

Caracterização da estabilidade de agregados em diferentes horizontes de um Latossolo Amarelo em áreas úmidas do Pantanal Mato-Grossense

Characterization of aggregate stability in different horizons of a Yellow Latosol in wetlands of the Mato Grosso Pantanal

Caracterización de la estabilidad de agregados en diferentes horizontes de un Latosol Amarillo en humedales del Pantanal de Mato Grosso

Recebido: 22/05/2025 | Revisado: 27/05/2025 | Aceitado: 27/05/2025 | Publicado: 28/05/2025

Webert de Sá Alves Vasiluk

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4448-4446>

Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

E-mail: webertvasiluk@gmail.com

Lorenzo Miguel Pavine Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7791-2137>

Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

E-mail: lorenzodemiguel@outlook.com

Paula Tamires Ribeiro Venancio

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4774-101X>

Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

E-mail: paularibeiroagro@hotmail.com

Luiz Eduardo Ribeiro Scholl

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1549-4064>

Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

E-mail: luizribeiroscholl@gmail.com

Matheus Leymar De Arruda Silva

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2680-2305>

Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

E-mail: matheusleymar10@gmail.com

João Carlos de Souza Maia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6204-8112>

Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil

E-mail: jotace@terra.com.br

Resumo

O solo desempenha papel essencial para a vida e a produção de alimentos, mas enfrenta crescente degradação, comprometendo suas funções ecológicas e produtivas. A estabilidade dos agregados é um indicador fundamental da qualidade estrutural do solo, refletindo diretamente na sua capacidade de sustentar cultivos e serviços ambientais. Este estudo teve como objetivo avaliar a agregação do solo em diferentes horizontes de um perfil localizado no município de Santo Antônio do Leverger, no estado de Mato Grosso. Foram analisadas as características texturais e a estabilidade dos agregados, por meio dos parâmetros de diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico e índice de estabilidade de agregados. As coletas foram realizadas em seis horizontes definidos em trincheira aberta em Latossolo Amarelo, com trinta amostras deformadas utilizadas para as análises laboratoriais. A textura foi determinada pelo método da pipeta, enquanto a estabilidade de agregados foi avaliada pelo peneiramento úmido. Os resultados indicaram que a estabilidade dos agregados variou entre os horizontes, sendo superior no horizonte superficial. A análise estatística multivariada confirmou efeito significativo da profundidade sobre a estabilidade estrutural do solo. A avaliação conjunta dos parâmetros demonstrou-se essencial para a compreensão precisa da qualidade estrutural, apontando a importância de se considerar o perfil completo do solo para o manejo sustentável e a formulação de políticas agronômicas mais eficazes.

Palavras-chave: Solo; Estabilidade; Estrutura; Diâmetro; Úmidas.

Abstract

Soil plays an essential role for life and food production, but it is facing increasing degradation, compromising its ecological and productive functions. Aggregate stability is a fundamental indicator of the soil's structural quality, directly reflecting its capacity to support crops and environmental services. The aim of this study was to assess soil aggregation in different horizons of a profile located in the municipality of Santo Antônio do Leverger, in the state of Mato Grosso. Textural characteristics and aggregate stability were analyzed using the parameters of weighted mean diameter, geometric mean diameter and aggregate stability index. The samples were taken from six horizons defined in

an open trench in Yellow Latosol, with thirty deformed samples used for laboratory analysis. Texture was determined using the pipette method, while aggregate stability was assessed using wet sieving. The results indicated that aggregate stability varied between the horizons, being higher in the surface horizon. Multivariate statistical analysis confirmed a significant effect of depth on soil structural stability. The joint assessment of the parameters proved essential for a precise understanding of structural quality, pointing to the importance of considering the complete soil profile for sustainable management and the formulation of more effective agronomic policies.

Keywords: Soil; Stability; Structure; Diameter; Wetlands.

