



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS DE CHAPADINHA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

KAROLLINE ROSA CUTRIM SILVA

AGREGAÇÃO E MATÉRIA ORGÂNICA COMO INDICADORES DE
QUALIDADE E SUSTENTABILIDADE DO SOLO NO CERRADO DO LESTE
MARANHENSE

Chapadinha - MA

2025

KAROLLINE ROSA CUTRIM SILVA

**Agregação e matéria orgânica como indicadores de qualidade e sustentabilidade
do solo no Cerrado do leste maranhense**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Centro de Ciências de Chapadinha, da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Meio Ambiente e Recursos Naturais

Linha de pesquisa: Produção agrícola e Desenvolvimento sustentável

Orientador: Carlos Augusto Rocha de Moraes Rego

Coorientador: Marcos Gervasio Pereira

Chapadinha - MA

2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Rosa Cutrim Silva, Karolline.

Agregação e matéria orgânica como indicadores de
qualidade e sustentabilidade do solo no Cerrado do leste
maranhense / Karolline Rosa Cutrim Silva. - 2025.
106 f.

Coorientador(a) 1: Marcos Gervasio Pereira.

Orientador(a): Carlos Augusto Rocha de Moraes Rego.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Ciências Ambientais/ccch, Universidade Federal do
Maranhão, Chapadinha-ma, 2025.

1. Agregados do Solo. 2. Carbono Orgânico. 3.
Práticas Conservacionistas. 4. Sustentabilidade Agrícola.
I. Augusto Rocha de Moraes Rego, Carlos. II. Gervasio
Pereira, Marcos. III. Título.

KAROLLINE ROSA CUTRIM SILVA

**Agregação e matéria orgânica como indicadores de qualidade e sustentabilidade
do solo no Cerrado do leste maranhense**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Centro de Ciências de Chapadinha, da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Meio Ambiente e Recursos Naturais
Linha de pesquisa: Produção agrícola e Desenvolvimento sustentável

Orientador: Carlos Augusto Rocha de Moraes Rego
Coorientador: Marcos Gervasio Pereira

Aprovada em: 30/09/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Augusto Rocha de Moraes Rego
Universidade Federal do Maranhão

Examinador 1 Prof. Dr. Pedro Augusto de Oliveira Moraes
Universidade Federal do Maranhão

Examinador 2 Prof. Dr. Jefferson Matheus Barros Ozório
Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me sustentado até aqui, sendo o meu auxiliador e o meu refúgio nos momentos mais difíceis da minha vida. À Ele toda honra, toda glória e todo louvor!

Ao Prof. Dr. Carlos Augusto Rocha de Moraes Rego, pela confiança em ter aceitado me orientar e por ter compartilhado do seu tempo, conhecimento e paciência na construção deste trabalho. Foram dois anos intensos, com aprendizados significativos para a minha vida profissional e pessoal.

Ao Prof. Dr. Marcos Gervasio Pereira, pelo aceite em me coorientar e pelas contribuições valiosas para a construção da minha pesquisa de mestrado.

Ao Prof. Dr. Pedro Augusto de Oliveira Morais, pelo suporte nas análises químicas realizadas. À Prof^a. Dr^a. Rosane Claudia Rodrigues por ter cedido o seu laboratório para as análises de carbono e aos seus orientados Pedro Lucas Oliveira Rocha e Antônio Marcos da Penha Santos pelo suporte. À Prof^a. Dr^a. Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos, pelo empréstimo do espectrofotômetro para a leitura do fósforo. À Prof^a. Dr^a. Izumy Pinheiro Doihara, pelas placas de petri que foram muito úteis na classificação dos agregados.

Aos integrantes do Grupo de Pesquisa e Extensão em Solos (GPES), Ana Lourdes dos Santos Silva, Fátima Grazyela de Sena Dias, Gessianny Vitória Costa da Silva, Samira da Silva Rolim, Wilian Vieira da Silva, Guilherme dos Santos Silva e Juan Diego Ferreira Conceição, por dedicarem parte do seu tempo nas atividades de coleta, classificação e análises laboratoriais. Vocês foram fundamentais para a construção deste trabalho.

