



**COMPACTAÇÃO E ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO EM  
SISTEMAS SILVIPASTORIS NO CERRADO SENTIDO RESTRITO**

**JÉSSICA CHAMUSCA ALVES DIAS**

**DISSERTAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA-UnB**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**COMPACTAÇÃO E ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO EM  
SISTEMAS SILVIPASTORIS NO CERRADO SENTIDO RESTRITO**

**JÉSSICA CHAMUSCA ALVES DIAS**

**ORIENTADOR: ALDICIR SCARIOT  
COORIENTADOR: ALCIDES GATTO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS  
FLORESTAIS**

**PUBLICAÇÃO:**

**BRASÍLIA / DF: 03 / 2024**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**COMPACTAÇÃO E ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO EM SISTEMAS  
SILVIPASTORIS NO CERRADO SENTIDO RESTRITO**

**JÉSSICA CHAMUSCA ALVES DIAS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Dr. ALDICIR SCARIOT, (Pesquisador EMBRAPA  
Cenargen)  
(ORIENTADOR)**

---

**Prof. Dr. ALCIDES GATTO, (Departamento de Engenharia Florestal EFL/UnB)  
(COORIENTADOR)**

---

**Prof. Dr. ERALDO MATRICARDI, (Departamento de Engenharia Florestal EFL/UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**Prof. Dr. CARLOS ELETO, (Departamento de Engenharia Florestal UFV)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 11 DE MARÇO DE 2024.**

# FICHA CATALOGRÁFICA

DIAS, JÉSSICA CHAMUSCA ALVES

Compactação e estoque de Carbono no solo em sistemas silvipastoris no cerrado sentido restrito [Distrito Federal] 2024

xii, 45 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Ciências Florestais, 2024)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

- |                            |                            |
|----------------------------|----------------------------|
| 1. Conservação da natureza | 2. Restauração da natureza |
| 3. Cerrado                 | 4. Sistema silvo pastoril  |
| I. ENC/FT/UnB              |                            |

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Jéssica Chamusca Alves Dias

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Compactação e estoque de Carbono no solo em sistemas silvipastoris no cerrado sentido restrito.

GRAU / ANO: Mestre / 2024

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir a dissertação de mestrado e para emprestar ou vender somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Jéssica Chamusca Alves Dias  
jessicachamusca@hotmail.com  
Brasília/DF - Brasil

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores e técnicos responsáveis dos laboratórios de Fertilidade do Solo/Matéria Orgânica do Solo/Biochar; Solos de ecossistemas florestais/EFL e Fisiologia Vegetal de Solos Florestais, UnB, por permitirem o uso dos equipamentos e auxiliarem nas análises laboratoriais, em especial ao Prof. Dr. Alcides Gatto/EFL-UnB.

A Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF) e Fundação Arthur Bernardes (FUNARBE) por financiar a bolsa científica de mestrado, insumos para campo e análises de laboratório.

## RESUMO

Foram estudadas a compactação do solo e o estoque de carbono orgânico (C-org) nos solos de sistemas silvipastoris (SP) e Cerrado não perturbado. Os três sistemas de uso da terra estudados eram (1) SP submetido a 15 dias de pastoreio de bovinos adultos a cada três meses; (2) SP com o mesmo regime de 15 dias de pastoreio de bovinos adultos a cada três meses, mas que está em pousio há dois anos e meio; e (3) Cerrado sentido restrito, não pastoreado. Foram analisadas a densidade aparente, porosidade, umidade e teor de C-org em amostras de solo coletadas a intervalos de 20 centímetros, até um metro de profundidade. O teor de C-org também foi analisado nos resíduos orgânicos sobre o solo. Os resultados indicam um aumento de 18% na densidade do solo na profundidade de 0 a 20 cm na área de SP contínuo, comparado ao Cerrado nativo não pastoreado, indicando aumento de compactação do solo nesta camada. Não há diferenças significativas no teor e estoque de C-org até um metro de profundidade nos sistemas silvipastoris e Cerrado. Os estoques de C-org na camada de 20 a 40 cm do solo e na camada de resíduos orgânicos foram significativamente diferentes entre os usos da terra. Os resultados indicam que em SP pode ocorrer compactação do solo, mas que após o pousio o nível de compactação pode ser reduzido, e que os teores e estoques de carbono em solos de sistemas silvipastoris não diferem significativamente do Cerrado sentido restrito não perturbado.

### Palavras-chave

Serviços ecossistêmicos; Processos ecossistêmicos; Savana brasileira.

## **ABSTRACT**

Soil compaction and organic carbon stock (C-org) were studied in the soils of silvipastoral systems (SP) and undisturbed Cerrado. The three land use systems studied were (1) SP subjected to 15 days of grazing by adult cattle every three months; (2) SP with the same regime of 15 days of grazing by adult cattle every three months, but which has been fallow for two and a half years; and (3) Cerrado sentido restrito, not grazed. Bulk density, porosity, moisture and C-org content were analyzed in soil samples collected at 20 centimeters intervals, up to one meter deep. The C-org content was also analyzed in the organic residues on the soil. The results indicate an 18% increase in soil density in the 0 to 20 cm depth in the continuous SP area, compared to the ungrazed native Cerrado, indicating increased soil compaction in this layer. There were no significant differences in the content and stock of C-org up to one meter deep in the silvipastoral and Cerrado systems. C-org stocks in the 20 to 40 cm soil layer and in the organic residue layer were significantly different between land uses. The results indicate that soil compaction can occur in SP, but that after fallow the level of compaction can be reduced, and that the carbon contents and stocks in soils from silvipastoral systems do not differ significantly from undisturbed Cerrado sentido restrito.

Key-words:

Ecosystem services; Soil compaction; Brazilian Savana.

# ÍNDICE

<b>Capítulo 1</b>	<b>Página</b>
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	3
2. MATERIAIS E MÉTODOS	4
2.1. ÁREA DE ESTUDO	4
2.2. AMOSTRAGENS E ANÁLISES DE SOLO	6
2.3. AMOSTRAGEM E ANÁLISE DE RESÍDUOS ORGÂNICOS	8
2.4. ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO	9
2.5. ANÁLISES ESTATÍSTICAS	9
3. RESULTADOS	10
3.1. COMPACTAÇÃO DO SOLO	10
3.2. TEOR E ESTOQUE DE C-ORG	14
4. DISCUSSÃO	19
4.1. OS SOLOS DOS SISTEMAS SILVOPASTORIS ESTÃO MAIS COMPACTADOS QUE OS DO CERRADO NATIVO.	19
4.2. O CERRADO NATIVO NÃO POSSUI MAIOR ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO QUE OS SISTEMAS SILVIPASTORIS.	22
5. CONCLUSÃO	24
REFERÊNCIAS	25

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 1.1: Dados resumidos do levantamento florístico (ABREU, I.S., 2024).	5
Tabela 1.2: Valores médios dos parâmetros físicos do solo.	10
Tabela 1.3: Resultados estatísticos das análises de variância dos parâmetros físicos do solo.	11
Tabela 1.4: Valores de correlação para os dados pela análise de variância.	12
Tabela 1.5: Valores de textura e classificação do solo por coleta e por profundidade.	14
Tabela 1.6: Médias e desvios padrões do estoque e teores de C-org.	15
Tabela 1.7: Valores de análise de variância pelo Teste ANOVA.	16
Tabela 1.8: Valores de correlação para os dados pela análise de variância.	16

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1.1: Mapa de localização da Fazenda Sucupira/DF.	5
Figura 1.2: Coleta de solos.	6
Figura 1.3: Processo de preparação das amostras para a análise de C-org.	8
Figura 1.4: Boxplots dos parâmetros físicos do solo.	13
Figura 1.5: Teores de C-org e dos estoques de C-org.	17
Figura 1.6: Estoques de C-org por camada de profundidade nos sistemas de uso da terra.	18
Figura 1.7: Ilustração com resumo dos resultados.	21

# 1. INTRODUÇÃO

O Cerrado é a maior e mais diversa savana do mundo, e que vem sendo rapidamente convertida em pastagens e agricultura impactando nos seus estoques de Carbono (DE CARVALHO et al., 2023) e a qualidade do solo (NGOLO et al., 2019). A expansão das atividades agropecuárias resultou na perda de aproximadamente 50% da vegetação nativa do Cerrado, e 26% do bioma atualmente é ocupado com a pecuária (Mapbiomas, 2022). Os campos e savanas do Cerrado têm potencial para uso do solo como pastagem, o que coloca a pecuária no bioma Cerrado como responsável por 34% do contingente bovino nacional (DO CARMO FASIABEN et al., 2023).

A mudança no uso do solo da vegetação nativa para pastagens pode impactar os atributos do solo, incluindo indiretamente a densidade do solo (SILVEIRA SARTORI SILVA et al., 2019), como também o aquecimento global por meio da emissão de gases do efeito estufa (GEE). Dessa forma, uma abordagem realista para solução da situação de degradação atual seria a adoção de sistemas ecologicamente intensificados com uso mais sustentável do solo, como os sistemas silvipastoris (SP). Sistemas silvipastoris têm sido estimulados na última década no Brasil, pois tendem a agregar em produção de madeira, diminuição da emissão de GEE e não reduzem a produtividade do gado (ALMEIDA et al., 2020)..

Os SP podem ser considerados sistemas de pastagem intensiva sustentáveis, os quais podem produzir mais em uma mesma área e concomitantemente reduzir os impactos ambientais negativos e aumentar o capital natural e o fluxo de serviços ecossistêmicos (Tittonell 2014). Árvores em sistemas silvipastoris propiciam alguns serviços ecossistêmicos como estabilização do microclima, melhora da fertilidade e água do solo, aumento da qualidade e diversidade de alimentos para o gado, captura de carbono, melhoria no bem-estar e produtividade do gado (BRUZIGUESSI et al., 2021). Além disso, as espécies arbóreas do Cerrado também produtos de uso alimentício e terapêutico medicinal para o homem, como *Qualea grandiflora* (pau-terra), *Caryocar brasiliense* (Pequi), *Byrsonima crassifolia* (Murici) e *Stryphnodendron adstringes* (Barbatimão) (PAIVA et al., 2021).

Os serviços ecossistêmicos que determinado uso do solo pode disponibilizar, como captura de carbono, por exemplo dependem da qualidade do solo. A qualidade do solo é a capacidade do solo para desempenhar múltiplas funções e compreende aspectos inerentes do

solo (clima, topografia, material de origem e tempo) e aspectos dinâmicos do solo, e podem mudar de acordo com o uso e o manejo do solo (BONGIORNO, 2020). Essa influência é caracterizada por processos químicos, físicos e biológicos do solo, que estão atrelados a processos ecossistêmicos (EcoP) do solo, por exemplo o de fertilidade do solo. Uma maior diversidade de plantas nas pastagens promove aumento da qualidade química e biológica do solo, principalmente na sua fertilidade (Teixeira et al., 2021).