Resumen

El suelo desempeña un papel esencial para la vida y la producción de alimentos, pero se enfrenta a una creciente degradación que pone en peligro sus funciones ecológicas y productivas. La estabilidad de la agregación es un indicador fundamental de la calidad estructural del suelo, reflejando directamente su capacidad para sostener los cultivos y los servicios ambientales. El objetivo de este estudio fue evaluar la agregación del suelo en diferentes horizontes de un perfil localizado en el municipio de Santo Antônio do Leverger, en el estado de Mato Grosso. Se analizaron las características texturales y la estabilidad de los agregados utilizando los parámetros de diámetro medio ponderado, diámetro medio geométrico e índice de estabilidad de los agregados. Las muestras se tomaron de seis horizontes definidos en una zanja abierta en Latosol Amarillo, utilizándose treinta muestras deformadas para los análisis de laboratorio. La textura se determinó mediante el método de la pipeta, mientras que la estabilidad de los agregados se evaluó mediante tamizado en húmedo. Los resultados indicaron que la estabilidad de los agregados variaba entre los horizontes, siendo mayor en el horizonte superficial. El análisis estadístico multivariante confirmó un efecto significativo de la profundidad en la estabilidad estructural del suelo. La evaluación conjunta de los parámetros demostró ser esencial para una comprensión precisa de la calidad estructural, señalando la importancia de considerar el perfil completo del suelo para una gestión sostenible y la formulación de políticas agronómicas más eficaces.

Palabras clave: Suelo; Estabilidad; Estructura; Diámetro; Humedales.

1. Introdução

O solo é um recurso natural indispensável, fundamental para a vida terrestre e para o sistema alimentar global. É um recurso não renovável em escalas de tempo humanas, demorando aproximadamente 100 anos a formar apenas 0,5 cm de solo, e apenas cerca de 10% da área terrestre da Terra é suficientemente produtiva para suportar as necessidades alimentares de milhões de pessoas (Blanco & Lal, 2023).

O papel do solo vai além da produção de alimentos; é crucial para a gestão da água, ciclagem de nutrientes e fornecimento de habitats para microrganismos, essenciais para a manutenção do equilíbrio ecológico (Shukla, 2018). O ecossistema do solo é o mais extenso e complexo da terra, mas é vulnerável à degradação de atividades humanas como a desflorestação e a agricultura intensiva, bem como as alterações climáticas (Singh, 2024).

Apesar da sua importância crítica, o solo é frequentemente subvalorizado como recurso estratégico, com medidas insuficientes para manter a sua fertilidade e funções ecológicas, essenciais para a segurança alimentar e o desenvolvimento sustentável (Khomiakov, 2020). Compreender as complexas inter-relações entre solo, água e biodiversidade é crucial para uma gestão eficaz da terra e esforços de conservação, que são necessários para prevenir uma maior degradação e garantir um futuro resiliente (Shukla, 2018; Singh, 2024).

A estabilidade dos agregados do solo é crucial para várias funções de saúde do solo, influenciando a infiltração de água, aeração e penetração radicular, que são essenciais para o crescimento das plantas e a sustentabilidade do ecossistema (Cruz et al., 2024). A estabilidade dos agregados também desempenha um papel significativo nos fluxos de gases de efeito estufa (GEE), com agregados estáveis atuando como reatores biogeoquímicos que podem mitigar as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O em solos agrícolas (Van Den Bergh et al., 2024). Além disso, a avaliação da estabilidade dos agregados pode ser melhorada através de métodos padronizados, tais como o aparelho mecânico de peneiramento úmido, que melhora a reprodutibilidade e a comparabilidade entre laboratórios (Monteith et al., 2024).