Ao discente Brainerd Gomes dos Santos, pela ajuda na coleta dos monólitos e pela realização da análise da macrofauna edáfica. Aos discentes Ana Luisa da Conceição de Sousa Meneses e José Henrique dos Santos Nascimento, que, mesmo sem qualquer obrigação, dedicaram seu tempo para me ajudar nas análises químicas, apenas pelo desejo de aprender.

Às técnicas do Laboratório Multidisciplinar, Fabrícia Vieira Ribeiro e Patrícia Gomes de Carvalho, que nos acompanharam durante longos meses para as análises morfológicas dos agregados. Obrigada pelas conversas, risadas e apoio.

Aos meus colegas de turma, pelo companheirismo e apoio recíprocos. Em especial, à Janaiane Ferreira dos Santos e Welington Cruz Correa, que me acolheram em sua casa quando precisei viajar para realização de algumas análises. E ao Fernando Freitas Pinto Júnior, por me ajudar nas análises de cálcio e magnésio e por todo apoio ao longo do curso de graduação e mestrado.

À Fazenda Barbosa, por sempre nos receberem tão bem em sua propriedade e pela disponibilidade, apoio e incentivo para com o desenvolvimento da pesquisa científica na região Leste do Maranhão.

À Embrapa Meio-Norte, pela colaboração na realização das análises laboratoriais de cálcio e magnésio.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (Fapema) pela concessão de bolsa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCAM) pelo suporte acadêmico, e à Universidade Federal do Maranhão – Campus de Chapadinha (UFMA – CCCh), pelo apoio institucional.

Aos meus amigos de república, companheiros de casa, de risadas e de tantos momentos bons e difíceis. Em especial, à Gabrielle de Melo Oliveira, ao George de Sousa Lima Paiva e ao Gabriel de Melo Oliveira, pelo apoio, amizade e ajuda na execução deste trabalho.

À minha família, por todo amor, apoio e incentivo incondicionais. De forma especial, à minha mãe, Rosa Maria Cutrim, minha maior inspiração, que sempre acreditou e investiu em mim e nos meus sonhos, mesmo quando eu mesma desacreditei. *In memoriam*, ao Jarbas Braga, que me escolheu como filha e me cercou de conselhos, incentivo e amor. Ao meu pai, Joabe Oliveira Silva, pelo amor e incentivo à minha vida acadêmica. E ao Adam Yvens Araújo Salazar, por ser o meu pseudo-psicólogo, por todo amor, cuidado, companheirismo, conversas e risadas diárias. Vocês tornaram esse processo mais fácil e possível.