Ao identificar características do solo que contribuam para determinado EcoP pode-se detectar o que afeta a qualidade desse ecossistema, uma estratégia que pode facilitar a mudança de sistemas intensivos degradantes a SP com uso mais sustentável do solo. Um exemplo de sistemas degradantes são as pastagens convencionais, nas quais a compactação do solo pode reduzir a porosidade total e aumentar a densidade aparente. Solos compactados reduzem a infiltração água da solo (PULIDO-MONCADA; MUNKHOLM, 2019), o que pode reduzir o crescimento radicular (FERREIRA et al., 2023). A escassez de água no solo limita ainda mais o vigor e o rendimento da vegetação, particularmente em regiões áridas e semiáridas (YANG et al., 2021). Portanto, variáveis como a umidade no solo, densidade aparente, porosidade total, macro porosidade, textura, e teor de Carbono orgânico podem informar sobre a qualidade física do solo (AJAYI et al., 2021).

Os estudos dos EcoP têm se concentrado em sistemas silvipastoris plantados, por exemplo o de integração-lavoura-pecuária-floresta (ILPF), que usam a *Eucalyptus* spp no componente florestal do sistema, e mostram um aumento do estoque de Carbono nesses sistemas (DE ABREU et al., 2020). O ILPF tem adoção mais restrita do que o SP nativo, pois demandam alto investimento inicial, pouco acessível aos pequenos produtores. Ao contrário, os SP nativos são mais acessíveis aos agricultores, e a manutenção de espécies de plantas nativas do Cerrado é parte fundamental para os de meios de vida das populações rurais, contribuindo para a renda familiar, a segurança alimentar, e fornecimento de produtos florestais não madeireiros (e.g., frutos, fibras, óleos etc), além da conservação da biodiversidade.

Portando, entender o impacto dos sistemas silvo pastoris com as plantas nativas do Cerrado é primeiro e fundamental passo para desenvolver estratégias que contribuam para a manutenção desses sistemas. Neste estudo foram avaliados o teor e o estoque de C-org no solo e nos resíduos orgânicos e a compactação do solo em sistemas silvipastoris no cerrado nativo sentido restrito com diferentes intensidades de uso, no Brasil Central.

## **1.1. OBJETIVOS**

Avaliar os impactos no solo decorrentes da implantação de SP em ambiente de vegetação nativa cerrado sentido restrito. Para isso, os objetivos específicos são:

- (1) estimar e analisar a compactação no solo em sistemas silvipastoris no cerrado, e
- (2) estimar e analisar o estoque de Carbono orgânico no solo e nos resíduos orgânicos em sistemas silvipastoris no cerrado.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi conduzida em áreas de cerrado nativo sentido restrito e de sistemas silvipastoris (SP), localizadas dentro da Fazenda Sucupira, da Embrapa (Empresa brasileira de pesquisa agropecuária), no Distrito Federal, Brasil. A fazenda tem 1423 hectares (15°54'56" S, 48°01'26" W), em terreno plano a levemente declivoso, solo Latossolo Vermelho distrófico, e altitude média de 1.100 m. O clima é Aw (savana tropical), sensu Koppen, com precipitação anual média de 1.444 mm, temperatura média de 21,9 °C, estações seca, de abril a outubro, e chuvosa, final de outubro ameados de abril (WALTER, B. M. T.; FONTES, C. G.; PEREIRA, J. B., 2007). Ela é usada para manutenção in vivo de germoplasma de raças animais domesticadas (bovinos e caprinos).

Neste estudo foram utilizados três sistemas de uso da terra: sistema silvipastoril contínuo (CSP), o sistema silvipastoril em pousio (fallow) de 2,5 anos (FSP) e o cerrado nativo não perturbado (NC) (Figura 1.1). Os três usos da terra ocorrem (NC) ou ocorriam (FSP) em áreas originalmente cobertas por vegetação nativa de cerrado sentido restrito, sem qualquer manejo. Na NC (93 ha) não houve pastoreio nos últimos 30 anos, nem corte da madeira há 22 anos, e representa a área controle. As áreas CSP (66 ha) e FSP (109 ha) sempre tiveram pastoreio esporádico desde a implantação da fazenda, há 30 anos. Com isolamento das áreas por cercas há 10 anos, o pastoreio com 120-140 (1,8-2,1 unidades animais/ha) bovinos adultos da subespécie zebuína (*Bos taurus indicus*) passou a ser feito por cerca de 15 dias a cada três meses, em ambas as áreas, CSP e FSP. A CSP continua com esse regime de pastoreio, considerado baixo (< 2,5 UA/ha) (CARVALHO et al., 2021; ECHEVERRIA, 2020), enquanto a área FSP entrou em pousio há dois anos e seis meses.

Apesar de os incêndios serem uma ocorrência comum na vegetação do Cerrado, a fazenda em questão tem permanecido livre de tais incidentes desde 2011. Contudo, é importante observar que as áreas amostradas dentro da fazenda não foram afetadas por incêndios desde a década de 90 (ABREU, I.S., 2024).

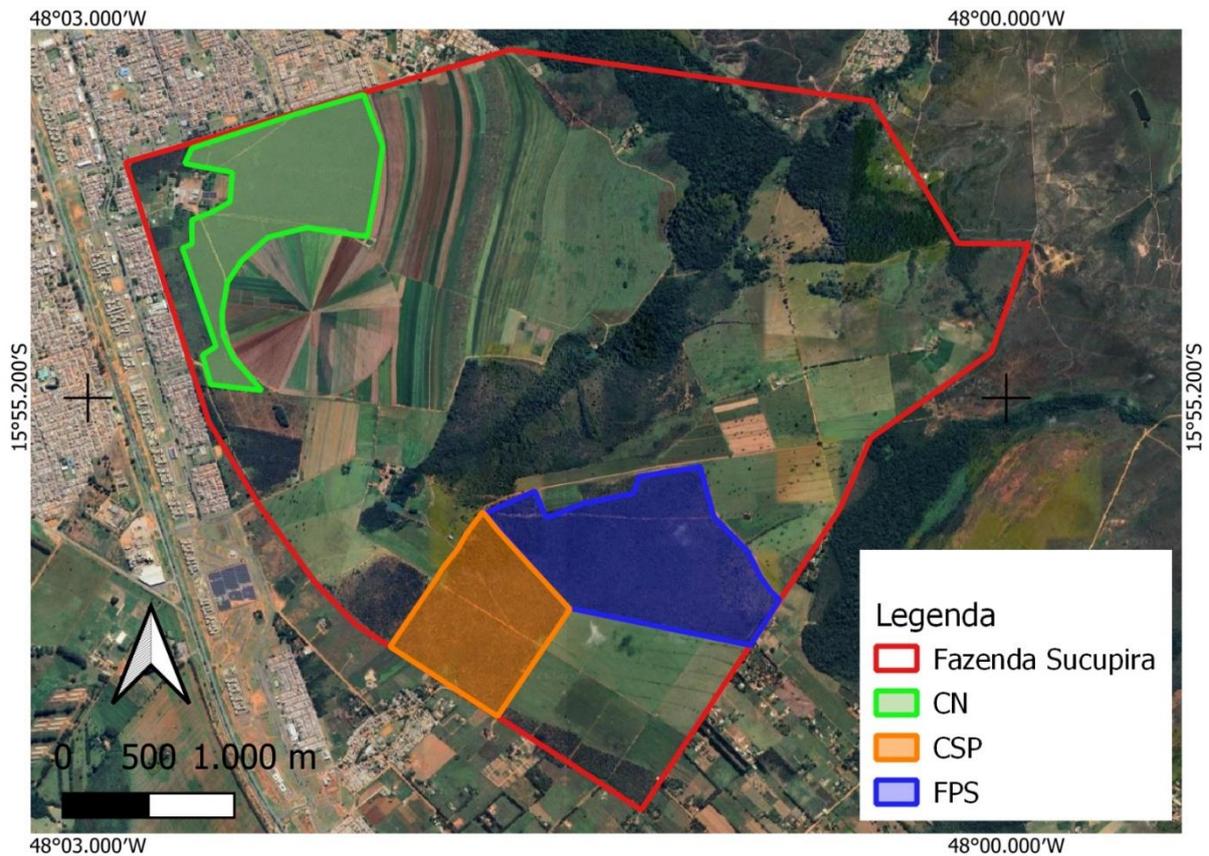


Figura 1.1: Mapa de localização da Fazenda Sucupira/DF.

O levantamento florístico das áreas foi realizado em 10 transectos lineares de 25 metros em cada sistema, em março de 2023, no fim da época chuvosa. Cada transecto foi determinado aleatoriamente (ABREU, I.S., 2024). A cobertura do solo pela copa de árvores no CSP é 31%, no FPS é 25% e no NC, 49%. A cobertura do solo por arbustos é 23%, 42% e 58%, e de graminóides de 59%, 96% e 85%, respectivamente. A altura média da vegetação é 2,47 (CSP), 1,77 (FPS) e 1,99 metros (NC).

Tabela 1.1: Dados resumidos do levantamento florístico (ABREU, I.S., 2024). As letras diferentes simbolizam diferenças significativas, e vice-versa.

Dados/Sistemas	CSP	FSP	NC
Cobertura por árvores (%)	31 b	25 b	49 a
Cobertura por arbustos (%)	23 c	42 b	58 a
Cobertura por graminóides (%)	59 b	96 a	85 a
Biomassa de graminóides (Mg/ha)	0,4 a	1,3 b	0,5 a
Densidade arbórea (nº indivíduos)	507	741	581
Densidade de arbustos (nº indivíduos)	137	534	305
Densidade de graminóides (nº indivíduos)	329	967	465

## 2.2. AMOSTRAGENS E ANÁLISES DE SOLO

A coleta de amostras de solos foi realizada no período seco em dez trincheiras de 50x50 centímetros em cada sistema de uso da terra. Em três trincheiras foram coletadas cinco amostras indeformadas a intervalos de 20 cm, até a profundidade de um metro (0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 cm), totalizando 15 amostras por uso da terra. O mesmo procedimento foi realizado nas demais sete trincheiras, até a profundidade de 60 centímetros, totalizando mais 21 amostras por uso da terra. As amostras indeformadas foram obtidas com auxílio de anéis volumétricos de metal (core Method) (GATEA et al., 2018) de 75,48 cm<sup>3</sup>, inseridos horizontalmente na parede da trincheira, nas profundidades médias das classes de profundidades amostradas (Figura 1.2). Após a retirada dos anéis da parede da trincheira, o solo foi imediatamente removido e armazenado em cápsulas de alumínio seladas para posterior análise em laboratório.