No geral, manter a estabilidade dos agregados do solo é vital para promover a saúde do solo, aumentar a produtividade agrícola e mitigar os impactos ambientais (Ma et al., 2024), é um dos principais indicadores de sua qualidade estrutural, influenciando diretamente a infiltração de água, a aeração e a resistência à erosão. A avaliação da estabilidade dos agregados do

solo envolve várias metodologias, cada uma com vantagens e limitações distintas. O método de Agregados Estáveis em Água é reconhecido pela sua reprodutibilidade e sensibilidade às propriedades do solo, tornando-o adequado para avaliações científicas (Poeplau et al., 2024).

Em regiões agrícolas de alta produtividade, a adoção de práticas conservacionistas fundamentadas em análises científicas pode mitigar perdas e melhorar a eficiência do uso dos recursos naturais. Assim, a avaliação da estabilidade de agregados contribui para ações voltadas à conservação do solo e para a formulação de estratégias de manejo sustentável, reduzindo impactos ambientais negativos e promovendo maior rentabilidade para produtores rurais. Dessa forma, este estudo se insere no debate sobre a sustentabilidade da agricultura e a necessidade de otimizar a produtividade sem comprometer a qualidade do solo, fortalecendo a base científica para decisões técnicas e políticas na área agronômica.

Estudos detalhados sobre a estabilidade dos agregados auxiliam na compreensão dos processos de formação e degradação estrutural do solo, permitindo ajustes metodológicos e a geração de novos parâmetros para análise. Além disso, este trabalho pode servir como base para futuras pesquisas sobre a relação entre a estabilidade dos agregados e fatores como textura do solo, Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e Diâmetro Médio Geométrico (DMG).

O objetivo geral deste estudo é avaliar os atributos de agregação do solo em diferentes horizontes de um perfil localizado na Fazenda Experimental da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), no município de Santo Antônio do Leverger – MT. Para isso, serão analisadas variáveis como a distribuição granulométrica, o Diâmetro Médio Ponderado (DMP), o Diâmetro Médio Geométrico (DMG) e o Índice de Estabilidade de Agregados (IEA), visando compreender a variação estrutural ao longo do perfil e sua implicação na qualidade física do solo.

Especificamente, busca-se, (1) caracterizar a granulometria do solo em cada horizonte identificado, possibilitando a classificação textural; (2) determinar o DMP e o DMG dos agregados em cada horizonte, avaliando a predominância de agregados maiores ou menores; (3) calcular o Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) para estimar a resistência dos agregados à desagregação em água; e (4) comparar estatisticamente os atributos analisados entre os horizontes, identificando possíveis padrões de variação estrutural vertical no perfil.

2. Metodologia

O estudo tratou-se de uma pesquisa experimental, de campo, de natureza quantitativa (Gil, 2017; Pereira et al., 2018) e, com emprego de estatística descritiva simples com uso de classes de dados, valores médios (Akamine & Yamamoto, 2009; Shitsuka et al., 2014) e de análise estatística (Bekman & Costa Neto, 2009; Vieira, 2021). A coleta foi realizada na fazenda experimental da Faculdade de Agronomia e Zootecnia da Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, em Santo Antônio do Leverger-MT, com trincheira localizado no pomar de citrus, o local encontra-se a 162 metros de altitude, com as coordenadas geográficas de latitude Sul 15°50'58.8" e 56°04'12.7" de longitude Oeste, apresentando clima Aw da classificação de Köppen.

Na trincheira foram definidos 6 (seis) horizontes de acordo com as características morfológicas observadas há campo (H1 a H6), em cada horizonte foram coletadas 5 (cinco) amostras deformadas de aproximadamente 10x10x10 cm, com auxílio de pá de aço inoxidável, armazenadas e transportadas em vasilhas de plástico rígidas, para evitar a fragmentação dos agregados, totalizando 30 amostras. Todas as amostras foram organizadas e dispostas em ambiente protegido para secagem e obtenção da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

Após a obtenção da TFSA, foi realizado análise granulométrica em cada amostra, pelo método da pipeta. Foi selecionado 20,00 g de solo (TFSA) de cada amostra, adicionado 100 mL de água deionizada e 25 mL da solução de hexametáfosfato de sódio 0,038 mol L⁻¹ + hidróxido de sódio 0,1 mol L⁻¹, agitado por 16 horas a 150 rotações por minuto (RPM). O procedimento e cálculo para determinação de areia, silte e argila, foi realizado conforme descrito por EMBRAPA (2017). Na

tabela 1 é apresentado o resultado da granulometria, acompanhado da profundidade de cada horizonte e sua respectiva classificação conforme o triângulo textural do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (Santos et al., 2018).