RESUMO

A classificação dos agregados do solo com base em sua via de formação, associada à análise de atributos físicos, químicos e biológicos, tem se mostrado uma ferramenta eficiente para avaliar a qualidade e a sustentabilidade edáfica. Nesse contexto, este trabalho integrou uma revisão sistemática da literatura e análises experimentais de campo, com o objetivo de compreender como diferentes sistemas de manejo e relações texturais influenciam a gênese de agregados em solos do Cerrado brasileiro, bem como seus atributos edáficos. A revisão sistemática foi conduzida nas bases Scopus, Web of Science e ScienceDirect, resultando em 233 estudos, dos quais 19 atenderam aos critérios de seleção, incluindo trabalhos datados de 2012 a 2025. Os resultados indicaram que práticas conservacionistas e sistemas agroflorestais, sobretudo em solos de textura mais fina, favorecem a agregação biogênica e a manutenção dos estoques de carbono e nutrientes. Em contrapartida, sistemas convencionais e pastagens intensivas tendem a intensificar a agregação fisiogênica, associada a maiores perdas de carbono e à degradação da estrutura do solo. O estudo de campo foi realizado em abril de 2024, na Fazenda Barbosa, em Brejo (MA), abrangendo três áreas representativas de uso da terra: Cerrado Nativo (CN), Pastagem Perene (PP) e Integração Lavoura-Pecuária (ILP). Foram avaliados atributos físicos (densidade, porosidade total, micro e macroporosidade, diâmetro médio ponderado e geométrico em via seca e úmida, e índice de estabilidade dos agregados), a macrofauna edáfica, a classificação dos agregados em biogênicos e fisiogênicos, além de análises químicas (pH, P, K, Ca, Mg, Al e H+Al) e do fracionamento físico da matéria orgânica dos agregados de acordo com sua via de formação. Entre os sistemas avaliados, o ILP apresentou os melhores resultados em atributos químicos, maior diversidade da macrofauna e maior acúmulo de carbono orgânico em formas mais estáveis. Além disso, aproximou-se do CN nos atributos físicos da camada superficial (0–0,05 m), evidenciando seu potencial conservacionista. A PP, por sua vez, contribuiu positivamente para a fertilidade do solo, apresentou maior diversidade e uniformidade biológica e promoveu melhorias físicas mais expressivas na camada de 0,05–0,10 m, destacando-se pela maior proporção de agregados biogênicos nessa profundidade. De modo geral, todos os sistemas favoreceram a agregação biogênica, eficiente no acúmulo de carbono, reforçando a importância de práticas conservacionistas para a sustentabilidade dos solos do Cerrado. Os indicadores utilizados demonstraram sensibilidade e eficácia na avaliação dos impactos do uso da terra sobre a qualidade edáfica no Leste maranhense, permitindo identificar tanto as potencialidades quanto as limitações dos diferentes sistemas de manejo. Em conjunto, os achados da revisão sistemática e do estudo experimental evidenciam, ainda que com particularidades, que práticas conservacionistas constituem estratégias eficazes para estimular a via biogênica de agregação, melhorar a qualidade do solo, potencializar o sequestro de carbono e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas nos diferentes biomas brasileiros.

Palavras-chave: Agregados do solo, Carbono orgânico, Práticas conservacionistas, Sustentabilidade agrícola.

ABSTRACT

The classification of soil aggregates based on their formation pathway, combined with the analysis of physical, chemical, and biological attributes, has proven to be an efficient tool for assessing soil quality and sustainability. In this context, this study integrated a systematic literature review and experimental field analyses to understand how different management systems and textural relationships influence the genesis of aggregates in soils of the Brazilian Cerrado, as well as their edaphic attributes. The systematic review was conducted in the Scopus, Web of Science, and ScienceDirect databases, resulting in 233 studies, of which 19 met the selection criteria. The results indicated that conservation practices and agroforestry systems, especially in finer-textured soils, favor biogenic aggregation and the maintenance of carbon and nutrient stocks. In contrast, conventional systems and intensive pastures tend to intensify physiogenic aggregation, associated with greater carbon losses and soil structure degradation. The field study was carried out in April 2024 at Fazenda Barbosa, in Brejo (MA), covering three representative land-use areas: Native Cerrado (CN), Perennial Pasture (PP), and Crop-Livestock Integration (ILP). Physical attributes (bulk density, total porosity, micro- and macroporosity, mean weight and geometric diameter under dry and wet conditions, and aggregate stability index), soil macrofauna, the classification of aggregates into biogenic and physiogenic, as well as chemical analyses (pH, P, K, Ca, Mg, Al, and H+Al) and the physical fractionation of organic matter within aggregates according to their formation pathway, were evaluated. Among the systems assessed, ILP showed the best results in chemical attributes, greater macrofauna diversity, and higher accumulation of organic carbon in more stable forms. Additionally, it was closer to CN in the physical attributes of the surface layer (0–0.05 m), highlighting its conservation potential. PP, in turn, contributed positively to soil fertility, showed higher biological diversity and uniformity, and promoted more significant physical improvements in the 0.05–0.10 m layer, standing out for the higher proportion of biogenic aggregates at this depth. Overall, all systems favored biogenic aggregation, which is efficient in carbon accumulation, reinforcing the importance of conservation practices for the sustainability of Cerrado soils. The indicators used demonstrated sensitivity and effectiveness in assessing the impacts of land use on soil quality in Eastern Maranhão, allowing the identification of both the potential and the limitations of different management systems. Taken together, the findings of the systematic review and the experimental study demonstrate, albeit with particularities, that conservation practices constitute effective strategies to stimulate the biogenic pathway of aggregation, improve soil quality, enhance carbon sequestration, and contribute to climate change mitigation across different Brazilian biomes.

