela permanente e pela repetição (1 a 3). As amostras deformadas foram utilizadas para determinação das características químicas e físicas do solo, incluindo o teor de carbono orgânico (C), e as amostras indeformadas permitiram obter densidade do solo (DS). O ECS de cada parcela de 0,1 ha foi obtido a partir dos valores de C e DS média registrados em cada parcela. Neste estudo buscamos avaliar a existência de correlação significativa ($p < 0,05$) entre o ECS e as métricas da vegetação (densidade de indivíduos, área basal, biomassa aérea e riqueza de espécies) e do solo (características químicas e físicas). Avaliamos ainda a existência de diferenças significativas entre os ECS dos oitos tratamentos por meio de uma análise de variância (ANOVA). Para isto, consideramos um delineamento inteiramente casualizado, com 10 repetições para a área antropizada da ESECAE, 9 repetições para a área natural da ESECAE e três repetições para cada área da FAL. Constatamos que as correlações entre o ECS e as métricas da vegetação e das características físicas do solo foram muito baixas e não significativas ($p > 0,05$). O mesmo ocorreu com as características químicas do solo. As únicas exceções foram para potássio, cuja correlação, embora baixa (0,34) foi significativa ($p < 0,05$) e para matéria orgânica, que apresentou correlação moderada (0,72) e significativa ($p < 0,05$). Não foram detectadas diferenças significativas entre as médias de ECS dos oito tratamentos ($p > 0,05$), indicando que o ECS médio encontrado na área natural da ESECAE é estatisticamente igual aos valores médios de ECS registrados nas áreas de cerrado *sensu stricto* da FAL, que foram submetidas a diferentes sistemas de manejo em 1988 e que ao longo de décadas têm protegidas para recuperação da vegetação original, e ao ECS da área antropizada da ESECAE, que também encontra-se protegida desde 1988 para recuperação da vegetação original. Nossos resultados mostram que, em média, as oito áreas de cerrado *sensu stricto* estudadas estocam cerca de $57,32 \pm 2,73 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono na camada superficial do solo (20 cm). Destacamos

que a vegetação lenhosa nativa que vem se estabelecendo na área de cerrado antropizado da ESECAE, além de apresentar baixa densidade de indivíduos e baixa riqueza de espécies, encontra-se totalmente dominada por gramíneas exóticas e invasoras que, apesar de atuarem como barreira na recuperação da vegetação lenhosa, contribuem positivamente com o ECS. As gramíneas exóticas influenciam negativamente na resiliência do cerrado *sensu stricto* da ESECAE, competindo e impedindo o estabelecimento e a regeneração de espécies lenhosas nativas. Portanto, concluímos que áreas de cerrado *sensu stricto* desmatadas e ocupadas por atividades agrícolas e pastagens, e depois protegidas por longo prazo para recuperação da vegetação natural, assim como áreas desmatadas uma única vez para retirada de lenha, seja com o uso de motosserra ou trator de lâmina, e posteriormente protegidas, pelo mesmo tempo, para recuperação da vegetação original, apresentam ECS similares ao de uma área de cerrado *sensu stricto* preservada.

Palavras-Chave: Bioma Cerrado, antropização; matéria orgânica; densidade do solo.

ABSTRACT

Marcial, Ramom Sousa (MARCIAL, R. S.) **CARBON STOCK IN THE SOIL IN CERRADO AREAS UNDER SECONDARY SUCCESSION PROCESS.** Monograph (Forest Engineering Degree) – University of Brasília, Brasília, DF.

This study quantified and compared soil carbon stock (SCS) in cerrado *sensu stricto* areas with different types of anthropogenic disturbances, located in the Ecological and Experimental Reserve Fazenda Água Limpa (FAL) and the Ecological Station of Águas Emendadas (ESECAE). These are two important protected areas (PAs) of the Cerrado biome, situated in Brasília, Federal District, Brazil. At FAL, we evaluated an experimental area that, in 1988, was subjected to six different management systems based on distinct harvesting and extraction techniques of woody vegetation. For this study, we designated these as treatments T1, T2, T3, T4, T5, and T6. At ESECAE, we evaluated two areas. The first, referred to as treatment T7, has undergone anthropogenic disturbances but it has been protected and undergoing secondary succession since 1988, following agricultural and livestock activities between 1976 and 1987. The second area, designated as treatment T8, is in a preserved condition, with no records of anthropogenic disturbances except for occasional wildfires, which are common in the Cerrado biome. In 2021, we collected soil samples within permanent 0.1 ha plots established in the areas corresponding to the eight treatments. At FAL, the samples were collected from permanent plots established in 1996 in each of the six treatment areas. At ESECAE, collections took place in permanent plots established in 1998 in the anthropized cerrado and in 2008 in the preserved cerrado. In each plot, soil samples were taken from the 0 - 20 cm soil layer at three points (replicates): the center and two diagonal vertices. In each 0.1 ha plot, both disturbed and undisturbed samples were collected. All samples were identified by their respective treatment (T1 to T8), permanent plot number, and replicate number (1 to 3). Disturbed samples were used to determine soil chemical and physical properties, including organic carbon content (C), while undisturbed samples were used to determine soil bulk density (BD). The SCS of each 0.1-ha plot was calculated based on the average C and BD values recorded in each plot. In this study, we sought to assess the existence of a significant correlation ($p < 0.05$) between SCS and vegetation metrics (individual density, basal area, aboveground biomass, and species richness) as well as soil properties (chemical and physical characteristics). Additionally, we evaluated significant differences in SCS among the eight treatments using an analysis of variance (ANOVA). A completely randomized design was considered, with 10 replicates for ESECAE anthropized area, 9 replicates for ESECAE natural area and three replicates for each FAL area. We found that correlations between SCS and vegetation metrics and physical soil properties were very low and not significant ($p > 0.05$). The same was observed for soil chemical properties, except for potassium, which showed a low but significant correlation (0.34, $p < 0.05$), and organic matter, which exhibited a moderate and significant correlation (0.72, $p < 0.05$). No significant differences were detected in the mean SCS among the eight treatments ($p > 0.05$), indicating that the mean SCS in the preserved ESECAE area is statistically similar to the mean SCS values recorded in the cerrado *sensu stricto* areas at FAL, which underwent different management systems in 1988 and have been protected for decades for vegetation recovery. Similarly, the anthropized area at ESECAE, which has also been protected since 1988, presented a mean SCS comparable to that of a preserved cerrado area. Our results show that, on average, the eight studied cerrado *sensu stricto* areas store approximately 57.32 ± 2.73 Mg ha⁻¹ of carbon in the top 20 cm of soil. We highlight that the woody native vegetation in the anthropized ESECAE cerrado area, despite having low individual density and low species richness, is completely dominated by exotic invasive grasses. These grasses, despite hindering the recovery of woody vegetation, positively contribute to SCS. However, these exotic grasses

negatively influence the resilience of the cerrado *sensu stricto* at ESECAE, competing with and preventing the establishment and regeneration of native woody species. Therefore, we conclude that cerrado *sensu stricto* areas that have been deforested and used for agriculture and livestock but later protected for long-term natural vegetation recovery, as well as areas that were deforested only once for wood extraction (whether by chainsaw or blade tractor) and subsequently protected for the same period, exhibit SCS levels comparable to those of a preserved cerrado *sensu stricto* area.

Keywords: Cerrado Biome, anthropization; organic matter; soil density.

1. INTRODUÇÃO

Desde a era pré-industrial, a humanidade já emitiu 2,4 trilhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂), e 17% desse total foram emitidos apenas na última década, que é considerado o período com o maior crescimento de emissões de gases de efeito estufa (GEE) da história humana (IPCC, 2022). Além do CO₂, outros gases como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) também se acumulam na atmosfera contribuindo com a formação dos GEE. Esses gases estão entre os principais fatores causadores do aquecimento global. Além dos grandes aumentos na temperatura no planeta, têm provocado vários outros impactos no mundo, incluindo perda de biodiversidade e de serviços ecossistêmicos (BUSTAMANTE, 2024) e expressivos desastres climáticos, como chuvas torrenciais, tempestades, ciclones extratropicais e secas extremas (IPCC, 2022), tal como a registrada na Bacia Amazônica, em 2023 (ANDRADE et al., 2024) e em 2024.

A queima de combustíveis fósseis e as mudanças no uso e cobertura do solo, que envolvem desmatamento e incêndios florestais, estão entre as atividades humanas que mais contribuem com o aumento dos gases de efeito estufa e que mais impactam a crise climática global. Mitigar o aumento das concentrações dos gases de efeito estufa na atmosfera tem sido uma preocupação mundial, devido aos seus efeitos sobre as mudanças climáticas.