Tabela 1 – Resultado da análise textural pelo método da pipeta.

ANÁLISE FÍSICA DO SOLO

Fazenda Experimental da UFMT - Santo Antônio do Leverger - MT

Horizonte		Composição Granulométrica da Terra Fina						Classificação
Símbolo	Profundidade	Areia (g/kg)	Silte (g/kg)	Argila (g/kg)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	
H1	0 - 12 cm	829	140	31	83	14	3	Areia-franca
H2	12 - 40 cm	788	164	47	79	16	5	Areia-franca
H3	40 - 66 cm	729	171	100	73	17	10	Franco-arenoso
H4	66 - 90 cm	720	174	106	72	17	11	Franco-arenoso
H5	90 - 115 cm	658	234	108	66	23	11	Franco-arenoso
H6	115 - 150 cm	693	201	107	69	20	11	Franco-arenoso

Fonte: Dados da Pesquisa (2025).

Com o objetivo de identificar se os horizontes diferem entre si, o resultado da textura de todas as amostras foi submetido à análise estatística, primeiramente, a normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk ($\alpha=0,05$) para cada horizonte e variável, enquanto a homogeneidade das variâncias foi avaliada pelo teste de Levene ($\alpha=0,05$). Em seguida, aplicou-se MANOVA unidirecional (traço de Pillai, $\alpha=0,05$) para avaliar diferenças multivariadas entre horizontes. Por fim, comparações pareadas foram realizadas utilizando o teste post-hoc de Games-Howell ($\alpha=0,05$), escolhido por sua robustez à não-normalidade. Todas as análises foram processadas no software Jamovi v.2.6.2 (Jamovi, 2024), complementado com pacotes (Fox & Weisberg, 2023) do ambiente R (R, 2023) para cálculos específicos.

Para realização do teste de estabilidade de agregados via úmida, as amostras foram passadas em peneira com malha de 4,76 mm, conforme princípio descrito por Kemper e Rosenau (1986) e realizado no aparelho de oscilação vertical em água descrito por Yoder (1936), durante 15 minutos a 42 rotações por minuto. Foi utilizado conjunto de peneiras com malhas de 2, 1, 0,5, 0,25 e 0,105 mm de diâmetro. Foi utilizado um padrão de aproximadamente 50 g para todas as amostras, que foram umedecidas previamente a tamisagem, também foi coleta amostra para teste de umidade e correção do peso da massa seca (EMBRAPA, 2017).

Após o peneiramento via úmida, foi quantificada a proporção de solo seco (105°C por 24 horas em estufa) contida em cada peneira e, por diferença, o que ultrapassou a última peneira (< 0,105 mm). Os valores obtidos foram usados para cálculo do diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados (Kemper & Rosenau, 1986), o diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados (Kemper & Rosenau, 1986) e o índice de estabilidade dos agregados (IEA) do solo (Castro Filho et al., 1998), conforme as fórmulas abaixo:

$$DMP = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$

Onde:

W_i = proporção de cada classe de agregados em relação ao total;

X_i = diâmetro médio de cada classe de agregados.

$$DMG = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \log x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right]$$

Onde:

W_i = peso de agregados (g) dentro de uma classe de agregados de diâmetro médio x_i .

$$IEA = \frac{Ps - wp25 - areia}{Ps - areia}$$

Onde:

Ps = peso da amostra seca (g);

$Wp25$ = peso dos agregados <0,25 mm (g).