Figura 1.2: Coleta de solos. Retirada das amostras de solo dentro da trincheira com os anéis volumétricos (A), e amostra indeformada logo após ser retirada do solo (B).

No laboratório, procedeu-se a pesagem das amostras indeformadas de solos para obtenção do peso úmido (PU), após foram acondicionadas em estufa de circulação forçada de ar a 105 °C até obter o peso constante, as quais, em seguida foram pesadas novamente para obtenção do peso seco (PS). Em seguida, determinou-se a densidade do solo (g/cm<sup>3</sup>) (Equação 1.1), umidade volumétrica (%) (Equação 1.2), macroporosidade (%) (Equação 1.3) e porosidade total (%) (Equação 1.4).

*Equação 1.1:  $D_s = M/V$*

em que:  $D_s$  é a densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ ),  $M$  é a massa da amostra seca (g) e  $V$  o volume do cilindro ( $\text{cm}^3$ ).

*Equação 1.2:  $U = (P_u - P_s)$*

em que:  $U$  é a umidade (%),  $P_u$  é a massa da amostra úmida (g) e  $P_s$  é a massa da amostra seca (g).

*Equação 1.3:  $MP = P_t - U$*

em que:  $MP$  é a macroporosidade (%),  $P_t$  é a porosidade total (%) e  $U$  é a Umidade (%).

*Equação 1.4:  $P_t = (D_p - D_s)/D_p$*

em que:  $D_s$  é a densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) e  $D_p$  é a densidade das partículas ( $\text{g/cm}^3$ ), considerada como um valor fixo de  $2,65 \text{ g/cm}^3$  (PEREIRA et al., 2019) para as condições de solos brasileiros.

Foram coletadas amostras deformadas nas mesmas profundidades descritas anteriormente em cada uma das 10 trincheiras para a realização das análises químicas de C-org e de textura. As análises do teor de C-org no solo foram realizadas utilizando o método de combustão seca (CHNS/O) no analisador elementar CHNS (Elemental Analyzer of the Macro Vario Cube-Elementary). As amostras foram secas ao ar até obter peso constante, e então foram maceradas em almofariz e peneiradas (malha de 0,150 mm). Em seguida, 1,0 mg de solo foi selado em cápsulas de estanho (Figura 1.3). Em temperatura aproximada de  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , as amostras foram colocadas para combustão, e todo o C-org no solo foi convertido em  $\text{CO}_2$ , o teor de C-org da amostra.



Figura 1.3: Processo de preparação das amostras para a análise de C-org. Amostra antes de ser triturada e passada pela peneira (A), e pesagem de 1,0 mg da amostra e encapsulamento com pinças (B).

As análises texturais foram realizadas no laboratório Soloquímica, Brasília/DF em três amostras deformadas de cada profundidade até um metro, e analisados os teores de argila, silte e areia. A classificação da textura do solo foi identificada pelo diagrama do triângulo textural com base na proporção dos três componentes principais: areia, silte e argila. Cada vértice do triângulo representa um desses componentes e as proporções são expressas como porcentagens em relação ao todo, e uma vez que as proporções tenham sido plotadas no triângulo textural, a classe do solo pode ser determinada observando-se em qual região do triângulo os valores se encaixam (ED. LIER, Q. J. V., 2010).

### **2.3.AMOSTRAGEM E ANÁLISE DE RESÍDUOS ORGÂNICOS**

A coleta dos resíduos orgânicos foi procedida em dois pontos, próximos de cada trincheira de coleta de solos, totalizando 20 pontos por sistema de uso da terra. Foi utilizado um quadrado metálico, com área de 0,25 m<sup>2</sup> (0,5 m x 0,5 m), que foi lançado, e toda a matéria orgânica seca da superfície do solo delimitada pelo quadrado foi coletada, incluindo a parte seca área das gramíneas, ciperáceas e serapilheira. A coleta foi realizada no final da estação secas, em agosto e setembro de 2023, quando a parte aérea das gramíneas e ciperáceas estava seca.

As amostras foram armazenadas em sacos de papel, pesadas individualmente e colocadas para secar em estufa de ventilação forçada de ar a 105 °C. Quando as amostras atingiram o

peso seco estável, subamostras foram trituradas, e 100 mg destas usadas para obter o Carbono total pelo método de combustão seca (CHNS/O) em um analisador elementar CHNS (Elemental Analyzer of the Macro Vario Cube-Elementary, LECO).

## 2.4. ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO

O estoque de carbono no solo em cada profundidade foi calculado com os resultados de densidade e teor de C-org (%) do solo (Equação 1.5). Para o cálculo do estoque de C-org dos resíduos orgânicos (RO) converteu-se o peso seco do RO para peso seco por área (Equação 6). Ao convertê-lo para peso seco por área, padroniza-se as medições para que seja possível comparar facilmente o estoque de C-org em diferentes sistemas de terra, e ter uma compreensão mais clara da distribuição espacial do C-org na área. Para calcular o estoque de C-org até um metro de profundidade foram somadas as médias das contribuições de cada camada individualmente.

$$\text{Equação 1.5: } \text{Estoque C-org} = \sum [C\text{-org } h_i * D_{shi} * (h_i - h_{(i-1)}) / 10]$$

em que: Estoque C-org = estoque de C-org no solo até um metro de profundidade (Mg C-org ha<sup>-1</sup>), C-org = teor de C-org em dada profundidade (g.kg<sup>-1</sup>), D<sub>s</sub> = densidade do solo em dada profundidade (kg dm<sup>-3</sup>) e h profundidade (cm) (VELDKAMP, 1994).

$$\text{Equação 6: } \text{Estoque C-org RO} = P_s MS \times TC MS \times 0,01$$

em que: Estoque C-org RO é o estoque de C-org da RO (Mg C-org/ha), MS é o peso seco do RO (g/m<sup>2</sup>) e TC MS é o teor de C-org do RO (%). O fator de multiplicação 0,01 é utilizado para transformar da unidade gC/m<sup>2</sup> para MgC/ha.

## 2.5. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados foram submetidos às análises estatísticas de correlação, normalidade e homogeneidade de variância. Foi utilizado o teste de normalidade Shapiro-Wilk, seguido por teste de Bartlett de homogeneidade das variâncias. Dados com distribuição normal e homogênea foram analisados com anova (análise de variância), com uso da terra como fator principal, e

quando a Anova foi significativa ( $p < 0,05$ ), foi utilizado o teste de Tukey para identificar possíveis diferenças significativas entre os usos da terra.

Para os dados de resíduos orgânicos, que não demonstraram distribuição homogênea das variâncias, foi utilizado o teste de Games-Howel, que não assume igualdade de variâncias, portanto útil para comparações múltiplas quando as variâncias são heterogêneas (BRETZ; HOTHORN; WESTFALL, 2016).

As análises estatísticas e os gráficos foram realizados no ambiente R, com os pacotes “dplyr”, “tidyverse”, “ggplot2”, “vegan”, dentro outros. O script pode ser acessado através do link: [https://github.com/jelchamusca/Mestrado\\_Jessica\\_Dias.git](https://github.com/jelchamusca/Mestrado_Jessica_Dias.git), nos arquivos “carbonstockV1.R” e “compacV1.R”.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. COMPACTAÇÃO DO SOLO

Os valores médios de densidade aparente (Ds) foram  $0,88 \text{ g/cm}^3$  ( $0,67 - 1,03 \text{ g/cm}^3$ ) em NC,  $0,91 \text{ g/cm}^3$  ( $0,73 - 1,15 \text{ g/cm}^3$ ) em FSP, e  $0,91 \text{ g/cm}^3$  ( $0,79 - 1,14 \text{ g/cm}^3$ ) em CSP. A porosidade total (Pt) média foi 66,97% (61,03 - 74,82%), em NC, de 65,74% (56,6 - 72,61 %) em FSP e de 56,55% (57,06 - 70,21%) em CSP. Os valores médios da umidade (U) no solo foram 25%, 27% e 22%, e da macroporosidade (MP) 40.7%, 38.5% e 45%, para CSP, FSP e NC, respectivamente (Tabela 1.2).

Tabela 1.2: Valores médios dos parâmetros físicos do solo em diferentes profundidades e sistemas amostrados.

Área	Prof. (cm)	Ds ( $\text{g/cm}^3$ )	Pt (%)	Mp (%)	U (%)
NC	0-20	0,81	69,5	48,0	21,0
	20-40	0,88	66,9	45,0	22,0
	40-60	0,91	65,6	42,0	23,0
	60-80	0,91	65,7	44,0	21,0
	80-100	0,94	64,3	42,0	21,0
CSP	0-20	0,96	63,9	39,0	24,0
	20-40	0,91	65,5	40,0	25,0
	40-60	0,90	66,1	41,0	25,0
	60-80	0,87	67,0	41,0	26,0
	80-100	0,89	66,7	41,0	26,0
FSP	0-20	0,90	66,2	41,0	25,0
	20-40	0,88	67,0	41,0	26,0
	40-60	0,94	64,9	37,0	28,0
	60-80	0,89	66,3	38,0	28,0
	80-100	1,05	60,3	26,0	35,0

A macroporosidade na primeira camada do solo do NC foi maior que nos outros sistemas, enquanto na profundidade 80 a 100 centímetros houve significativamente menor macroporosidade em FSP que nos outros sistemas. Diferenças significativas de densidade e porosidade ocorreram somente na camada mais superficial do solo, e apenas entre NC e CSP. Os valores de densidade aparente e porosidade indicam tendências inversas, pois são colineares. Portanto, a compactação é maior somente na primeira camada do solo em CSP que em NC. A umidade variou igualmente na segunda e terceira camada: CN menor do que FSP, e na quarta e quinta camada, CN menor do que FSP e CSP (Tabela 1.3 e Tabela 1.4).

Tabela 1.3: Resultados estatísticos das análises de variância dos parâmetros físicos do solo.