Os ecossistemas florestais têm importante papel na mitigação das concentrações de CO₂ na atmosfera (EKHOLM, 2016; GREN; ZELEKE, 2016). Esses ecossistemas armazenam, aproximadamente, 45% do carbono total da Terra (BONAN, 2008). De acordo com Scurlock e Hall (1998), cerca de 80% desse carbono estão armazenados no solo. Além disso, cerca de 80% de todo o carbono terrestre acima do solo e cerca 40% de todo o carbono subterrâneo (solos, serapilheira e raízes) estão armazenados nas florestas do mundo (DIXON et al., 1994; ZOHREH et al., 2017).

Nas florestas tropicais, por exemplo, o estoque de carbono acima e abaixo do solo representa cerca de 20 a 25 % do C terrestre mundial (CERRI et al., 2001). Desta forma, a redução dos desmatamentos nos trópicos tem sido considerada uma estratégia eficiente para mitigar tais concentrações, já que os desmatamentos provocam a redução dos estoques de carbono tanto na biomassa florestal quanto no solo.

O Brasil ocupa a segunda posição na lista dos países detentores das maiores áreas de florestas do mundo e a primeira posição quando consideramos apenas as florestas tropicais. São 516 milhões de hectares ocupados por florestas, ou seja, 60% da área do território nacional e 13% da cobertura florestal do planeta (www.fao.org/forestry/fra/fra2010/en/). Portanto, os ecossistemas florestais brasileiros exercem relevante papel tanto na conservação da

biodiversidade mundial, como na oferta de importantes serviços ecossistêmicos, como a mitigação das mudanças climáticas globais (<http://www.florestal.gov.br/inventario-florestal-nacional>; <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/>).

O Cerrado é o segundo bioma brasileiro mais extenso (MENDONÇA et al., 2008; MITTERMEIER *et al.*, 2005) e a maior floresta tropical seca da América do Sul (NÓBREGA et al., 2020; SCHOLES; ARCHER, 1997). Pesquisas indicam que esse bioma possui significativos reservatórios de carbono, tanto acima quanto abaixo do solo e esses reservatórios têm grande potencial para contribuir na mitigação de GEE (MIRANDA, et al., 2014; BUSTAMANTE et al., 2019). Porém, as mudanças no uso e cobertura do solo de áreas naturais do Cerrado afetam significativamente esses reservatórios.

O bioma Cerrado possui uma vegetação altamente diversificada, caracterizada pela presença de fitofisionomias distintas que variam entre formações florestais, savânicas e campestres (RATTER, 1997; RIBEIRO; WALTER, 2008). A heterogeneidade ambiental do Cerrado resulta de fatores como variabilidade climática, sazonalidade hídrica, regime de fogo e características edáficas, os quais influenciam diretamente a composição florística e a distribuição dos estoques de carbono na biomassa e no solo (BRANDÃO; DURIGAN, 2005; MIRANDA et al., 2014). Dentre essas formações, o cerrado sensu stricto se destaca por ocupar aproximadamente 70% da área total do bioma e ser composto por um estrato herbáceo dominante e um estrato lenhoso formado por árvores e arbustos de pequeno porte, com adaptações fisiológicas ao fogo e à seca (EITEN, 1972; RIBEIRO; WALTER, 2008).

A diversidade da vegetação do Cerrado tem um papel fundamental na manutenção dos serviços ecossistêmicos, especialmente na regulação do ciclo do carbono e na proteção do solo contra processos erosivos (KLINK; MACHADO, 2005). Entretanto, as intensas pressões antrópicas, especialmente a expansão agropecuária e o uso inadequado do solo, têm levado a uma crescente degradação do bioma, resultando em perdas significativas de carbono armazenado no solo e na biomassa (BATLLE-BAYER; BATJES; BINDRABAN, 2010; MACEDO et al., 2017). Estudos indicam que estratégias de restauração ecológica, como a regeneração natural e o manejo sustentável, são fundamentais para mitigar essas perdas e promover a recuperação da funcionalidade ecológica dessas áreas (CHAZDON; GUARIGUATA, 2016; STRASSBURG et al., 2016).

No Cerrado, os maiores estoques de carbono são encontrados no solo, seguido da biomassa subterrânea (raízes) e aérea (PAIVA; REZENDE; PEREIRA, 2011; BATLLE-BAYER; BATJES; BINDRABAN, 2010). Porém, a degradação do Cerrado, que tem se intensificado cada vez mais nas últimas cinco décadas, para dar espaço a outros usos da terra,

em especial à expansão da agricultura e da pecuária, tem contribuído significativamente com as emissões brasileiras de GEE, que têm se destacado mundialmente quando comparadas com a proporção das emissões globais do setor de uso da terra (BUSTAMANTE, 2024). Impactos ambientais, decorrentes ou de mudanças no uso e cobertura do solo ou do manejo inadequado do solo, modificam de forma significativa a qualidade do ambiente edáfico, podendo acarretar vários distúrbios tanto nas funções do solo, quanto nas suas propriedades físicas, químicas e biológicas (BORGES et al., 2015; BARBOSA et al., 2018; OLIVEIRA FILHO et al., 2018; SALES et al., 2018), incluindo as perdas significativas do carbono armazenado no solo (MACEDO et al., 2017).

Entre os diversos tipos de vegetação do Cerrado, que variam entre formações florestais, savânicas e campestres (RATTER, 1997; RIBEIRO; WALTER, 2008), o cerrado *sensu stricto*, que é uma formação tipicamente savânica e que originalmente ocupava 70% da área total do bioma (FELFILI; SILVA JÚNIOR, 2005), já teve grande parte da cobertura nativa convertida em outros usos, em especial, agricultura e pastagem. Sua paisagem é composta por um estrato herbáceo dominado principalmente por gramíneas e por um estrato de árvores e arbustos tortuosos, de pequeno porte, irregularmente ramificados e com adaptações morfofisiológicas para sobrevivência à seca e ao fogo (EITEN, 1972; RIBEIRO; WALTER, 2008).

Das áreas naturais remanescentes de cerrado *sensu stricto*, parte encontra-se protegida nas poucas Unidades de Conservação existentes no bioma Cerrado e outras áreas encontram-se fragmentadas. Das áreas de cerrado *sensu stricto* que foram ocupadas anteriormente por agricultura e pastagem, muitas podem ser encontradas abandonadas, em condições degradadas ou protegidas e em processo de regeneração natural. Por outro lado, são raras as áreas remanescentes de cerrado *sensu stricto* sob regime de manejo e uso sustentável da sua vegetação, como existe na Amazônia ou outros biomas florestais.

Áreas de cerrado *sensu stricto*, naturais remanescentes, ou protegidas e em processo de regeneração natural, ou degradadas possuem características diferentes quanto a distribuição dos estoques de carbono nos compartimentos aéreos e subterrâneos. Essas diferenças, além de estarem relacionadas às características dos solos e ao regime do fogo, que é comum na região do Cerrado, também estão associadas à sazonalidade do clima, cujas mudanças no regime de precipitações podem alterar significativamente o ciclo do carbono e a acumulação de biomassa (MIRANDA et al., 2014).

Quantificar e monitorar os estoques de carbono na biomassa e no solo de áreas de cerrado *sensu stricto* nessas diferentes condições, é essencial para melhor compreender o impacto dos distúrbios sobre a capacidade da vegetação e do solo em estocar o carbono

atmosférico. A restauração de áreas degradadas pode reverter parte dos impactos ocorridos, promovendo a recuperação dos estoques de carbono (STRASSBURG et al., 2016) e a regeneração natural é uma estratégia de restauração que depende da capacidade do ecossistema em se autorrecuperar, oferecendo uma solução potencialmente eficiente e de baixo custo (CHAZDON; GUARIGUATA, 2016). Portanto, compreender o papel dos ecossistemas florestais em regeneração quanto a capacidade de sequestrar e estocar carbono é de extrema importância, para que se possa avaliar até que ponto esses ecossistemas em regeneração, por si só são capazes de mitigar as concentrações de CO₂ na atmosfera (PUGH et al., 2019).

Portanto, realizamos o presente estudo visando (a) quantificar os estoques de carbono no solo em diferentes áreas de cerrado *sensu stricto*, que tiveram a sua vegetação natural removida e há mais de 30 anos estão em processo de regeneração natural (sucessão secundária), protegidas dentro de Unidades de Conservação; (b) avaliar o impacto do histórico de uso/degradação dessas áreas sobre o estoque de carbono; e (c) identificar variáveis bióticas e abióticas mais relacionadas com o estoque de carbono no solo das diferentes áreas.

No presente estudo, partimos da hipótese de que um período de três décadas não é suficiente para que áreas de cerrado *sensu stricto* que tenham sido submetidas anteriormente à altas intensidades de antropização, consigam recuperar seus estoques de carbono no solo, pois, dependendo da intensidade do distúrbio, a vegetação nativa pode apresentar baixa resiliência, o que irá influenciar diretamente no estoque de carbono no solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em 2022, em duas Unidades de Conservação (UC) do Distrito Federal, ou seja, Reserva Ecológica e Experimental da Universidade de Brasília, Fazenda Água Limpa - FAL e Estação Ecológica de Águas Emendadas – ESECAE (Figura 1).