As análises estatísticas foram conduzidas também utilizando o software Jamovi, versão 2.6.2. Inicialmente, foram realizados testes de normalidade pelo Shapiro-Wilk para cada variável dentro de cada horizonte, com nível de significância de 5%, seguida pela verificação do pressuposto de homogeneidade das matrizes de covariância pelo teste M de Box. Foi conduzida então, uma análise multivariada de variância (MANOVA) para avaliar o efeito do horizonte nas variáveis DMP, DMG e IEA, a MANOVA é particularmente útil quando se tem interesse em examinar os efeitos de variáveis independentes em mais de uma variável dependente ao mesmo tempo (Dugard et al., 2022). Esse teste foi escolhido pois ele estende a ANOVA tradicional ao permitir a análise de várias variáveis dependentes contínuas simultaneamente, fornecendo assim uma compreensão mais abrangente das diferenças de grupo (Harlow & Duerr, 2013).

Em seguida foi realizado testes univariados para determinação da existência de diferença significativa para cada variável e complementado por análises univariadas de variância (ANOVA de Welch). Para as variáveis com efeito significativo da ANOVA, foram realizadas comparações múltiplas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), visando identificar diferenças estatisticamente significativas entre os horizontes.

3. Resultados e Discussão

Os resultados da análise granulométrica revelaram padrões distintos entre os horizontes avaliados. O teste MANOVA indicou diferenças significativas na composição textural entre os horizontes (Pillai's trace = 1,62; $F = 5,64$; $p < 0,001$), com confirmação univariada para todas as frações: areia ($F=69,2$; $p < 0,001$), silte ($F=14,2$; $p < 0,001$) e argila ($F=82,8$; $p < 0,001$) conforme observados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Testes multivariados e univariados para textura do solo.

		valor	F	gl1	gl2	p
Horizonte	Traço de Pillai	1.62	5.64	15	72	<.001
	Lambda de Wilks	0.00839	19.0	15	61	<.001

Variável dependente		Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Horizonte	Areia	940.3	5	188.053	69.2	<.001
	Silte	279.9	5	55.980	14.2	<.001
	Argila	289.9	5	57.973	82.8	<.001
Resíduos	Areia	65.2	24	2.717		
	Silte	94.8	24	3.950		
	Argila	16.8	24	0.700		

P <.001 representa diferença estatisticamente representativa. Fonte: Dados da Pesquisa (2025).

As comparações pareadas pelo teste de Games-Howell permitiram identificar três grupos homogêneos: (i) os horizontes H3 e H4 não apresentaram diferenças significativas em nenhuma fração (areia: $p=0,890$; silte: $p=1,000$; argila: $p=0,836$), com diferença média inferior a 1,5% para todas as variáveis; (ii) os horizontes H5 e H6 também mostraram similaridade estatística ($p>0,05$ para todas as comparações), embora com variação marginalmente significativa na areia ($p=0,098$); e (iii) os demais pares de horizontes adjacentes (H1-H2, H2-H3 e H4-H5) apresentaram diferenças significativas ($p<0,05$) em pelo menos uma fração textural.

Os resultados das análises granulométricas e testes estatísticos revelaram padrões distintos entre os horizontes avaliados, permitindo inferências sobre sua classificação e possíveis agrupamentos exclusivamente com base na textura do solo. Esses resultados sugerem que, do ponto de vista textural, H3-H4 e H5-H6 poderiam ser tratados como unidades únicas em estudos futuros, otimizando esforços amostrais. Entretanto, é importante ressaltar que essa sugestão de agrupamento se limita à granulometria, e outros atributos pedológicos devem ser rigorosamente avaliados antes de consolidar essa proposta.