Data	Df	Sum sq	Mean sq	Fvalue	Pr(>F)
Densidade 0-20	2	0,11	0,05497	5,918	0,00739 **
Resíduos	27	0,2508	0,00929		
Densidade 20-40	2	0,00865	0,004323	0,909	0,415
Resíduos	27	0,12845	0,004757		
Densidade 40-60	2	0,00395	0,001973	0,287	0,753
Resíduos	27	0,1856	0,006874		
Densidade 60-80	2	0,002422	0,001211	0,341	0,724
Resíduos	6	0,021333	0,003556		
Densidade 80-100	2	0,004389	0,021944	4,702	0,0591
Resíduos	6	0,028	0,004667		
Porosidade 0-20	2	0,01563	0,007814	5,921	0,000738 **
Resíduos	27	0,03563	0,001320		
Porosidade 20-40	2	0,001132	0,000566	0,832	0,446
Resíduos	27	0,018361	0,000680		
Porosidade 40-60	2	0,000496	0,0002482	0,258	0,774
Resíduos	27	0,025952	0,0009612		
Porosidade 60-80	2	0,0002667	0,0001333	0,316	0,741
Resíduos	6	0,0025333	0,000422		
Porosidade 80-100	2	0,006174	0,0030872	4,548	0,0628 .
Resíduos	6	0,0004073	0,0006788		
Macroporosidade 0-20	2	0,04114	0,020569	5,561	0,0095 **
Resíduos	27	0,03563	0,003699		
Macroporosidade 20-40	2	0,01165	0,005827	2,318	0,118
Resíduos	27	0,06788	0,002514		
Macroporosidade 40-60	2	0,01508	0,007539	2,284	0,121
Resíduos	27	0,08912	0,003301		
Macroporosidade 60-80	2	0,006538	0,003269	1,69	0,262
Resíduos	6	0,011603	0,001934		
Macroporosidade 80-100	2	0,05192	0,025959	13,3	0,00624 **
Resíduos	6	0,01171	0,001952		
Umidade 20-40	2	0,01206	0,006031	3,67	0,0389 *
Resíduos	27	0,04437	0,001643		
Umidade 40-60	2	0,01181	0,005903	4,452	0,0213 *
Resíduos	27	0,03580	0,001326		
Umidade 60-80	2	0,012709	0,006355	11,57	0,00873 **
Resíduos	6	0,003296	0,00549		
Umidade 80-100	2	0,013329	0,006664	13,48	0,00603 **
Resíduos	6	0,002967	0,000494		

Os dados de umidade na profundidade de 0 a 20 centímetros se mostraram não homogêneos, apesar de serem normais. Por este motivo não foi realizada a análise de variância pelo teste ANOVA e de correlação pelo teste de Tukey, utilizou-se o teste de correlação de Games-Howell (Tabela 1.4).

Tabela 1.4: Valores de correlação para os dados que foram significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ) pela análise de variância.

Teste de correlação de Tukey						
	Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Densidade prof. 0 – 20 cm	NC – CSP	-0,148	0,431	27	-3,434	0,0053
	NC – FSP	-0,82	0,431	27	-1,903	0,1574
	CSP – FSP	0,066	0,431	27	1,531	0,2926
Porosidade prof. 0 – 20 cm	NC – CSP	0,0558	0,0162	27	3,437	0,0053
	NC – FSP	0,0304	0,0162	27	1,873	0,1659
	CSP – FSP	-0,0254	0,0162	27	-1,564	0,2784
Macroporosidade prof. 0 – 20 cm	NC – CSP	-0,0838	0,0272	27	-3,080	0,0127
	NC – FSP	-0,0720	0,0272	27	-2,648	0,0345
	CSP – FSP	-0,0117	0,0272	27	-0,431	0,9029
Macroporosidade prof. 80 – 100 cm	NC – CSP	-0,022	0,0361	6	-0,611	0,8198
	NC – FSP	-0,0171	0,0361	6	-4,74	0,0076
	CSP – FSP	0,149	0,0361	6	4,129	0,0145
Umidade prof. 20 – 40 cm	CSP – FSP	-0,0253	0,0181	27	-1,397	0,3564
	NC – CSP	0,0238	0,0181	27	1,312	0,4011
	NC – FSP	0,0491	0,0181	27	2,709	0,0301
Umidade prof. 40 – 60 cm	CSP – FSP	-0,0919	0,0581	27	-1,584	0,2698
	NC – CSP	0,0870	0,0581	27	1,499	0,3071
	NC – FSP	0,1790	0,0581	27	3,083	0,0126
Umidade prof. 60 – 80 cm	CSP – FSP	-0,0180	0,0191	6	-0,939	0,6380
	NC – CSP	0,0692	0,0191	6	3,616	0,0259
	NC – FSP	0,0872	0,0191	6	4,55	0,0092
Umidade prof. 80 – 100 cm	CSP – FSP	-0,0361	0,0182	6	-1,990	0,1953
	NC – CSP	0,0573	0,0182	6	3,158	0,0448
	NC – FSP	0,0935	0,0182	6	5,148	0,0051
Teste de correlação de Games-Howell						
	Contrast	estimate	Conf.	Conf.	p.adj	
Umidade prof. 0-20 cm	NC-CSP	0,0121	-0,0460	0,0702	0,848	
	NC-FSP	-0,0207	-0,0782	0,0369	0,618	
	CSP-FSP	0,0327	0,00018	0,0653	0,049	*

A Figura 1.4 mostra as diferenças significativas na mesma profundidade de solo ( $p \leq 0,05$ ) indicadas por letras diferentes. A caixa central representa o primeiro quartil e o terceiro quartil, a linha horizontal central a mediana, e as linhas verticais fornecem a dispersão dos dados fora da caixa central.

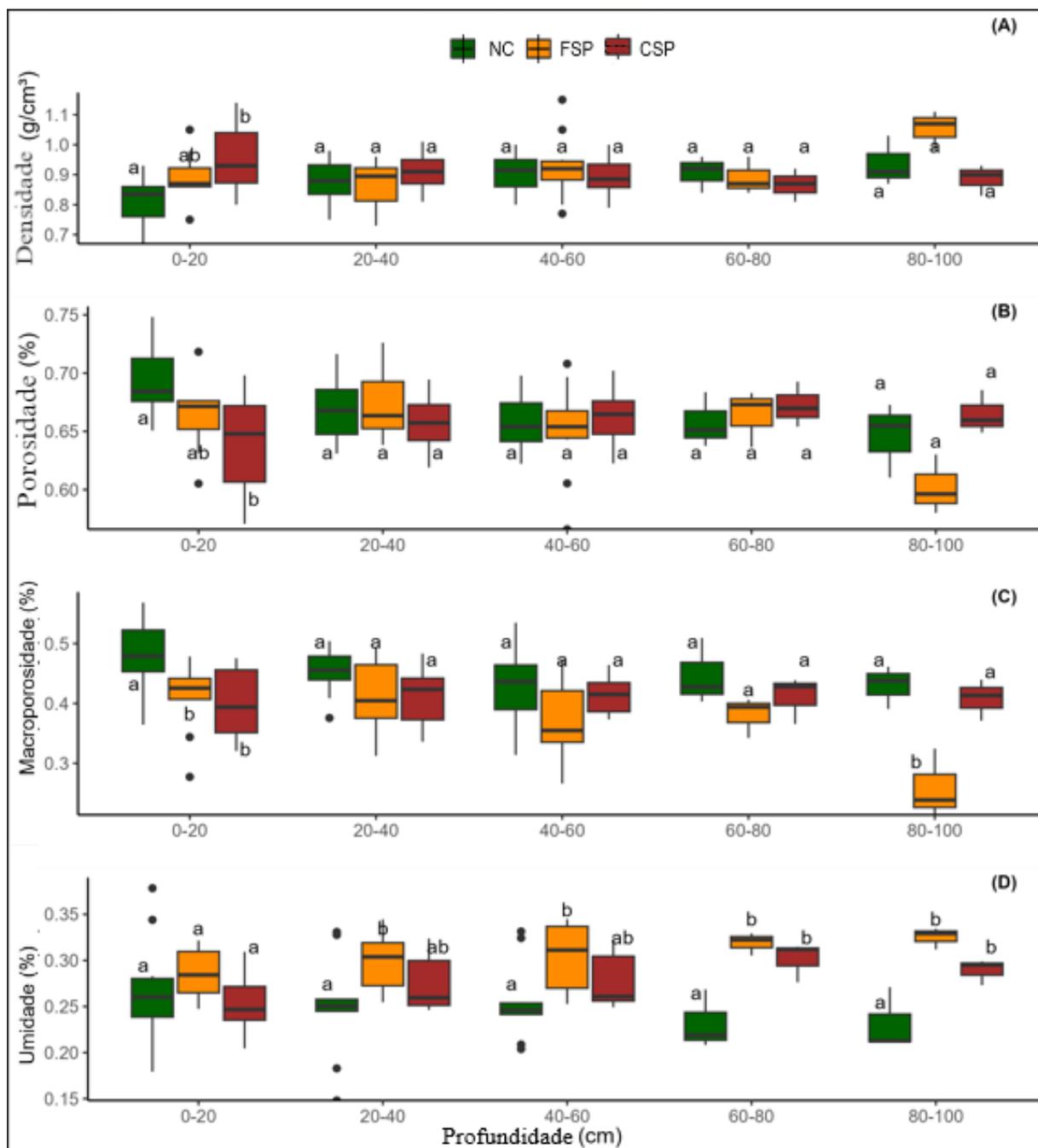


Figura 1.4: Boxplots da densidade aparente (A), da porosidade total (B), macroporosidade (C) e umidade (D) nas profundidades de 0 a 100 centímetros do solo. Sendo CSP - Silvipastoril Contínuo, NC - Cerrado não perturbado e FSP - Silvipastoril em pousio.

De acordo com a análise textural, os solos dos sistemas de uso da terra foram classificados como argilosos, argilo-arenosos ou muito argilosos (Tabela 1.5), característicos na classe de latossolos, mais abundante no bioma Cerrado (CUNHA, T. J. F. et al., 2018).

Tabela 1.5: Valores de textura e classificação do solo por coleta e por profundidade.