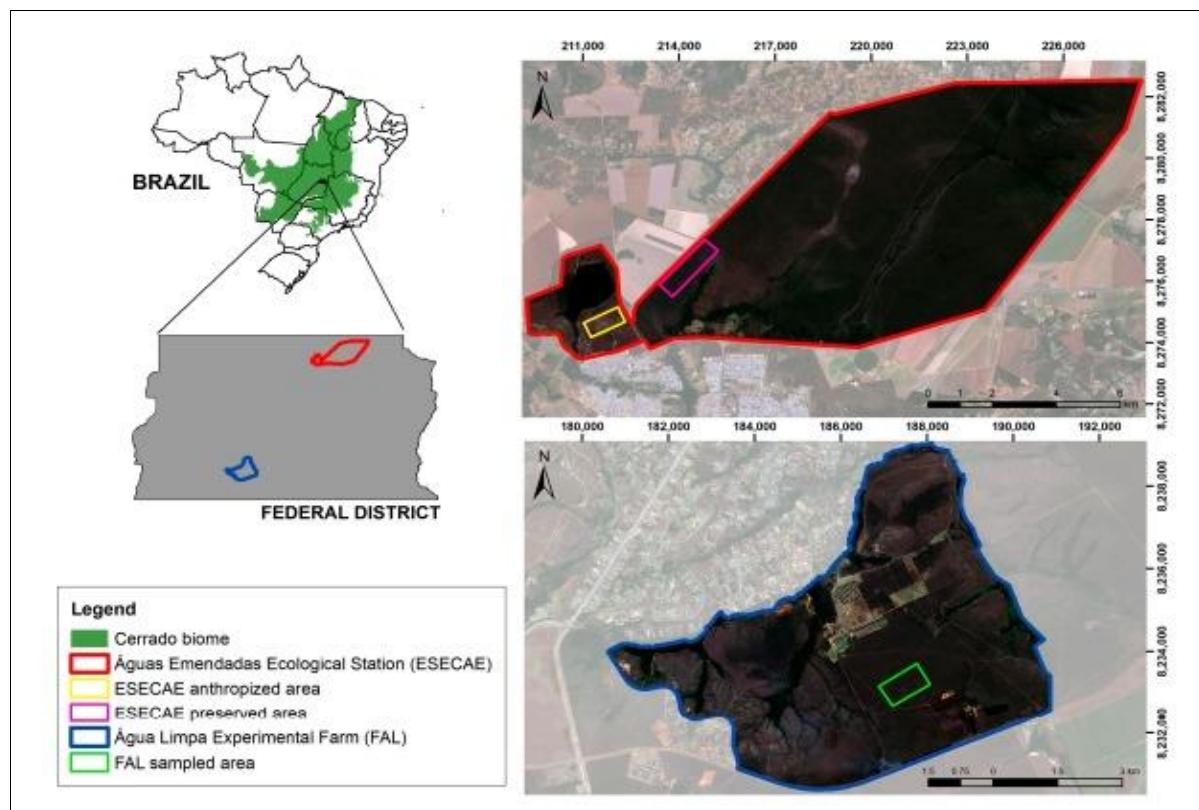


Figura 1 – Localização das áreas de estudo na Reserva Ecológica e Experimental da Universidade de Brasília, Fazenda Água Limpa - FAL e Estação Ecológica de Águas Emendadas – ESECAE, em Brasília, DF. Fonte: QUEIROZ et al., 2023

A FAL ocupa 4.500 hectares e está situada na região sudeste do Distrito Federal, cerca de 28 km do centro de Brasília, a uma altitude média de 1.100 m e entre as coordenadas geográficas 15°56' - 15° 59' S e 47°53' - 47°59' W. Esta UC faz parte da Área de Proteção Ambiental das Bacias do Gama e Cabeça do Veado e tem no seu interior a Área Relevante de Interesse Ecológico - ARIE Capetinga/Taquara. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw (ALVARES et al., 2013), com temperatura média anual de 20°C e precipitação média anual de 1.600 mm (OLIVEIRA, 2014). O solo predominante é o Latossolo Vermelho-Amarelo, com alto teor de alumínio e baixos teores de cálcio e magnésio (ABDALA, 1998).

A ESECAE, com 10.547 hectares, é uma UC de Proteção Integral, situada na região nordeste do Distrito Federal, distante de, aproximadamente, 50 Km do centro de Brasília, entre as coordenadas geográficas 15°32' - 15°38'S e 47°33' - 47°37' W, e a uma altitude média de 1.100 metros. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw (ALVARES et al., 2013), com temperatura média anual de 23°C e precipitação média anual de 1.552 mm (MAIA; BAPTISTA, 2008). As principais classes de solos ocorrentes na área são Latossolos Vermelhos, Latossolos Vermelho-Amarelos e Cambissolos Háplicos (LACERDA, 2008). A ESECAE sofre pressões e impactos antrópicos do entorno que é ocupado por uma malha urbana e por atividades agropecuárias que aumentam os riscos de incêndio e de contaminação em seu perímetro (SALGADO; GALINKIN, 2008).

Em ambas UCs, a vegetação predominante é o cerrado *sensu stricto* (Figura 2), que é o tipo de vegetação do Cerrado que melhor representa o aspecto savânicos do Cerrado, e cuja paisagem é composta por um estrato herbáceo, dominado principalmente por gramíneas, e por um estrato de árvores e arbustos tortuosos, de pequeno porte, irregularmente ramificados e com adaptações morfofisiológicas para sobrevivência à seca e ao fogo (EITEN, 1972; RIBEIRO; WALTER, 2008).

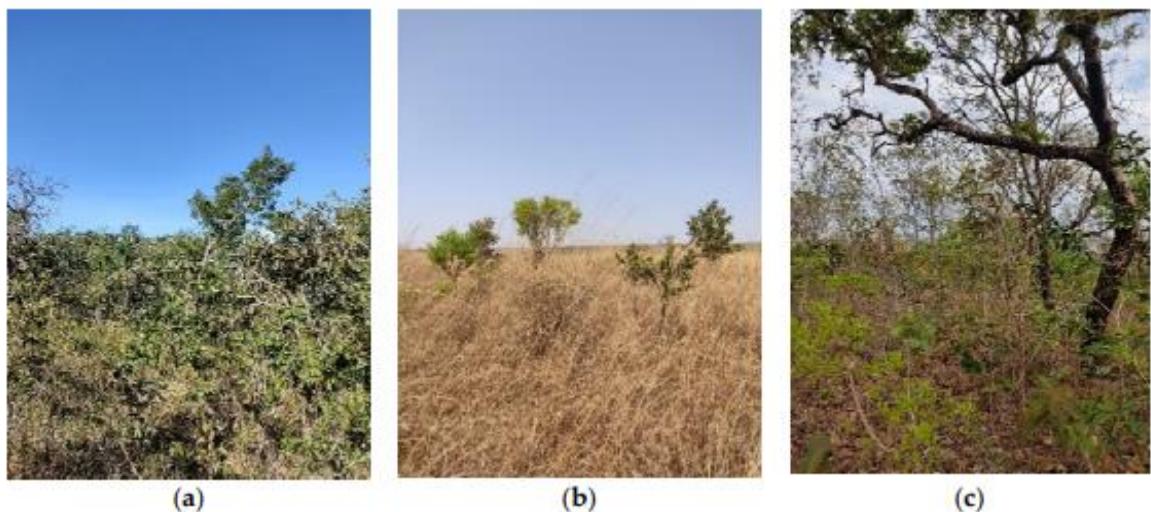


Figura 2 - Vista de campo dos sítios de cerrado *sensu stricto* amostrados na (a) área experimental Reserva Ecológica e Experimental da Universidade de Brasília, Fazenda Água Limpa - FAL; na (b) área antropizada da Estação Ecológica de Águas Emendadas – ESECAE e na (c) área preservada da Estação Ecológica de Águas Emendadas – ESECAE. Fonte: QUEIROZ et al., 2023.

2.2 Coleta de Dados

2.2.1 Amostragem da Vegetação Lenhosa

Os dados foram coletados em áreas de cerrado *sensu stricto* submetidas a diferentes intensidades de distúrbio, que fazem parte de projetos de pesquisa de longa duração implantados na FAL e na ESECAE (QUEIROZ et al., 2023).

Na FAL, selecionamos uma área experimental de cerrado *sensu stricto* submetida a seis sistemas de manejo baseados em diferentes técnicas de colheita e extração da vegetação lenhosa, que no presente estudo denominamos de tratamentos T1, T2, T3, T4, T5 e T6 (Tabela 1). A área experimental consiste em três blocos. Em 1988, cada bloco foi subdividido em unidades amostrais (parcelas) de 0,1 ha (20 m x 50 m). Em cada bloco foram selecionadas, aleatoriamente, seis parcelas e cada parcela foi submetida a um sistema de manejo diferente (REZENDE, 2002).