Propriedades como análises químicas fornecem informações sobre a fertilidade do solo e os processos de intemperismo (Almeida et al., 2021), características morfológicas e parâmetros físicos como o arranjo das partículas do solo em agregados afeta a porosidade e a permeabilidade, que são essenciais para reconhecer diferentes horizontes (McFadden, 2013), além de variações na cor que podem indicar o conteúdo de matéria orgânica e a composição mineral, auxiliando na diferenciação do horizonte (Thoresen et al., 2021), entre outros atributos que podem revelar diferenças críticas entre horizontes estatisticamente similares em textura.

Portanto, recomenda-se que estudo futuros validem o agrupamento proposto com análises complementares (químicas, físicas e mineralógicas) e incluam avaliações morfológicas detalhadas em campo para verificar a continuidade pedogenética. Essa abordagem multifatorial garantirá que a simplificação proposta não negligencie aspectos essenciais para a classificação e interpretação pedológica. A textura, embora fundamental, é apenas uma das variáveis que definem a identidade de um horizonte.

Para avaliação da estabilidade dos agregados, a análise multivariada de variância (MANOVA) foi realizada para avaliar o efeito dos horizontes sobre as variáveis DMP, DMG e IEA. A MANOVA identificou um efeito significativo do horizonte sobre as variáveis combinadas (Traço de Pillai = 1,23; $F(15, 72) = 3,35$; $p < 0,001$), esse resultado pode ser observado na tabela 3,

contudo, nos testes univariados o IEA não apresentou diferença estatisticamente significativa ($p = 0,073$). Isso sugere que, quando as variáveis foram analisadas de forma conjunta, o horizonte do solo não apresentou um efeito claro sobre o índice de estabilidade dos agregados, indicando que o efeito do horizonte no IEA poderia ser influenciado por interações com as outras variáveis (DMP e DMG) ou por variabilidade entre as amostras.

Tabela 3 - Testes multivariados e univariados (MANOVA) para atributos da estabilidade.

		valor	F	gl1	gl2	p
Horizonte	Traço de Pillai	1.23	3.35	15	72	<.001

	Variável dependente	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Horizonte	DMP	0.3146	5	0.06292	7.09	<.001
	DMG	0.0203	5	0.00405	6.30	<.001
	IEA	434.3960	5	86.87921	2.33	0.073
Resíduos	DMP	0.2130	24	0.00888		
	DMG	0.0154	24	6.43e-4		
	IEA	892.9931	24	37.20805		

P <.001 representa diferença estatisticamente representativa. Fonte: Dados da Pesquisa (2025).

A análise de variância (ANOVA de Welch) indicou diferenças estatisticamente significativas entre os horizontes para o diâmetro médio ponderado (DMP; $F(5, 11) = 10,21$; $p < 0,001$), diâmetro médio geométrico (DMG; $F(5, 11,1) = 6,47$; $p = 0,005$) e índice de estabilidade de agregados (IEA; $F(5, 10,9) = 7,41$; $p = 0,003$). O teste post hoc de Tukey revelou que o horizonte H1 apresentou valores de DMP significativamente superiores em relação aos demais horizontes (H2 a H6), com diferenças médias variando de 0,1888 a 0,307 mm ($p < 0,05$), formando um grupo estatisticamente distinto.

Para o DMG, H1 também se destacou com valores significativamente maiores em relação aos horizontes H2, H3, H4 e H5, enquanto a comparação com H6 apresentou valor de p limítrofe ($p = 0,051$). Esses resultados indicam que o horizonte superficial (H1) possui maior estabilidade estrutural, conforme evidenciado pelos maiores diâmetros médios dos agregados. Esses resultados evidenciam que a estabilidade dos agregados é maior nos horizontes superficiais e tende a decrescer nos horizontes subsuperficiais do solo estudado, refletindo mudanças nos atributos físicos ao longo do perfil.