Keywords: Soil aggregates, Organic carbon, Conservation practices, Agricultural sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo I

Figura 1 Fluxograma simplificado das etapas de coleta e triagem dos dados.....	36
Figura 2 Distribuição geográfica dos estudos catalogados sobre a gênese dos agregados realizados no território brasileiro.....	38
Figura 3 Influência da textura do solo na proporção de agregados biogênicos e fisiogênicos. Comparações com $p > 0,05$ não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste de Wilcoxon.....	39
Figura 4 Influência da textura do solo na formação de agregados biogênicos. Comparações com $p > 0,05$ não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste de Kruskal-Wallis.....	41
Figura 5 Influência da textura do solo na formação de agregados fisiogênicos. Comparações com $p > 0,05$ não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste de Kruskal-Wallis.....	42
Figura 6 Influência dos sistemas de manejo na proporção de agregados biogênicos e fisiogênicos. Comparações com $p > 0,05$ não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste de Wilcoxon.....	47
Figura 7 Influência dos sistemas de manejo na formação de agregados biogênicos. Comparações com $p > 0,05$ não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste de Kruskal-Wallis.....	48
Figura 8 Influência dos sistemas de manejo na formação de agregados fisiogênicos. Comparações com $p > 0,05$ não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste de Kruskal-Wallis.....	49

Capítulo II

Figura 1 Mapa de localização das áreas de estudo realizado na Fazenda Barbosa, localizada no município de Brejo—MA.....	66
Figura 2 Agregados biogênicos e fisiogênicos de um Argissolo Amarelo manejado com sistemas de Integração lavoura-pecuária (ILP), Pastagem perene (PP) e Cerrado nativo (CN), na Fazenda Barbosa, Brejo—MA.	70
Figura 3 Classificação dos agregados de acordo com a sua via de formação nas áreas de Integração lavoura-pecuária (ILP), Cerrado nativo (CN) e Pastagem perene (PP). Letras minúsculas comparam entre os manejos dentro da camada. Letras maiúsculas comparam	

entre camadas dentro do manejo. Letras gregas comparam entre as vias de formação dos agregados.	74
Figura 4 Abundância relativa da macrofauna edáfica nas áreas de Integração lavoura-pecuária (ILP), Cerrado nativo (CN) e Pastagem perene (PP).	78
Figura 5 Número de indivíduos, densidade, riqueza e índices de Shannon, Pielou e Margalef da macrofauna edáfica nas áreas de Integração lavoura-pecuária (ILP), Cerrado nativo (CN) e Pastagem perene (PP).	79
Figura 6 Análise de correlação entre as variáveis físicas, químicas e biológicas estudadas.	80
Figura 7 Análise de componentes principais das variáveis avaliadas dos diferentes sistemas de manejo.	82

LISTA DE TABELAS

Capítulo I

Tabela 1 Parâmetros de busca da pesquisa bibliográfica realizada	36
Tabela 2 Número de amostras observadas por sistemas de manejo e textura de solo nos 19 artigos selecionados.	37
Tabela 3 Influência da textura do solo no armazenamento de carbono e nutrientes nos agregados biogênicos e fisiogênicos do solo.	43
Tabela 4 Influência dos sistemas de manejo no armazenamento de carbono e nutrientes nos agregados biogênicos e fisiogênicos do solo.	50