Tabela 1 – Descrição dos tratamentos amostrados nas áreas da Reserva Ecológica e Experimental da Universidade de Brasília, Fazenda Água Limpa - FAL e da Estação Ecológica de Águas Emendadas – ESECAE, em Brasília, DF.

Tratamento	Descrição	Nº de Parcelas de 0,1 ha	Localização
T1	Corte com motosserra da vegetação lenhosos com Db \geq 5 cm e retirada da lenha	3	FAL
T2	Corte com motosserra dos indivíduos lenhosos com Db \geq 5 cm, retirada da lenha e fogo	3	FAL
T3	Corte raso da vegetação com trator de lâmina e retirada da lenha	3	FAL
T4	Corte raso da vegetação com trator de lâmina, retirada da lenha e fogo	3	FAL
T5	Corte raso da vegetação com trator de lâmina retirada da lenha e duas gradagens	3	FAL
T6	Corte com motosserra dos indivíduos lenhosos com Db \geq 5 cm, retirada da lenha, fogo, destoca e duas gradagens (24")	3	FAL
T7	Desmatamento da vegetação e ocupação da área por atividades agropecuárias.	10	ESECAE
T8	Testemunha	9	ESECAE

Desde 1996, a área experimental da FAL, que contém um total de 18 parcelas de 0,1 ha submetidas aos seis diferentes sistemas de manejo, vem sendo monitorada periodicamente, sendo registrados todos os indivíduos lenhosos, arbóreos e arbustivos, vivos e mortos em pé, com Db (diâmetro tomado a 0,30 m do solo) igual ou superior a 5 cm. Os indivíduos de cada

parcela são identificados botanicamente ao nível de família, gênero e espécie, etiquetados com um número de identificação, e as variáveis Db e altura total são registradas.

Na ESECAE foram selecionadas duas áreas de cerrado *sensu stricto*. A primeira área é de um cerrado *sensu stricto* antropizado, que para o presente estudo denominamos de tratamento T7 (Tabela 1). Em 1976, essa área foi desmatada pelo antigo proprietário para o cultivo de pastagens exóticas e grãos (soja), mas, em 1988, a área foi incorporada à ESECAE e, desde então, encontra-se protegida para a recuperação da sua vegetação original. Porém, mesmo após sua proteção, a vegetação nativa que vem se estabelecendo na área está muito diferente do cerrado *sensu stricto* preservado que se encontra nas áreas naturais limítrofes, já que a regeneração natural estabelecida no local encontra-se totalmente dominada por gramíneas exóticas como o capim gordura (*Melinis minutiflora* Beauv), a braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf) e o green panicum (*Panicum maximum* Jacq), que são consideradas espécies invasoras e agressivas no Cerrado (REZENDE; PAPA, 2008; QUEIROZ et al., 2023), considerando que o bioma oferece condições ecológicas semelhantes às de seus *habitats* de origem, isto é, as savanas africanas, facilitando sua disseminação.

Em 1998 foram instaladas nessa área da ESECAE, 10 parcelas permanentes de 0,1 ha (20 m x 50 m), distribuídas aleatoriamente. Durante o inventário foram registrados todos os indivíduos lenhosos, arbóreos e arbustivos, vivos e mortos em pé, com Db (diâmetro tomado a 0,30 m do solo) igual ou superior a 5 cm. Essa área também vem sendo monitorada periodicamente desde 1998 e os indivíduos de cada parcela são identificados botanicamente ao nível de família, gênero e espécie, etiquetados com um número de identificação e as variáveis Db e altura total são registradas.

A segunda área da ESECAE, que neste estudo denominamos de tratamento T8 (Tabela 1), é coberta por um cerrado *sensu stricto* sem presença de distúrbio antrópico, com exceção de incêndios florestais ocasionais, comuns na região do Cerrado, durante a época seca, que podem ser provenientes de causas naturais ou, em sua maioria, antrópicas (QUEIROZ et al., 2023). Por se tratar de um cerrado *sensu stricto* em condição natural, definimos T8 como sendo o tratamento Testemunha deste estudo. Em 2008 foram implantadas na área do tratamento T8 (Testemunha), um total de 9 parcelas permanentes de 0,1 ha (20 m x 50 m), distribuídas aleatoriamente. Os mesmos procedimentos adotados para o levantamento da vegetação lenhosa, arbórea e arbustiva, viva e morta em pé, nas parcelas dos tratamentos T1 a T7, foram considerados nas parcelas do tratamento T8, que vêm sendo monitoradas periodicamente desde 2008.

Neste estudo, utilizamos os dados provenientes dos monitoramentos realizados em 2021, nas áreas da FAL, e em 2022, nas áreas da ESECAE. Todas as espécies lenhosas arbóreas-arbustivas foram identificadas botanicamente segundo o sistema de classificação APG IV (BYNG et al., 2016). A partir dos dados dos inventários realizados nas áreas da FAL e da ESECAE foram obtidas as seguintes variáveis bióticas para cada parcela de 0,1 ha amostrada: número de espécies (Nsp), densidade de indivíduos (N), área basal (G) e biomassa lenhosa seca (fuste e galhos) acima do nível do solo (BS).

A BS (Kg) de cada indivíduo lenhoso foi estimada a partir da equação alométrica $BS = 0,49129 + 0,02912Db^2Ht$, ajustada para o cerrado *sensu stricto* da região (REZENDE et al., 2006), em que Db = diâmetro tomado à 0,30 m do nível do solo (cm) e Ht = altura total (m).

2.2.2 Amostragem de Solos

Em 2022, coletamos amostras de solo no interior de cada parcela permanente de 0,1 ha pertencente a cada tratamento (T1 a T8). Coletamos o solo na profundidade de 0-20 cm e em três subparcelas de 0,5 m x 0,5 m, implementadas sistematicamente ao longo de uma diagonal da parcela, sendo uma no centro e as demais nos dois cantos da diagonal. A coleta foi realizada com o uso de um trado holandês e cada amostra coletada foi armazenada em saco plástico identificado pelos números da parcela, subparcela e local de coleta (Tratamento). Todas as amostras foram analisadas em laboratório, onde foram determinados o teor de carbono e as características químicas (pH; Ca; Mg; Ca+Mg; Al; H+Al; CTC; P; K; MO; Sat. Al; Sat. Base; Ca/Mg; CTC; Ca/CTC; Mg/CTC; (H+Al)/CTC e K/CT) e físicas (% argila; % silte; % areia e DS) do solo, usando a metodologia indicada pela EMBRAPA (2017).

Para determinar a densidade aparente do solo coletamos amostras indeformadas de solo nas mesmas subparcelas de 0,5 m x 0,5 m. A coleta foi realizada usando um anel volumétrico de aço, com volume de 96 cm³. Cada amostra indeformada coletada foi colocada em um saco de papel identificado pelos números da parcela, subparcela e local de coleta (Tratamento). Na sequência as amostras foram encaminhadas para laboratório para secagem em estufa com circulação e renovação de ar forçada, à 105°C, por cerca de 48 horas, até peso constante. Após obter o peso seco de cada amostra em balança de precisão (0,01g), determinamos a densidade do solo (DS, em g cm⁻³), a partir da seguinte relação $DS = \frac{M}{V}$ (GATTO, 2005), em que M é o peso seco de cada amostra (g) e V é o respectivo volume do anel volumétrico (cm³) usado na coleta.

O Estoque de Carbono no Solo (ECS), em Mg ha⁻¹, de cada amostra de solo foi obtido pela relação: $ECS = \frac{C \cdot DS \cdot P}{10}$ (GATTO, 2005), em que C é o teor de carbono orgânico (g Kg⁻¹) da amostra, determinado pelo método de determinação da matéria orgânica do solo (MOS) de Walkley Black (WB) (EMBRAPA, 2017); DS é a densidade do solo (g cm⁻³) da amostra e P é a profundidade de coleta do solo (cm) da amostra.

1.1 Análise de Dados

A partir dos dados obtidos neste estudo, relacionados às variáveis edáficas (químicas e físicas) e bióticas que foram registradas nas parcelas de 0,1 ha amostradas nas áreas de cerrado *sensu stricto* dos diferentes tratamentos (T1 a T8), avaliamos a existência de correlação da variável ECS com as variáveis edáficas, ou seja, químicas (pH; Ca; Mg; Ca+Mg; Al; H+Al; CTC; P; K; MO; Sat. Al; Sat. Base; Ca/Mg; CTC; Ca/CTC; Mg/CTC; (H+Al)/CTC e K/CT) e físicas (% argila; % silte; % areia e DS), e com as variáveis bióticas (Nsp - número de espécies; Nind - número de indivíduos; G - área basal e BS - biomassa lenhosa seca acima do nível do solo).