<b>Coleta</b>	<b>Profundidade</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>Areia (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Classificação</b>
NC T1	00-20	40	55	5	Argila arenosa
NC T1	20-40	45	47,5	7,5	Argila arenosa
NC T1	40-60	45	47,5	7,5	Argila arenosa
NC T1	60-80	45	47,5	7,5	Argila arenosa
NC T1	80-100	45	50	5	Argila arenosa
NC T7	00-20	50	40	10	Argila
NC T7	20-40	57,5	35	7,5	Argila
NC T7	40-60	60	35	5	Muito argiloso
NC T7	60-80	57,5	35	7,5	Argila
NC T7	80-100	55	37,5	7,5	Argila
CSP T5	00-20	50	40	10	Argila
CSP T5	20-40	57,5	35	7,5	Argila
CSP T5	40-60	55	37,5	7,5	Argila
CSP T5	60-80	52,5	40	7,5	Argila
CSP T5	80-100	55	37,5	7,5	Argila
CSP T10	00-20	62,5	27,5	10	Muito argiloso
CSP T10	20-40	65	27,5	7,5	Muito argiloso
CSP T10	40-60	75	15	10	Muito argiloso
CSP T10	60-80	70	20	10	Muito argiloso
CSP T10	80-100	72,5	17,5	10	Muito argiloso
FSP T17	00-20	57,5	0.325	10	Argila
FSP T17	20-40	62,5	0.275	10	Muito argiloso
FSP T17	40-60	67,5	0.25	7,5	Muito argiloso
FSP T17	60-80	62,5	0.3	7,5	Muito argiloso
FSP T17	80-100	62,5	0.275	10	Muito argiloso
FSP T23	00-20	55	35	10	Argila
FSP T23	20-40	62,5	30	7,5	Muito argiloso
FSP T23	40-60	62,5	30	7,5	Muito argiloso
FSP T23	60-80	62,5	30	7,5	Muito argiloso
FSP T23	80-100	62,5	30	7,5	Muito argiloso

### 3.2. TEOR E ESTOQUE DE C-ORG

A estoque de C-org médio nos resíduos orgânicos em NC é 7,64 Mg/ha (3,42 - 11,6 Mg/ha), em FSP é 3,89 Mg/ha (2,42 - 6,02 Mg/ha), e em CSP é 3,12 Mg/ha (1,19 - 6,39 Mg/ha) (Tabela 1.6). O teor de C-org demonstrou percentagem média de 45,8% para a matéria seca e de 1,85% para as camadas do solo (Tabela 1.6). O estoque de C-org até um metro de profundidade do CSP obteve um maior valor absoluto entre os sistemas (Tabela 1.6).

Tabela 1.6: Médias e desvios padrões do estoque e teores de C-org nos resíduos orgânicos e nas camadas de solo por intensidades de uso da terra.

Camadas	Sistemas	Média Est C-	Ds Est C-	Teor C	Teor C
Resíduos Orgânicos	NC	7,63	2,54	1600,87	48
	CSP	3,2	1,56	695,94	44
	FSP	3,88	1,04	850,81	45
0-20 cm	NC	43,5	14,4	27,44	2,74
	CSP	45,9	24,5	24,31	2,43
	FSP	39,9	16,2	22,18	2,22
20-40 cm	NC	27,9	7,88	16,01	1,60
	CSP	36,8	6,79	20,26	2,06
	FSP	34,3	8,35	20,06	2,00
40-60 cm	NC	33,9	9,61	18,71	1,87
	CSP	30,4	11,6	16,85	1,68
	FSP	29,6	9,67	15,95	1,59
60-80 cm	NC	18,3	5,03	10,07	1,00
	CSP	19,4	7,03	11,15	1,12
	FSP	20,5	1,63	11,54	1,15
80-100 cm	NC	16,9	1,31	9,06	0,90
	CSP	38,4	19,1	21,88	2,19
	FSP	26,3	4,3	12,58	1,26
0-100 cm	NC	148,14	21,22	-	-
	CSP	174,08	30,92	-	-
	FSP	154,42	21,8	-	-

A massa de resíduos orgânicos é significativamente maior em CN que nos sistemas silvipastoris (FSP e CSP; Tabela 1.6 e Tabela 1.7). O estoque de C-org na camada de resíduos orgânicos sobre o solo é significativamente maior em NC do que nas outras áreas (Tabela 1.7 e Os dados de estoque C-org na camada RO se mostraram não homogêneos, apesar de serem normais. Por este motivo não foi realizada a análise de variância pelo teste ANOVA e de correlação pelo teste de Tukey, utilizou-se o teste de correlação de Games-Howell (Tabela 1.8).

Tabela 1.8). porém isso não foi observado estatisticamente (Figura 1.6). Contudo, o valor de p (0,064) entre CSP e NC pelo teste de correlação de Tukey ficou muito próximo do valor  $p=0,05$ .

Tabela 1.7: Valores de análise de variância pelo Teste ANOVA.

Data	Df	Sum sq	Mean sq	Fvalue	Pr(>F)
Resíduos orgânicos secos/área	2	4684916	2342458	15,97	2,64e-05***
Resíduos	27	3959445	14646		
Estoque de C-org 0-100	2	3665	1832,5	2,921	0,071
Resíduos	27	16941	627,4		
Estoque de C-org 0-20	2	184	92,2	0,258	0,774
Resíduos	27	9648	357,3		
Estoque de C-org 20-40	2	422,3	211,15	3,558	0,0425 *
Resíduos	27	1602,1	59,34		
Estoque de C-org 40-60	2	105,1	52,55	0,493	0,616
Resíduos	27	2876,7	106,54		
Estoque de C-org 60-80	2	7,06	3,532	0,137	0,875
Resíduos	6	154,85	25,808		
Estoque de C-org 80-100	2	698,9	349,5	2,733	0,143
Resíduos	6	767,1	127,9		
Teor C RO	2	0,3025	0,15124	2,825	0,0769
Resíduos	27	1,4452	0,05353		
Teor C 0-20	2	0,148	0,07399	0,656	0,257
Resíduos	27	3,046	0,11281		
Teor C 20-40	2	1,145	0,5723	2,296	0,12
Resíduos	27	6,731	0,2493		
Teor C 40-60	2	0,0593	0,02966	0,697	0,507
Resíduos	27	1,1491	0,04256		
Teor C 60-80	2	0,0362	0,01810	0,279	0,766
Resíduos	6	0,3886	0,06477		
Teor C 80-100	2	2,637	1,318	2,923	0,13
Resíduos	6	2,706	0,451		

Os dados de estoque C-org na camada RO se mostraram não homogêneos, apesar de serem normais. Por este motivo não foi realizada a análise de variância pelo teste ANOVA e de correlação pelo teste de Tukey, utilizou-se o teste de correlação de Games-Howell (Tabela 1.8).

Tabela 1.8: Valores de correlação para os dados pela análise de variância.

Teste de correlação de Tukey						
	Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
Estoque de C-org prof. 20 – 40 cm	NC–CSP	-8,91	3,44	27	-2,586	0,0396
	NC– FSP	-6,41	3,44	27	-1,859	0,17
	CSP–FSP	2,5	3,44	27	0,727	0,7497
Estoque de C-org prof. 0 – 100 cm	NC – CSP	0.1588	0.673	27	2.36	0.0644
	NC – FSP	0.0408	0.673	27	0.606	0.8181
	CSP – FSP	0.1180	0.673	27	1.754	0.2040
Peso seco por área	NC–CSP	-905	171	27	-5,284	<0,0001
	NC– FSP	-750	171	27	-4,38	0,0005
	CSP–FSP	-155	171	27	-0,904	0,6423

Teste de correlação de Games-Howell

	Contrast	estimate	Conf.	Conf.	p.adj	
<b>Estoque de C-org</b>	NC – CSP	-4,52	-6,96	-2,07	0,000657	***
<b>RO</b>	NC – FSP	-3,75	-6,06	-1,43	0,003	**
	CSP – FSP	0,768	-0,767	2,3	0,419	

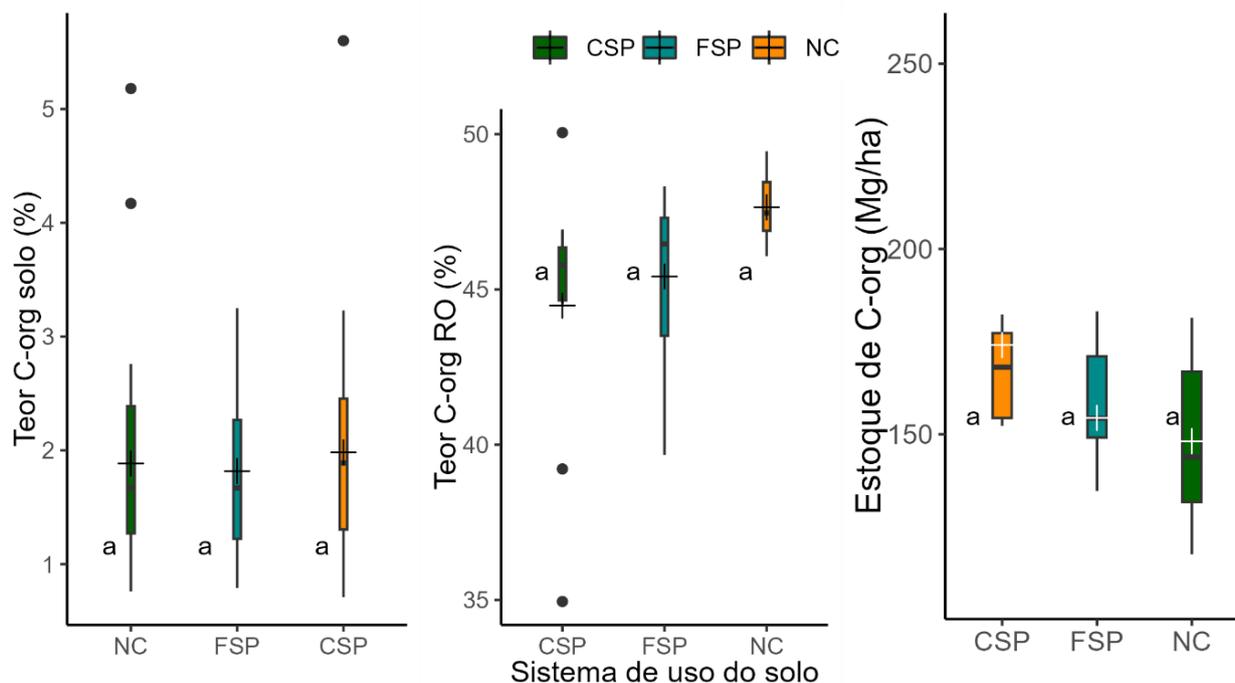


Figura 1.5: Teores de C-org no solo (A), teor de C-org nos resíduos orgânicos (B) e dos estoques de C-org até um metro de profundidade (C) nos diferentes sistemas de uso da terra.

O estoque de C-org contido em um metro de profundidade do solo não foi significativamente diferente entre os sistemas de uso da terra (Figura 1.5). Dentre as diferentes profundidades de solo analisados, o estoque de C-org foi significativamente diferente somente na camada de 20 a 40 centímetros de profundidade, com menores valores encontrados em NC que em CSP (Figura 1.6, Tabela 1.7 e Tabela 1.8).