Capítulo II

Tabela 1 Caracterização dos atributos químicos e granulométricos da camada arável (0,00-0,10 m) das áreas de estudo localizadas na Fazenda Barbosa, Brejo–MA.	68
Tabela 2 Caracterização dos atributos físicos do solo das áreas de Integração lavoura-pecuária (ILP), Cerrado nativo (CN) e Pastagem perene (PP) da Fazenda Barbosa, Brejo–MA.	72
Tabela 3 Caracterização química dos agregados, de acordo com a sua via de formação, das áreas de Integração lavoura-pecuária (ILP), Cerrado nativo (CN) e Pastagem perene (PP).	74
Tabela 4 Teores de COT, COP, COAM, EstCOT, EstCOP, EstCOAM nos agregados biogênicos e fisiogênicos nas áreas de Integração lavoura-pecuária (ILP), Cerrado nativo (CN) e Pastagem perene (PP).	76

SUMÁRIO

1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
1.1	O Cerrado e a sua importância ecossistêmica	13
1.2	Impactos dos manejos e dos sistemas de produção no Cerrado.....	14
1.3	Matéria orgânica do solo.....	16
1.4	Dinâmica de agregação do solo	18
1.5	Macrofauna edáfica.....	20
2	OBJETIVOS.....	22
2.1	Geral.....	22
2.2	Específicos	23
3	HIPÓTESES.....	23
	REFERÊNCIAS	23
	CAPÍTULO I.....	32
	INFLUÊNCIA DA TEXTURA E DOS SISTEMAS DE MANEJO NA GÊNESE DE AGREGADOS E NO SEQUESTRO DE CARBONO EM SOLOS BRASILEIROS...	32
	DESTAQUES	33
	RESUMO	33
	INTRODUÇÃO.....	34
	METODOLOGIA.....	35
	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
	Influência da classe textural do solo na via de formação dos agregados	38
	Influência da classe textural do solo no acúmulo de carbono nos agregados	42
	Influência da classe textural nos atributos químicos dos agregados	44
	Influência do sistema de manejo na via de formação dos agregados do solo	46
	Influência do sistema de manejo no acúmulo de carbono nos agregados	50
	Influência do sistema de manejo nos atributos químicos dos agregados	51
	CONCLUSÃO.....	53
	FINANCIAMENTO	53
	AGRADECIMENTOS	53
	REFERÊNCIAS	54
	CAPÍTULO II.....	61
	AGREGAÇÃO E MATÉRIA ORGÂNICA COMO INDICADORES DE QUALIDADE E SUSTENTABILIDADE DO SOLO NO CERRADO DO LESTE MARANHENSE	61
	DESTAQUES	62
	RESUMO	62
	INTRODUÇÃO.....	63

METODOLOGIA.....	65
Descrição do local de estudo	65
Coleta das amostras	68
Determinação dos atributos físicos do solo	68
Classificação dos agregados	69
Determinação dos atributos químicos dos agregados biogênicos e fisiogênicos	70
Fracionamento físico da matéria orgânica dos agregados biogênicos e fisiogênicos	70
Determinação da macrofauna edáfica.....	71
Análise estatística	71
RESULTADOS	71
Atributos físicos do solo	72
Classificação dos agregados	73
Atributos químicos dos agregados biogênicos e fisiogênicos	74
Fracionamento físico da matéria orgânica do solo	76
Determinação da macrofauna edáfica.....	77
Análise de Correlação.....	80
Análise de componentes principais (ACP).....	82
DISCUSSÃO.....	83
Atributos físicos do solo	83
Classificação dos agregados	85
Atributos químicos dos agregados biogênicos e fisiogênicos	87
Fracionamento físico do carbono orgânico do solo	89
Determinação da macrofauna edáfica.....	91
Análise de correlação.....	93
Análise de componentes principais (PCA).....	94
CONCLUSÃO.....	96
FINANCIAMENTO	96
AGRADECIMENTOS	96
CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
REFERÊNCIAS	97