Antes, porém, testamos a normalidade e a homogeneidade dos dados de cada variável para decidirmos o tipo de análise de correlação a ser usada, ou seja, se correlação de Pearson, para dados paramétricos, ou se correlação de Spearman, para dados não paramétricos (ZAR, 1991). Testamos a normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias dos dados pelo teste de Levene (ZAR, 1991), considerando $p > 0,05$.

A partir da análise de correlação buscamos identificar quais variáveis analisadas (edáficas e bióticas) mais se correlacionavam com o ECS. A significância das correlações foi verificada pelo teste t ($p < 0,05$) (ZAR, 1991).

Os dados de ECS e os dados das demais variáveis edáficas e bióticas também foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) visando avaliar a existência de possíveis diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos considerando todas as variáveis analisadas (edáficas e bióticas). Realizamos a ANOVA considerando um delineamento inteiramente casualizado com repetições diferentes por tratamento (DIAS; BARROS, 2009), considerando que o número de parcelas de 0,1 ha amostradas nos tratamentos analisados era diferente. Portanto, foram consideradas 10 repetições para o tratamento T7 da ESECAE, 9 repetições para o tratamento T8 da ESECAE e três repetições para cada tratamento da FAL (T1 a T6). Caso fosse detectada a existência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste F ($p < 0,05$) para o ECS e as demais variáveis bióticas e edáficas analisadas, aplicamos o

teste Tukey (DIAS; BARROS, 2009) para comparar as médias dos tratamentos, considerando $p < 0,05$.

Para o caso das variáveis que não apresentaram distribuição normal, utilizamos a análise de variância de Kruskal-Wallis (ZAR, 1991), que é uma análise de variância não-paramétrica que avalia a hipótese de que k tratamentos independentes avaliados têm igual distribuição. A significância da ANOVA de Kruskal-Wallis foi avaliada pelo teste χ^2 , que, quando significativo, indica que pelo menos dois tratamentos possuem distribuições diferentes ($p < 0,05$). Para as comparações múltiplas entre pares de tratamentos utilizamos o teste não-paramétrico de Dunn-Bonferroni (PONTES; CORRENTES, 2001), que utiliza os postos medianos da variável na comparação ($p < 0,05$).

Todas as análises de dados foram realizadas no Software Statistica.

2 RESULTADOS

Considerando todas as variáveis bióticas e edáficas analisadas nas áreas de cerrado *sensu stricto* dos oito tratamentos estudados, verificamos que o ECS foi a única variável cujos dados apresentaram distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk ($p = 0,59$) e variâncias homogêneas pelo teste de Levene ($p = 0,75$). Todas as demais variáveis analisadas, relacionadas ao solo e a vegetação lenhosa, não apresentaram distribuição normal. Assim, para efeito da análise de correlação entre o ECS e as variáveis do solo e da vegetação, utilizamos a análise de correlação não-paramétrica de Spearman (ZAR, 1991), que identificou que o ECS apresentou correlação significativa ($p < 0,05$) e positiva apenas com a MOS ($r = 0,68$). O resultado da análise de correlação entre o ECS e as variáveis edáficas e bióticas é apresentado na Figura 3.

Após submeter os dados de ECS a ANOVA para dados paramétricos, verificamos que os valores médios de ECS registrados nas áreas de cerrado *sensu stricto*, submetidas aos diferentes tratamentos analisados, foram estatisticamente iguais pelo teste F ($p = 0,54$), indicando que os estoques médios de carbono no solo, na profundidade de 0-20 cm, registrados nas áreas de cerrado que sofreram distúrbios antrópicos (T1 a T7), cerca de 34 anos atrás, e que, durante esse período passaram a ser protegidas para recuperação da vegetação nativa, são estatisticamente similares ao ECS médio obtido para a área de cerrado não antropizado (T8).

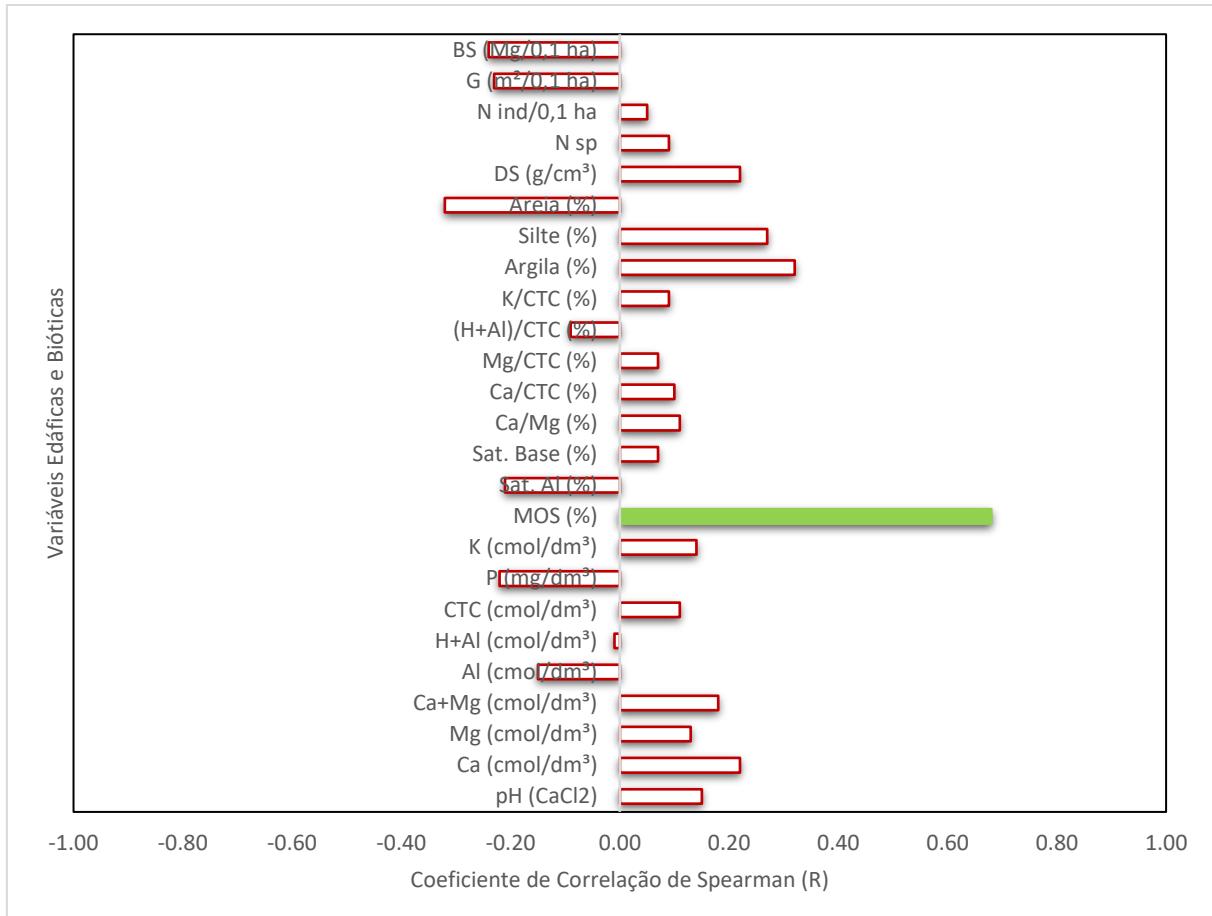


Figura 3 – Representação gráfica da análise de correlação de Spearman entre o ECS e as variáveis edáficas e bióticas registradas nas áreas de cerrado *sensu stricto* dos tratamentos avaliados na Reserva Ecológica e Experimental da Universidade de Brasília, Fazenda Água Limpa - FAL e na Estação Ecológica de Águas Emendadas – ESECAE, em Brasília, DF.

O único tipo de distúrbio registrado nas áreas de todos os tratamentos foi o fogo, que é um distúrbio, que pode ser natural ou antrópico e que ocorre comumente no Bioma Cerrado nos períodos de seca. Com base nos resultados encontrados podemos afirmar que o ECS médio encontrado nas áreas de cerrado *sensu stricto* analisadas é igual a $57,32 \pm 2,73 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Tabela 2).

Para as variáveis edáficas P, K, MOS, DS, argila, silte e areia, verificamos pela análise de variância de Kruskal-Wallis, que as distribuições dos dados dessas variáveis foram estatisticamente similares ($p > 0,05$) entre os tratamentos analisados. Os estoques dessas variáveis no solo das áreas de cada tratamento apresentaram variabilidade média, variando de 11,81% para DS e 17,59% para P. A única exceção foi para o K, que apresentou alta variabilidade (66,87%) (Tabela 3).