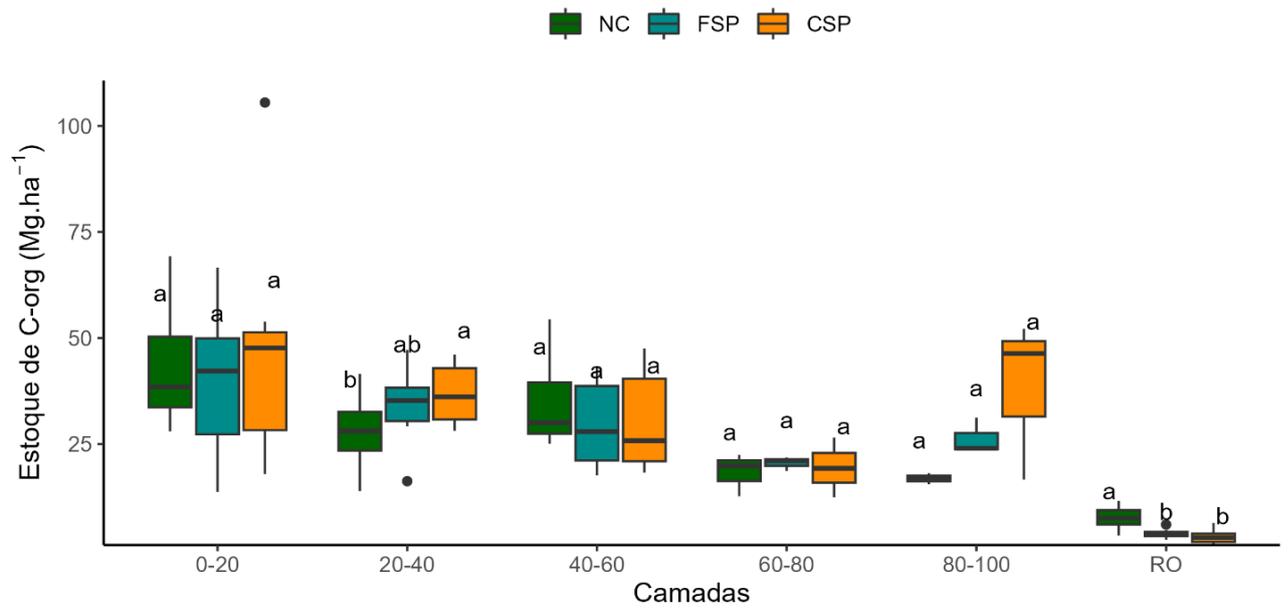


Figura 1.6: Estoques de C-org por camada de profundidade nos sistemas de uso da terra. As letras diferentes indicam diferenças significativas no estoque de carbono na profundidade de solo indicada.

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1. OS SOLOS DOS SISTEMAS SILVIPASTORIS ESTÃO MAIS COMPACTADOS QUE OS DO CERRADO NATIVO.

A densidade da primeira camada do solo, NC, tem o menor valor, 0,81 g/cm<sup>3</sup>, e maior porosidade, 69%, e na última camada o FSP tem a maior densidade, 1,05 g/cm<sup>3</sup>, e menor porosidade, 60%. Estes valores são inferiores aos encontrados por outros autores no solo em cerrado sentido restrito, que têm variado entre 1,22-1,63 g/cm<sup>3</sup> para densidade e 32-44% para porosidade (FALCÃO et al., 2020; JUNIOR et al., 2019; SCHOSSLER et al., 2018; SILVA et al., 2014), e 1,31-2,13 g/cm<sup>3</sup> no Cerrado em restauração passiva (PEREIRA et al., 2021). Entretanto são valores equivalente aos de outros: 0,72- 0,96 g/cm<sup>3</sup> e 62-67% (ARAÚJO; GOEDERT; LACERDA, 2007; BAYER et al., 2006; CHAPUIS LARDY et al., 2002; NGOLO et al., 2019). A variabilidade em solos sob pastagem plantada mono específica no Cerrado sentido amplo ainda é mais alta: 0,86-1,73 g/cm<sup>3</sup> e 31-57% (ARAÚJO; GOEDERT; LACERDA, 2007; CHAPUIS LARDY et al., 2002; FALCÃO et al., 2020; PINHEIRO et al., 2021; SANTOS; FERREIRA; ARAÚJO, 2009). MORAIS et al. (2020) verificaram em 176 amostras dos solos em todo o Cerrado do estado de Minas Gerais valores entre 0,65 e 1,84 g/cm<sup>3</sup>. CHAPUIS LARDY et al. (2002) analisaram uma área controle de cerrado pastoreado, similar ao CSP e FSP, até dois metros de profundidade, e observaram 0,72-0,86 g/cm<sup>3</sup>. RIBEIRO et al. (2023) apuraram áreas de Cerradão em latossolos mais densas: 1,03-1,22g/cm<sup>3</sup>.

Ainda que não exista um consenso na literatura sobre valores de resistência mecânica que confirmam a compactação do solo, alguns autores consideram que valores maiores do que 2Mpa começam a dificultar o crescimento radicular (LIMA; LEÓN; SILVA, 2013; MATIAS et al., 2022). Não foi encontrada uma referência numérica absoluta de densidade aparente para avaliar se um sistema de pastoreio em cerrado nativo sentido restrito está compactado, porém LARDY et al., 2022 calculou diversas regressões lineares que estimam a resistência à penetração através de parâmetros do solo como densidade e umidade. Em seu estudo, o menor valor de densidade para que a resistência à penetração fosse inferior a 2Mpa foi: 1,28 g/cm<sup>3</sup>. De forma semelhante, PALACIO; GÁLVEZ; SÁNCHEZ, 2018 observaram 1,5 g/cm<sup>3</sup> para 2,2 Mpa. Ao comparar com as densidades medidas neste estudo, a resistência à penetração nos sistemas não dificultaria o crescimento radicular.

A mudança no uso do solo com cobertura vegetal nativa para pastagens pode impactar os atributos do solo, incluindo indiretamente a densidade do solo (SILVEIRA SARTORI SILVA et al., 2019). A primeira camada em NC é menos densa do que em CSP, e mais porosa (Figura 1.4). Isso indica que o pisoteio do gado e a menor densidade de graminóides (e suas raízes) está reduzindo o número de vazios. Isso corrobora com o estudo de MATIAS et al. (2022), de que a introdução de animais em área de pastagem no Cerrado piauiense aumentou a compactação do argissolo amarelo em 2%.

Essa diferença também aponta que a matéria seca acumulada em NC (o dobro) aumenta a atividade biológica e por conseguinte a aeração (macroporosidade). Porém, a primeira camada em NC e em CSP não difere da em FSP, o que sugere uma sobreposição de efeitos. A elevação da densidade aparente em FSP devido ao pastoreio ocorrido anteriormente está sendo contrabalanceada pelo efeito do descanso do gado ao longo de dois anos e seis meses de pousio, como evidenciado pelo aumento da porosidade e pela redução da densidade quando comparado ao solo em CSP. No entanto, os maiores teores de argila no solo aumentam a susceptibilidade à compactação do solo (REINERT et al., 2006). Portanto, enquanto o pousio possivelmente recupera a capacidade de aeração, a continuação do pastoreio poderia impedir o mesmo de acontecer em FSP. E essa diminuição significativa da quantidade de vazios aumenta a compactação da área ao longo do tempo (LOCATELLI et al., 2022), que pode alcançar ao longo dos anos um parâmetro não funcional de qualidade do solo.

Por meio da análise da distribuição e variação da umidade no solo, podemos explorar aspectos cruciais, como a disponibilidade de água para as raízes e para os organismos do solo, a taxa de decomposição da matéria orgânica, a mobilidade de nutrientes e a formação de estruturas do solo. A menor disponibilidade de água no solo em NC que em FSP, em todas as profundidades, exceto na primeira camada do solo onde não há diferenças, pode ser atribuída a maior absorção de água pelas raízes de árvores e arbustos do cerrado não perturbado (HONDA; DURIGAN, 2016; XIAO et al., 2024). A água que percola e alcança profundidades maiores que 60 cm está sendo absorvida pelas raízes profundas em maior quantidade e volumes no NC decorrentes da maior cobertura de árvores e arbustos em relação a CSP e FSP. Nas camadas 20 a 40 centímetros e 40 a 60 centímetros, a umidade em CSP não diferiu de NC e de FSP (Figura 1.7), que diferem entre si. Isso sugere que, nas camadas mencionadas e em NC, há maior absorção de água pelas raízes das árvores e arbustos (LIMA et al., 2022), e também há menor interceptação de água no solo de FSP e NC pelos dosséis mais fechados, que é

estimado em 20% da precipitação total (GLATZLE et al., 2024). Entretanto, há também mais retenção de umidade pelas raízes dos graminóides em FSP, que possui maior cobertura de graminóides do que CSP e NC (DA SILVA; ROSSATTO, 2019). Disso depreende-se que o pousio do gado em FSP se mostrou positivo para a retenção de umidade no sistema, pelo reestabelecimento de maior cobertura de graminóides permitindo a retenção de água, menor cobertura de dossel permitindo maior infiltrabilidade, e conseqüentemente, descompactação do solo (Figura 1.7).

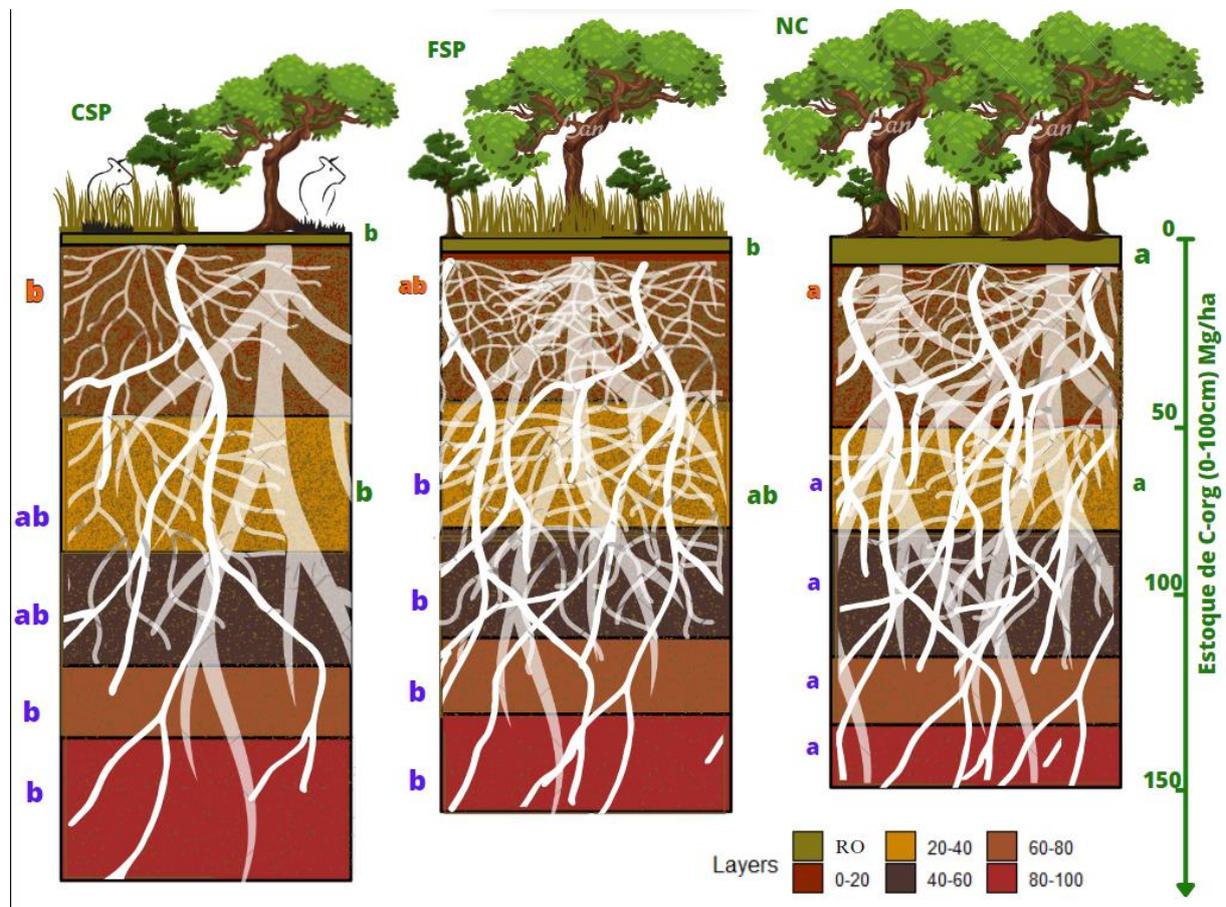


Figura 1.7: Ilustração com representação do estoque de C-org médio em cada camada de solo em cada sistema de uso da terra, proporção de raízes, vegetação e letras com as significâncias dos dados coletados ( $p < 0,05$ , somente). As letras maiores representam maiores valores, e vice-versa, e as em verde são do estoque de C-org; as em azul, da umidade do solo; as em laranja, da densidade do solo.

## **4.2. O CERRADO NATIVO NÃO POSSUI MAIOR ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO QUE OS SISTEMAS SILVIPASTORIS.**

Na profundidade 0 a 20 cm há maior estoque de C-org que nas demais profundidades para todos os sistemas, o que é coerente com a atividade biológica, quantidade de raízes (MIRANDA et al., 2016; MORAIS et al., 2020). O estoque de C-org da profundidade 20 a 40 cm demonstrou ser menor no NC do que nos outros sistemas. Visto que as áreas em questão não foram sujeitas a incêndios desde a década de 90, essa disparidade pode ser atribuída aos incêndios florestais ocorridos em períodos remotos que resultaram no acúmulo de carbono orgânico nessa camada do solo na forma de carvão vegetal. Tal carvão, resultado de combustões parciais, demonstra resistência à decomposição e mineralização pela atividade biológica, tanto de macro quanto de microrganismos. O aumento de frequência em incêndios no passado remoto do CSP pode ter ocasionado um aumento de estoque C-org, principalmente nas partículas finas (BIRD et al., 2000; HUNT, 2014). Por outro lado, essa perda de estoque C-org no NC também pode ser atrelada a uma ocorrência, no passado remoto, de erosão do C-org após incêndio severo e enxurrada de chuva (PIERSON et al., 2019), o que é frequente no Cerrado.

O estoque C-org dos resíduos orgânicos foi consideravelmente maior em NC (7,63 Mg/ha), 2,4 vezes maior que em CSP (3,2 Mg/ha) e 2 vezes que FSP (3,88Mg/ha). Isso se relaciona com a maior quantidade de biomassa seca em NC, significativamente diferente de CSP e FSP, pois o teor de C-org não foi significativamente diferente entre as demais camadas e entre os sistemas. Similar foi observado por outros autores, com valores variando entre 2,13-5 Mg/ha (MORAIS et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2019; SANTANA et al., 2020).

Os valores médios de estoque C-org até um metro e profundidade em NC, CSP e FSP atingiram 148,14 Mg/Ha, 174,08 Mg/Ha e 154,42 Mg/Ha, respectivamente. A quantidade de Carbono orgânico encontrada em NC (148,14 Mg/Há) é similar (130 - 141,76 Mg/há) ao encontrado em outros cerrados sentido restrito (CASTELLANO; SANTOS; MENEGÁRIO, 2022; MIRANDA et al., 2016; MORAIS et al., 2020). Chapuis Lardy et al. (2002) registrou os menores valores de estoque C-org no cerrado sentido restrito, 143 e 148 Mg/ha, enquanto no Cerrado pastoreado e no pasto valores intermediários de 174 e 161 Mg/ha, com os maiores valores nos campos sujo e limpo, 209 e 198 Mg/ha.

Apesar dos estoques de C-org no solo não terem diferido entre os sistemas, quando até um metro de profundidade, o  $p=0.0644$  entre NC e CSP indica uma possível diferença entre o cerrado pastoreado (CSP) e o cerrado não perturbado (NC), o que concorda com o encontrado por Chapuis Lardy et al., 2002. Outro estudo alcançou um maior estoque de C-org em pastagem mono específica em pousio 58,5 Mg/ha do que no cerrado nativo, 40 Mg/ha, ambas em neosolo quartzarenico (FILHO et al., 2024), porém seus dados estão muito abaixo do que o encontrado na literatura. Os dados observados por FILHO et al. (2024) são equivalentes aos estoques de C-org até 20 cm: em NC 43,5 Mg/ha, em CSP 45,9 Mg/ha, e em FSP 39,9 Mg/ha. Em outras literaturas também depreende-se variação similar no cerrado nativo 33,47-62 Mg/ha (ALMEIDA et al., 2021; BAYER et al., 2006; FREITAS et al., 2022; MAEKAWA et al., 2022; PAIVA; REZENDE; PEREIRA, 2011). Nos ILPFs os valores variaram entre 19,25-50 Mg/ha (ALMEIDA et al., 2021; MAEKAWA et al., 2022; VOGADO et al., 2020),

O padrão de distribuição vertical dos estoques de C-org do solo no bioma Cerrado na vegetação nativa é: 29,5% (0 a 30 cm), 28,1% (30 a 100 cm) e 42,4% (100 a 200 cm) (CASTELLANO; SANTOS; MENEGÁRIO 2022). Essa previsão traria até dois metros de profundidade o estoque de C-org em NC 210,3 Mg/ha, em CSP 247,19 e em FSP 219,28 Mg/ha, equivalente ao observado no cerrado nativo por Chapuis Lardy et al. (2002), 231 Mg/ha. Isso conduz o cerrado sentido restrito a potencial acúmulo de carbono no solo.

## 5. CONCLUSÃO

Nesta pesquisa explorou-se a influência do pastoreio bovino no solo de sistemas silvipastoris nativos. Os resultados revelaram que, apesar de uma taxa baixa de lotação de bovinos, não foi detectada diferença significativa no estoque de carbono orgânico no solo até um metro de profundidade em sistemas silvipastoris. Isso sugere um potencial desses sistemas em manter os estoques de carbono no solo a longo prazo. Contudo, foi identificado que o gado promove a compactação do solo na camada superficial de 0 a 20 centímetros, um fator que pode afetar a funcionalidade do ecossistema e a capacidade do solo de sequestrar carbono. Além disso, os estoques de carbono orgânico em resíduos orgânicos foram significativamente maiores em áreas de cerrado não perturbadas em comparação com áreas sob manejo silvipastoril, indicando que a intervenção humana pode reduzir o potencial de sequestro de carbono desses ecossistemas.

Apesar dos resultados promissores em termos de manutenção do estoque de C-org nos sistemas silvipastoris, a limitação temporal dos dados analisados impede conclusões definitivas sobre a durabilidade desses estoques de carbono a longo prazo, assim como sobre a extensão futura da compactação do solo. Portanto, são necessárias pesquisas adicionais com períodos de análise mais extensos para avaliar a sustentabilidade dessas práticas de manejo no sequestro de carbono e na qualidade física do solo a longo e médio prazo. A adoção de práticas de manejo sustentáveis é crucial para maximizar os benefícios ambientais dos sistemas silvipastoris, incluindo a mitigação das mudanças climáticas através do sequestro de carbono no solo, enquanto se promove a produtividade agropecuária.

## REFERÊNCIAS

ABREU, I.S. O gado na integridade ecológica do Cerrado. Dissertação de Mestrado, Departamento de Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 33 p. 2024.

AJAYI, A. E. et al. Changes in soil structure and pore functions under long term/continuous grassland management. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 314, p. 107407, 1 jul. 2021.

ALMEIDA, G. et al. **Cattle production in silvopastoral systems compared to monoculture pasture in the Brazilian Cerrado**. 2020. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Cattle-production-in-silvopastoral-systems-compared-Almeida-Almeida/8950aa5759ed0519082451a28360081cb0005e66>>. Acesso em: 8 fev. 2024

ALMEIDA, L. L. et al. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. **SOIL & TILLAGE RESEARCH**, v. 205, p. 104785, jan. 2021.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1099–1108, out. 2007.

BAYER, C. et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 86, p. 237–245, 1 abr. 2006.

BIRD, M. I. et al. Effect of fire and soil texture on soil carbon in a sub-humid savanna (Matopos, Zimbabwe). **Geoderma**, v. 94, n. 1, p. 71–90, 1 jan. 2000.

BRETZ, F.; HOTHORN, T.; WESTFALL, P. **Multiple Comparisons Using R**. 0. ed. [s.l.] Chapman and Hall/CRC, 2016.

BRUZIGUESSI, E. P. et al. **Sistemas silvipastoris com arvores nativas do cerrado**. [s.l.] Brasília, DF: Embrapa: Instituto Federal de Brasília: IEB, 2021., 2021.