Tabela 1 – Valores médios ECS ($Mg\ ha^{-1}$) para os diferentes tratamentos avaliados na Reserva Ecológica e Experimental da Universidade de Brasília, Fazenda Água Limpa - FAL e na Estação Ecológica de Águas Emendadas – ESECAE, em Brasília, DF. (Valores são estatisticamente iguais, $p > 0,05$)

TRATAMENTO	Valores médios de ECS ($Mg\ ha^{-1}$)
1	62,41
2	61,51
3	60,58
4	60,82
5	53,01
6	53,08
7	53,93
8	58,14

Tabela 3 – Variáveis químicas e físicas do solo (P, K, MOS, DS, argila, silte e areia) registradas nas áreas de cerrado *sensu stricto* amostradas na FAL (T1 a T6) e na ESECAE (T7 e T8), cujos dados apresentaram distribuições estatisticamente similares pelo teste de Kruskal-Wallis ($p > 0,05$).

Variáveis	Mediana \pm erro	Mínimo	Máximo	CV (%)
P (cmolc cm^{-3})	$1,60 \pm 0,05$	1,00	2,00	17,59
K (cmolc cm^{-3})	$0,08 \pm 0,01$	0,04	0,36	66,87
MOS ($g\ kg^{-1}$)	$31,00 \pm 0,75$	20,00	39,00	15,41
DS ($g\ cm^{-3}$)	$0,96 \pm 0,02$	0,85	1,33	11,81
Argila (%)	$42,0 \pm 1,08$	29,00	58,00	15,49
Silte (%)	$8,00 \pm 0,24$	7,00	13,00	17,25
Areia (%)	$51,00 \pm 1,21$	29,00	60,00	14,85

Para as demais variáveis edáficas analisadas, ou seja, pH, Ca, Mg, Ca+Mg, Al, H+Al, Sat. Al, Sat. Base, Ca/Mg, CTC, Ca/CTC, Mg/CTC, (H+Al)/CTC e K/CTC e para as variáveis bióticas analisadas, ou seja, Nsp, N, G e BS, a análise de variância de Kruskal-Wallis indicou a existência de diferenças significativas, pelo teste χ^2 ($p < 0,05$), entre as distribuições dos dados dessas variáveis em pelo menos dois tratamentos testados (Tabela 4).

Aplicando o teste de comparações múltiplas não paramétricas de Dunn-Bonferroni verificamos que nas áreas de cerrado *sensu stricto* em processo de regeneração, que foram desmatadas no passado para dar espaço a implantação de pastagem e agricultura (T7), as variáveis pH, Ca, Mg, Ca+Mg, Sat. Base, Ca/Mg, Ca/CTC, Mg/CTC e K/CTC apresentaram postos medianos maiores e estatisticamente diferentes ($p < 0,05$) daqueles registrados nas áreas dos demais tratamentos (Tabela 4). Por outro lado, o teste também indicou que os postos medianos dos demais tratamentos foram estatisticamente iguais ($p > 0,05$), com exceção da variável Sat. Base, em que T8 (Testemunha) ocupou o segundo maior posto mediano, que foi estatisticamente diferente dos postos dos demais tratamentos ($p < 0,05$).

Tabela 4 –Resultados das comparações múltiplas não paramétricas entre os tratamentos analisados nas áreas de cerrado *sensu stricto* amostradas na FAL (T1 a T6) e na ESECAE (T7 e T8), considerando os postos medianos de variáveis do solo e da vegetação e utilizando o teste não paramétrico de Dunn Bonferroni Medianas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si (P>0,05).

Atributos	Unidade	TRATAMENTOS							
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
pH	CaCl ₂	4,10 B	4,10 B	4,00 B	4,00 B	4,00 B	4,00 B	4,75 A	4,10 B
Ca		0,27 B	0,30 B	0,30 B	0,30 B	0,30 B	0,30 B	1,84 A	0,29 B
Mg	cmolc dm ⁻³	0,17 B	0,20 B	0,20 B	0,13 B	0,20 B	0,20 B	0,64 A	0,19 B
Ca+Mg		0,50 B	0,50 B	0,50 B	0,40 B	0,50 B	0,50 B	2,35 A	0,50 B
Sat. Base		8,00 C	8,00 C	8,00 C	5,00 C	7,00 C	8,00 C	39,00 A	11,00 B
Ca/Mg		1,50 B	1,50 B	1,50 B	2,00 B	1,50 B	1,50 B	2,85 A	1,50 B
Ca/CTC	%	4,20 B	4,40 B	4,40 B	3,40 B	3,60 B	3,90 B	27,10 A	5,70 B
Mg/CTC		2,80 B	2,90 B	2,90 B	1,30 B	2,40 B	2,60 B	9,70 A	3,80 B
K/CTC		0,90 B	1,10 B	1,10 B	1,30 B	1,20 B	0,90 B	2,35 A	1,50 B
Al		0,50 A	0,50 A	0,50 A	0,50 A	0,50 A	0,50 A	0,00 B	0,50 A
H+Al	cmolc dm ⁻³	6,60 A	6,20 A	6,20 A	7,20 A	7,80 A	7,00 A	3,50 B	4,80 A
Sat. AL		47,00 A	46,00 A	46,00 A	55,00 A	46,00 A	46,00 A	0,00 B	46,00 A
H+Al/CTC	%	91,70 A	91,20 A	91,20 A	94,40 A	92,90 A	92,10 A	60,45 B	88,90 A
N	ind ha ⁻¹	2.320,00 A	2.460,00 A	2.140,00 A	1.940,00 B	2.090,00 B	2.320,00 A	110,00 C	1.530,00 B
BS	Mg ha ⁻¹	1,90 B	1,39 B	1,60 B	1,92 B	1,90 B	1,51 B	0,10 C	3,63 A
G	m ² ha ⁻¹	1,27 B	1,28 B	1,30 B	1,29 B	1,42 B	1,25 B	0,07 C	1,71 A
Nsp		38 A	36 A	34 A	34 A	34 A	33 A	4 B	33 A
CTC	cmolc dm ⁻³	7,16 A	6,77 A	6,78 A	7,72 A	8,40 A	7,57 A	5,72 A	5,34 B

Ao contrário do observado acima, o teste de Dunn-Bonferroni mostrou que para as variáveis Al, H+Al, Sat. Al, H+Al/CTC, N, Nsp, G e BS, o tratamento T7 apresentou postos medianos menores e estatisticamente diferentes ($p < 0,05$) dos postos medianos dos demais tratamentos (Tabela 4), indicando que o uso do solo no passado por pastagem e atividades agrícolas ainda está interferindo nessas características químicas do solo e, consequentemente, na estrutura e florística do cerrado *sensu stricto*, mesmo passados 34 anos da interrupção desses usos.

Nos demais tratamentos, ou seja, T1 a T6 na FAL e T8 na ESECAE, os postos medianos dessas variáveis foram estatisticamente similares. As únicas exceções são para as variáveis G e BS, em que o tratamento testemunha (T8) se destacou por ocupar o maior posto mediano, sendo estatisticamente diferente dos demais, e a variável N (densidade de indivíduos), em que os tratamentos T1, T2, T3 e T6, localizados na FAL, apresentaram postos medianos maiores e estatisticamente similares, seguidos dos tratamentos T4, T5 e T8, que também apresentaram postos similares para densidade de indivíduos. Para a variável densidade de indivíduos, o menor posto mediano foi registrado no tratamento T7, sendo o seu valor estatisticamente diferente dos demais. No tratamento T7, a densidade de indivíduos extrema é extremamente baixa, chegando ser 14 a 22 vezes menor que os demais tratamentos.

Quanto à variável CTC do solo verificamos pelo teste de Dunn-Bonferroni, que o tratamento testemunha (T8) apresentou o maior posto mediano, e este foi estatisticamente diferente dos postos medianos dos demais tratamentos. Além disso, o teste mostrou que para a variável CTC, o posto mediano do tratamento 7 (cerrado *sensu stricto* em processo de regeneração, desmatado no passado para ocupação de atividades agropecuárias) foi estatisticamente similar aos postos dos tratamentos da FAL.

3 DISCUSSÃO

Em geral, a quantidade de nutrientes nos solos do Cerrado apresenta oscilações extremas dentro de uma mesma área, o que contribui para características intrínsecas da vegetação (BRADY; WEIL, 2013). Sendo assim, maior ou menor quantidade de determinado nutriente não limita o desenvolvimento da vegetação.

Diferentes formas de vida influenciam o estoque de carbono no solo. Árvores e arbustos aumentam o ECS por meio raízes profundas e da deposição de serapilheira (BALBINOT et al.,

2003). Já as gramíneas incorporam carbono rapidamente, mas com menor estabilidade (SOUZA et al., 2018). Microrganismos e fauna do solo auxiliam na decomposição da matéria orgânica e na formação de agregados estáveis, promovendo o armazenamento de carbono (SMITH et al., 2017).

O ciclo do carbono é um processo fundamental na regulação do clima e na manutenção da fertilidade dos solos. Segundo Lal (2004), a dinâmica do carbono no solo está diretamente relacionada à sua capacidade de sequestro, influenciando a mitigação das mudanças climáticas. De acordo com Smith et al. (2017), a matéria orgânica do solo desempenha papel essencial na retenção do carbono, evitando sua liberação para a atmosfera e contribuindo para a estabilidade climática. Através da fotossíntese, as plantas capturam o CO₂ da atmosfera e o transformam em biomassa, que posteriormente se decompõe e libera carbono no solo. Esse carbono pode ser armazenado na matéria orgânica do solo ou liberado novamente para a atmosfera por meio da respiração microbiana e outros processos naturais. A manutenção desse equilíbrio é essencial para garantir o sequestro de carbono e minimizar os impactos das mudanças climáticas.