CARVALHO, M. et al. **BRS Sarandi: nova cultivar de Andropogon gayanus para pastagens**. 2021.

CASTELLANO, G. R.; SANTOS, L. A.; MENEGÁRIO, A. A. Carbon Soil Storage and Technologies to Increase Soil Carbon Stocks in the South American Savanna. **Sustainability (Basel, Switzerland)**, v. 14, n. 9, p. 5571, 2022.

CHAPUIS LARDY, L. et al. Carbon and phosphorus stocks of clayey Ferralsols in Cerrado native and agroecosystems, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 92, n. 2, p. 147–158, 1 nov. 2002.

CUNHA, T. J. F., S., H. G. dos et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2018.

DA SILVA, B. H. P.; ROSSATTO, D. R. Are underground organs able to store water and nutrients? A study case in non-arboreal species from the Brazilian Cerrado. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 31, n. 3, p. 413–421, 1 set. 2019.

DE ABREU, L. H. G. et al. Variation in soil carbon, nitrogen and microbial attributes within a silvopastoral system in the Brazilian Cerrado. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 6, p. 2343–2353, 1 dez. 2020.

DE CARVALHO, A. M. et al. Soil Carbon Stocks and Greenhouse Gas Mitigation of Agriculture in the Brazilian Cerrado—A Review. **Plants**, v. 12, n. 13, p. 2449, jan. 2023.

DO CARMO FASIABEN, M. et al. **PADRÕES DE PRODUÇÃO DA BOVINOCULTURA DE CORTE NO BIOMA CERRADO SEGUNDO O CENSO AGROPECUÁRIO 2017**. Anais do 61º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER). **Anais...** Em: 61º CONGRESSO DA SOBER. Piracicaba, São Paulo: Even3, 2023. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/Anais/sober2023/625129>>. Acesso em: 21 fev. 2024

EICHEVERRIA, D. M. D. S. CARBONO NO SOLO, ESTRUTURA DO PASTO E DESEMPENHO DE BOVINOS EM CAPIM-MARANDU MANEJADO COM DIFERENTES TAXAS DE LOTAÇÃO. p. 118–118, 2020.

ED. LIER, Q. J. V. **Física do Solo**. [s.l.] Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

FALCÃO, K. DOS S. et al. Surface runoff and soil erosion in a natural regeneration area of the Brazilian Cerrado. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 8, n. 2, p. 124–130, 2020.

FERREIRA, C. J. B. et al. Physiological and agronomic response of soybean cultivars to soil compaction in the Brazilian Cerrado. **Bragantia**, v. 82, p. e20220160, 2023.

FREITAS, I. C. DE et al. Soil Carbon and Nitrogen Stocks under Agrosilvopastoral Systems with Different Arrangements in a Transition Area between Cerrado and Caatinga Biomes in Brazil. **Agronomy (Basel)**, v. 12, n. 12, p. 2926, 2022.

GATEA, A. et al. Soil Bulk Density Estimation Methods: A Review. **Pedosphere**, v. 28, p. 581–596, 1 ago. 2018.

GLATZLE, S. et al. Integrated Land-Use Systems Contribute to Restoring Water Cycles in the Brazilian Cerrado Biome. **Land**, v. 13, n. 2, p. 221, fev. 2024.

HONDA, E. A.; DURIGAN, G. Woody encroachment and its consequences on hydrological processes in the savannah. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 371, n. 1703, p. 20150313, 19 set. 2016.

HUNT, L. P. Aboveground and belowground carbon dynamics in response to fire regimes in the grazed rangelands of northern Australia: initial results from field studies and modelling. **The Rangeland Journal**, v. 36, n. 4, p. 347–358, 24 set. 2014.

JUNIOR, J. L. M. et al. Physical Attributes of Soil in Different Forest Cover in South of Tocantins. **International Journal of Plant & Soil Science**, p. 1–7, 23 dez. 2019.

- LARDY, J. M. et al. Effects of soil bulk density and water content on penetration resistance. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 7, n. 2, p. e20096, 2022.
- LIMA, D. DE S. et al. Root biomass under different soil uses and native Cerrado in Tocantins, Brazil. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e53811125333–e53811125333, 14 jan. 2022.
- LIMA, R. P. DE; LEÓN, M. J. D.; SILVA, A. R. DA. Comparação entre dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. **Revista Ceres**, v. 60, p. 577–581, ago. 2013.
- LOCATELLI, J. L. et al. Soil Strength and Structural Stability Are Mediated by Soil Organic Matter Composition in Agricultural Expansion Areas of the Brazilian Cerrado Biome. **Agronomy**, v. 13, n. 1, p. 71, 25 dez. 2022.
- MAEKAWA, S. C. E. et al. Spatial distribution of acidity components and oxidizable carbon fractions in a silvopastoral system. **Australian Journal of Crop Science**, n. 16(07):2022, p. 990–996, 1 jul. 2022.
- MATIAS, S. S. R. et al. MAPPING OF SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES IN PASTURE AREAS IN THE CERRADO OF PIAUÍ, BRAZIL. **Colloquium Agrariae. ISSN: 1809-8215**, v. 18, n. 4, p. 33–42, 2022.
- MORAIS, V. A. et al. SPATIAL AND VERTICAL DISTRIBUTION OF LITTER AND BELOWGROUND CARBON IN A BRAZILIAN CERRADO VEGETATION. **CERNE**, v. 23, n. 1, p. 43–52, mar. 2017.
- MORAIS, V. A. et al. Spatial distribution of soil carbon stocks in the Cerrado biome of Minas Gerais, Brazil. **Catena (Giessen)**, v. 185, p. 104285, 2020.
- NGOLO, A. O. et al. Soil Physical Quality After 21 Years of Cultivation in a Brazilian Cerrado Latosol. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 3, p. p124, 15 fev. 2019.
- OLIVEIRA, C. P. DE et al. Comparison of statistical models for the estimation of tree biomass and for the estimation of carbon stock above the soil in the Cerrado biome. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 255–269, 2019.
- PAIVA, A. O.; REZENDE, A. V.; PEREIRA, R. S. Estoque de carbono em cerrado sensu stricto do Distrito Federal. **Revista Árvore**, v. 35, p. 527–538, jun. 2011.
- PAIVA, G. R. P. et al. Potencial do estrato arbóreo-arbustivo de Cerrado Sensu Stricto para fins medicinais. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, p. e18810817234–e18810817234, 10 jul. 2021.
- PALACIO, D. D.; GÁLVEZ, C. P.; SÁNCHEZ, M. A. L. Estimación de la densidad volumétrica y porosidad total usando el penetrómetro. **Cultivos Tropicales**, v. 39, n. 4, p. 34–41, 2018.
- PEREIRA, L. C. et al. Aspects of forest restoration and hydrology: linking passive restoration and soil–water recovery in Brazilian Cerrado. **Journal of Forestry Research**, v. 32, n. 6, p. 2301–2311, 1 dez. 2021.

- PEREIRA, M. G. et al. Atributos físicos e químicos do solo sob diferentes sistemas de produção em solos de textura arenosa. **MAGISTRA**, v. 30, p. 342–350, 2019.
- PIERSON, D. N. et al. Soil carbon and nitrogen eroded after severe wildfire and erosion mitigation treatments. **International Journal of Wildland Fire**, v. 28, n. 10, p. 814–821, 19 mar. 2019.
- PINHEIRO, F. M. et al. Soil carbon stock and stability under Eucalyptus-based silvopasture and other land-use systems in the Cerrado biodiversity hotspot. **Journal of environmental management**, v. 299, p. 113676–113676, 2021.
- PULIDO-MONCADA, M.; MUNKHOLM, L. J. Limiting Water Range: A Case Study for Compacted Subsoils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, n. 4, p. 982–992, 2019.
- REINERT, D. et al. **Qualidade física dos solos**. 2006.
- RIBEIRO, F. P. et al. Carbon Storage in Different Compartments in Eucalyptus Stands and Native Cerrado Vegetation. **Plants**, v. 12, n. 14, p. 2751, jan. 2023.
- RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. **Fitofisionomias do bioma cerrado**. 1998.
- SANTANA, T. T. DE C. et al. Quantification of litter and organic carbon in fragment of cerrado sensu stricto in Tocantins. **Scientia Agraria Paranaensis**, p. 94–97, 23 maio 2020.
- SANTOS, A. C. DOS; FERREIRA, E. M.; ARAÚJO, L. C. DE. PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DE SOLOS EM ÁREAS SOB PASTAGENS EM CERRADO DO NORTE DO TOCANTINS. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 7, n. 1, p. 55–63, 15 jan. 2009.
- SCHOSSLER, T. R. et al. Soil Physical Quality in Agricultural Systems on the Cerrado of Piauí State, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 4, p. 3975–3989, dez. 2018.
- SILVA, R. L. et al. ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM DIFERENTES COBERTURAS VEGETAIS NA REGIÃO SUL DO PIAUÍ. **Revista Caatinga**, v. 27, n. 3, p. 160–168, 26 set. 2014.
- SILVEIRA SARTORI SILVA, M. R. et al. Soil bacterial communities in the Brazilian Cerrado: Response to vegetation type and management. **Acta Oecologica**, v. 100, p. 103463, 1 out. 2019.
- TEIXEIRA, H. M. et al. Impact of agroecological management on plant diversity and soil-based ecosystem services in pasture and coffee systems in the Atlantic forest of Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 305, p. 107171, 1 jan. 2021.
- TITTONELL, P. Ecological intensification of agriculture—sustainable by nature. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 8, p. 53–61, out. 2014.
- VOGADO, R. F. et al. Spatial variability of carbon and nitrogen stocks in integrated management systems and pasture in a cerrado region. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, p. e67291110220–e67291110220, 29 nov. 2020.

WALTER, B. M. T., V., G. D. ;; FONTES, C. G., V., R. C. ;; PEREIRA, J. B.; **Flora vascular da Fazenda Sucupira - DF- Embrapa Recursos Genéticos Biotecnologia segunda atualização.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/188400/flora-vascular-da-fazenda-sucupira---df--embrapa-recursos-geneticos-biotecnologia-segunda-atualizacao>>. Acesso em: 25 jan. 2024.

XIAO, T. et al. Effects of vegetation roots on the structure and hydraulic properties of soils: A perspective review. **The Science of the Total Environment**, v. 906, p. 167524, 1 jan. 2024.

YANG, K. et al. Change in soil water deficit and soil organic matter consumption over time in rain-fed apricot orchards on the semi-arid Loess Plateau, China. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 314, p. 107381, 1 jul. 2021.