A MOS foi identificada como a principal variável correlacionada com o ECS devido à sua influência direta na retenção de carbono no solo, na estabilidade dos agregados do solo e na dinâmica dos nutrientes. Estudos indicam que a MOS desempenha papel fundamental na capacidade de sequestro de carbono, especialmente em solos de cerrado com elevada mineralização da matéria orgânica. Segundo Lima et al. (2015), a MOS é um dos principais reservatórios de carbono no solo, contribuindo significativamente para o estoque total de carbono e influenciando a qualidade do solo. SOUZA et al. (2018) destacam que a decomposição da MOS libera compostos orgânicos que melhoram a estrutura do solo e aumentam a retenção de carbono, reforçando sua correlação com o ECS. Em contrapartida, variáveis como pH, textura do solo e teores de macro e micronutrientes apresentam menor influência direta na estabilização do carbono no solo, o que justifica a baixa correlação observada entre essas variáveis e o ECS.

A MOS possui um ciclo de decomposição mais lento em relação a outros componentes do solo, o que favorece a manutenção do carbono estocado por períodos prolongados (SMITH et al., 2017). Dessa forma, a correlação positiva entre MOS e ECS indica a importância de práticas de manejo que favoreçam o acúmulo de matéria orgânica no solo, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e para a sustentabilidade dos ecossistemas do Cerrado

(LAL, 2004). A baixa correlação encontrada foi um indicativo do caminho de análises a serem feitas, visando entender como as demais variáveis poderiam influenciar no ECS dos tratamentos.

A área de cerrado *sensu stricto* não antropizado da ESECAE (Tratamento 8) e as áreas de cerrado *sensu stricto* dos demais tratamentos (T1 a T7), que se encontram em processo de recuperação da vegetação natural, por cerca de 34 anos, tendem a ser similares quanto a diferentes características químicas e físicas do solo, e tais características influenciam na dinâmica do ECS e de outros nutrientes presentes no solo (KLUG et al., 2020), justificando, dessa forma, as diferenças não significativas entre os oito tratamentos analisados, para o ECS e outras variáveis edáficas avaliadas.

A textura do solo pode influenciar direta ou indiretamente nas propriedades químicas e físicas do solo. A densidade de um solo está relacionada ao tamanho das partículas que compõem esse solo e, consequentemente, essa variável se correlaciona com a drenagem da água, com a erodibilidade, com a lixiviação, com a CTC e com os teores de MOS, que podem contribuir com ECS do solo. Segundo RAIJ et al. (1997) e MEURER (2007), os solos apresentam densidades de até 15 g dm^{-3} ($1,5 \text{ cm}^{-3}$) para solos arenosos, 16 e 30 g dm^{-3} ($1,6$ e $3,0 \text{ g cm}^{-3}$) para solos de textura média e 31 a 60 g dm^{-3} ($3,1$ a $6,0 \text{ g cm}^{-3}$) para solos argilosos. No presente estudo os solos dos oito tratamentos apresentaram texturas similares, com densidades que caracterizam esses solos como arenosos.

De acordo com os dados de mapeamento dos solos do DF realizado pelo MAPBIOMAS (2023), a média estimada para o ECS em formações savânicas do Cerrado é de $59,26 \text{ Mg ha}^{-1}$ e esse valor é similar a média registrada para os 8 tratamentos avaliados.

Os tratamentos T1, T2, T3, T4, T5, T6 e T8 são caracterizadas por altas densidades de árvores, enquanto o tratamento T7 apresenta baixíssima densidade de indivíduos e totalmente dominado por gramíneas exóticas. Contudo, a quantidade de MOS encontrada nas áreas de todos os tratamentos analisados foram estatisticamente iguais, corroborando com os valores também obtidos para ECS. Áreas cobertas por vegetação lenhosa tendem a ter uma deposição contínua de biomassa que promovem a ciclagem dos nutrientes (CASTRO; PACIULLO, 2006; HOWLETT et al., 2011) e contribuem com o ECS, enquanto, áreas dominadas por gramíneas têm maior facilidade em aumentar o ECS, pois, as gramíneas têm crescimento radicular intenso que quando entra em decomposição auxilia a liberação de nutrientes para o solo, inclusive o

carbono (SALLES et al., 2018; TORMENA et al., 2004). Os resultados encontrados nesse estudo mostram que as gramíneas estão compensando a baixa densidade de indivíduos lenhosos na área, tal como observado em estudos realizados em áreas de pastagem (SILVA et al., 2019)

Segundo Balbinot et al. (2003), os valores de ECS tendem a ser maiores nos primeiros 25 cm de profundidade do solo, devido a lenta decomposição da serapilheira que é depositada no solo.

A presença de altos teores de alumínio no solo acarreta a toxicidade desse solo, promove a redução da atividade biológica e, consequentemente, do sequestro de carbono (ECHART; CAVALLI-MOLINA, 2001). No caso específico do tratamento T7, o teor de Al no solo é praticamente nulo e isto ocorre, pois, nas áreas desse tratamento foram realizadas práticas de calagem para preparar do solo para a introdução da agricultura, o que causa redução na quantidade de alumínio presente no solo, influenciando diretamente a saturação de Al no solo e os teores de H + Al e H + Al/CTC.

Estudos realizados por Santos et al. (2019) e Costa et al. (2020) mostram que áreas em regeneração o pH tende a aumentar com o tempo e pH neutros ajudam na estabilização do C no solo.

Segundo Oliveira et al. (2015), altos teores de Ca no solo contribuem com a retenção de C no solo, pois, o Ca favorece a redução da decomposição da MOS. O tratamento T7 apresentou maior teor Ca e Ca + Mg, além de maiores percentuais de Ca/CTC e Ca/Mg.

O Mg é um nutriente que apresenta alta correlação com a fertilidade do solo e, neste estudo, o tratamento T7 é o que apresenta maior teor de Mg, o que é justificado pelo fator das áreas desse tratamento terem sido adubadas para introdução de espécies agrícolas. Estudos realizados em áreas de Cerrado dedicados à pastagem mostraram que a degradação do solo pode afetar os teores de magnésio e, consequentemente, o ECS (SILVA et al., 2019)

Os resultados obtidos neste estudo sugerem que o ECS encontrado nas áreas de estudo se deve ao efeito do tempo de decomposição dos resíduos (serapilheira) e que existe pouca ou nenhuma relação com as características físicas e químicas do solo. Em geral, o solo tende a manter um porcentual de carbono após passar por queimadas, retendo cerca de 77% do material queimado como carvão no solo (ECKMEIER et al., 2007), o que pode explicar a similaridade entre as médias de ESC dos tratamentos.

É indicado que o manejo adequado das áreas de Cerrado deve priorizar a recuperação da matéria orgânica do solo (MOS) como estratégia para a manutenção dos estoques de carbono e a melhoria da fertilidade do solo. Segundo Lima et al. (2015), a adoção de práticas conservacionistas que aumentem a MOS pode melhorar significativamente a estrutura do solo e aumentar sua capacidade de retenção de carbono.

O tratamento mais indicado para receber esse manejo é o tratamento T7, que apresentou baixa abundância e dominância de vegetação lenhosa e alta dominância de gramíneas exóticas. Estudos demonstram que áreas degradadas com alta incidência de gramíneas invasoras podem dificultar a regeneração natural, tornando essencial a introdução de práticas de manejo ativo, como enriquecimento com espécies nativas e controle seletivo de gramíneas (SOUZA et al., 2018). Dessa forma, a implementação dessas medidas pode potencializar a regeneração natural e contribuir para o aumento do estoque de carbono no solo, auxiliando na mitigação das mudanças climáticas (LAL, 2004).

4 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados encontrados, é possível afirmar que:

- a) áreas de cerrado *sensu stricto* desmatadas e ocupadas por atividades agrícolas e pastagens, por longo prazo, e depois protegidas por cerca de 34 anos para recuperação da vegetação natural, assim como áreas desmatadas uma única vez para retirada de lenha, seja com o uso de motosserra ou trator de lâmina, e posteriormente protegidas, pelo mesmo tempo, para recuperação da vegetação original, apresentam ECS estatisticamente iguais ($p > 0,05$) ao de uma área natural de cerrado *sensu stricto*;
- b) as gramíneas exóticas estão contribuindo com o ECS do cerrado *sensu stricto* da ESECAE, que foi anteriormente ocupado por agricultura e pastagem, porém, tais gramíneas afetam a resiliência na área, competindo e impedindo o estabelecimento e regeneração de espécies lenhosas nativas;
- c) o ECS apresenta baixa correlação com as características químicas e físicas do solo.
- d) o ECS apresenta correlação alta e positiva com a MOS;

- e) em média, o ECS nas áreas estudadas, na profundidade de 20 cm do solo, foi igual a $57,32 \pm 2,73 \text{ Mg ha}^{-1}$, e, portanto, este valor está dentro do limite encontrado para a fitofisionomia cerrado *sensu stricto*.

5 REFERÊNCIAS

- ABDALA, G.; CALDAS, L.; HARIDASAN, M.; EITEN, G. Above and belowground organic matter and root:shot ratio in a Cerrado in Central Brazil. **Brazilian Journal of Ecology**, v. 2, n. 1, p. 11-23, 1998.
- ADUAN, R. E.; VILELA, M. de F.; KLINK, C. A. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres: o caso do Cerrado brasileiro**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. 30 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 105).
- ANDRADE, G. B. et al. Performance geoconômica, gases de efeito estufa e mudanças climáticas, uma análise da nova fronteira agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Avaliação**, v. 13, (2 spe), e132924. 2024. <https://doi.org/10.4322/rbaval202412029>
- BALBINOT, R. et al. Inventário do carbono orgânico em um plantio de Pinus taeda aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 5, n. 1, p. 59-68, 2003. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/scholar>. Acesso em: 24 jan. 2025.
- BONAN, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. **Science**, v. 320, n. 5882, p. 1444-1449, 2008. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704 p. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/scholar>. Acesso em: 24 jan. 2025.
- BUSTAMANTE, M. O Cerrado e as mudanças climáticas. **Ciência e Cultura**, v.76, n.3, 2024. <http://dx.doi.org/10.5935/2317-6660.20240069>
- CARNEIRO, M. A. C. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 147-157, 2009.

CASTRO, C. R. T.; PACIULLO, D. S. C. **Boas práticas para a implantação de sistemas silvipastoris**. Minas Gerais: Embrapa, 2006.

CERRI, C.C. et al. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: Emissões e remoções de dióxido de carbono pelos solos por mudanças de uso da terra e calagem**. Brasília, Ministério da Ciência e Tecnologia, 2001. 41p.

CHAVE, J. et al. Alometria de árvores e estimativa aprimorada de estoques e balanço de carbono em florestas tropicais. **Oecologia**, v. 145, p. 87–99, 2005. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/scholar>. Acesso em: 24 jan. 2025.

CHAZDON, R. L.; GUARIGUATA, M. R. Natural regeneration as a tool for large-scale forest restoration in the tropics: prospects and challenges. **Biotropica**, v. 48, n. 6, p. 716-730, 2016.

COSTA, R. C.; OLIVEIRA, S. F. Influência da vegetação nativa e das gramíneas na química do solo e no estoque de carbono no Cerrado. **Ecologia Brasileira**, v. 29, n. 1, p. 45-59, 2020.

DIAS, L. A. S.; BARROS, W. S. **Biometria Experimental**. Viçosa, MG: Suprema, 2009, 408p.

ECHART, C. L.; CAVALLI-MOLINA, S. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Ciência Rural**, v. 31, n. 3, p. 531–541, maio 2001.

ECKMEIER, E. et al. Conversion of biomass to charcoal and the carbon mass balance from a slash-and-burn experiment in a temperate deciduous forest. **The Holocene**, v. 17, n. 4, p. 539–542, 2007.

EKHOLM, T. Optimal forest rotation age under efficient climate change mitigation. **Forest Policy and Economics**, v. 62, p. 62-68, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.forepol.2015.10.007>

GAZOLLA, P. R. et al. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. Semina: **Ciências Agrárias**, v. 36, p. 693-704, 2015.

GREN, I. M.; ZELEKE, A. A. Policy design for forest carbon sequestration: a review of the literature. **Forest Policy and Economics**, v. 70, p. 128-136, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.forepol.2016.06.008>

GUARESCHI, R. F. et al. Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoques de carbono e nitrogênio e fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 909-920, 2012.

HOWLETT, D. S. et al. Soil carbon storage as influenced by tree cover in the Dehesa cork oak silvopasture of central-western Spain. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 13, n. 7, p. 1897, 2011. Disponível em: <http://xlink.rsc.org/?DOI=c1em10059a>. Acesso em: 24 jan. 2025.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Acesso em 06 de fevereiro de 2025.

https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_FullReport.pdf

KLUG, I. et al. Atributos químicos do solo em plantios florestais em substituição à vegetação nativa em campos de altitude. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 2, p. 279–290, abr. 2020.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1097396>. Acesso em: 18 fev. 2025.

LIMA, H. V. et al. Indicadores de qualidade do solo em sistemas de cultivo orgânico e convencional no semiárido cearense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1085-1098, 2007.

MACEDO, M. N. et al. Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 4, p. 1341-1346, 2017.

MAPBIOMAS. **Mapeamento inédito indica que Brasil estoca no solo o equivalente a 70 anos das emissões de CO₂ do país. 2023.** Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2023/06/21/mapeamento-inedito-indica-que-brasil-estoca-no-solo-o-equivalente-a-70-anos-das-emissoes-de-co2-do-pais>. Acesso em: 24 jan. 2025.

MARINARI, S. et al. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. **Ecological Indicators**, v. 6, n. 4, p. 701–711, 2006.

MEURER, J. E. Fatores que influenciam o crescimento e desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R.F. et al. (Eds.) **Fertilidade do solo**. p.66-86. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

NANZER, M. C. et al. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 1, p. 136-145, 2019.

NERI, S. C. M. et al. Decadal fire effects on the structure, composition, diversity, and aboveground carbon stocks of a neotropical savanna. **Forests**, v. 14, n. 2294, 2023.

NÓBREGA, R. L. B. et al. Effects of conversion of native cerrado vegetation to pasture on soil hydro-physical properties, evapotranspiration and streamflow on the Amazonian agricultural frontier. **PLoS ONE**, v. 12, n. 6, 2017. e0179414.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179414>

NOGUEIRA, E. M. et al. Altura das árvores no "arco do desmatamento" do Brasil: árvores mais baixas no sul e sudoeste da Amazônia implicam menor biomassa. **Forest Ecology and Management**, v. 255, p. 2963–2972, 2008.

OLIVEIRA, F. M. et al. **Relação do conteúdo de carbono com a porcentagem de cálcio na CTC (pH 7,0) sob sistema plantio direto de longa duração**. ResearchGate, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/321853735>. Acesso em: 24 jan. 2025.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. Anthropogenic erosion in the Southern Amazon: the role of land use and soil management. **Land Degradation & Development**, v. 29, n. 3, p. 461-472, 2018.

QUEIROZ, R. F. P. et al. Estimation of aboveground biomass stock in tropical savannas using photogrammetric imaging. **Drones**, [S. l.], v.7, n. 8, 2023. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/48681> Acesso em: 03 FEV.2025

RAIJ, B. V. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo (Boletim técnico 100)**. 285 p. Campinas: Instituto Agronômico/Fundação IAC, 1997.

REZENDE, A. V.; PAPA, D. A. Revegetação Natural de Áreas Antropizadas. In: **Águas Emendadas**. Fonseca, F. O. (Ed). Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente do Distrito Federal: Seduma, Brazil, 2008; pp. 199-206.

SALES, A. et al. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia Legal. **Colloquium Agrariae**, v. 14, n. 1, p. 1-15, 2018.

SANTOS, L. M. et al. Efeitos da regeneração natural do Cerrado sobre a dinâmica do carbono no solo e o pH em diferentes coberturas vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, n. 5, p. 120-133, 2019.

SCHOLES, R.J., ARCHER, S.R. Tree-grass interactions in savannas. **Ann. Rev. Ecol. Syst.**, v. 28, n. 1, p. 517–544, 1997. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.517>

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 275-374.

SILVA, R. G. et al. **Atributos químicos e variação no estoque de carbono em solos de Cerrado sob pastagem**. *ResearchGate*, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/385357683>.

SILVA JÚNIOR, M. L. et al. Carbon content in Amazonian Oxisols after forest conversion to pasture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1603-1611, 2009.

SMITH, P. et al. Global change pressures on soils from land use and management. **Global Change Biology**, v. 23, n. 3, p. 955-965, 2017.

SOUZA, R. F. et al. Influência da matéria orgânica do solo na retenção de carbono em ecossistemas tropicais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 5, p. 489-497, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-70542018425016818>. Acesso em: 18 fev. 2025.

STRASSBURG, B. B. N. et al. Impacts of incentives to reduce emissions from deforestation on global species extinctions. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 5, p. 350-355, 2016.

TORMENA, C. A. et al. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira**

de Ciência do Solo, v. 28, p. 1023-1031, 2004. Disponível em:
<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v28n6/22924.pdf>.

ZAR, J. H. **Biostatistical Analysis**. 4⁰ Ed. Upper Saddle River – NJ: Prentice Hall, 1999.