A estabilidade dos agregados nos horizontes da superfície é influenciada por vários fatores, os principais contribuintes incluem o conteúdo de matéria orgânica que desempenha um papel significativo na ligação das partículas do solo, aumentando a estabilidade dos agregados por meio da atividade microbiana e da produção de materiais de ligação (Siebers et al., 2024) e a composição da argila que contribui para o aumento da estabilidade, devido à sua capacidade de formar fortes ligações com a matéria orgânica e outros componentes do solo (Kodešová et al., 2009). Pode-se assumir que provavelmente a matéria orgânica teve forte influência para agregação do horizonte H1, visto que ele apresentou menor teor de argila em relação aos demais horizontes.

Para o IEA, embora a ANOVA tenha indicado diferença significativa entre os horizontes, sugerindo que, ao considerar cada variável de forma independente, o horizonte do solo influencia a estabilidade dos agregados. No entanto, ao realizar as comparações múltiplas utilizando o teste de Tukey, não foram observadas diferenças significativas entre os horizontes para o

IEA ($p > 0,05$). Esses resultados indicam que, embora a ANOVA tenha detectado uma diferença global entre os horizontes, as comparações de pares individuais não identificaram quais horizontes se diferenciavam em termos de estabilidade de agregados, corroborando com a análise univariada da MANOVA.

4. Conclusão

Os resultados indicam que a estabilidade de agregados do solo é influenciada pelos diferentes horizontes. A análise multivariada de variância (MANOVA) revelou uma diferença significativa entre os horizontes do solo quando as três variáveis dependentes (diâmetro médio ponderado - DMP, diâmetro médio geométrico - DMG e índice de estabilidade de agregados - IEA) foram analisadas em conjunto (Traço de Pillai = 1,23; $F(15, 72) = 3,35$; $p < 0,001$). No entanto, as análises post-hoc realizadas com o teste de Tukey não identificaram diferenças claras entre os horizontes para o IEA, indicando que, apesar de haver uma diferença geral, as comparações específicas não evidenciaram quais horizontes diferem significativamente entre si para IEA.

Com base nesses resultados, foi possível identificar que o horizonte superficial (H1) apresentou os maiores valores médios de DMP e DMG, sendo estatisticamente superior aos demais horizontes analisados, indicando que o H1 possui a maior estabilidade de agregados entre os horizontes avaliados, o que pode estar relacionado à maior presença de matéria orgânica, maior atividade biológica e melhor estrutura física do solo nesta camada.

A diferença entre os resultados da MANOVA e do teste de Tukey enfatiza a complexidade do IEA, que, embora sensível a variações gerais entre os horizontes, não foi capaz de identificar diferenças específicas nas comparações múltiplas. Portanto, o IEA deve ser interpretado com cautela quando analisado isoladamente. Para uma avaliação mais robusta da estabilidade de agregados, é recomendável considerar o IEA em conjunto com o DMP e o DMG, pois essas variáveis, quando analisadas conjuntamente, fornecem uma compreensão mais completa da dinâmica da estabilidade dos agregados nos diferentes horizontes do solo.

Pode-se inferir que a estabilidade dos agregados é influenciada pelos horizontes do solo, mas a análise multivariada sugere que o efeito sobre o IEA é complexo e que uma análise conjunta das variáveis DMP, DMG e IEA é fundamental para uma avaliação mais precisa e robusta da estabilidade dos agregados no solo. A partir disso, conclui-se que a estabilidade de agregados no Latossolo Amarelo avaliado é influenciada pela profundidade, sendo o horizonte superficial o mais estável, enquanto os horizontes subsuperficiais e profundos (especialmente H5 e H6) apresentaram menor estabilidade estrutural. Esse padrão reforça a importância de considerar a variabilidade vertical do solo em estudos de estrutura e conservação.

Agradecimentos

Agradecimento ao Laboratório de Física do Solo – LAFIS e a Faculdade de Agronomia e Zootecnia – FAAZ da Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, pelo fornecimento de apoio e conceder a infraestrutura necessária para realização do estudo.

Referências

- Akamine, C. T., & Yamamoto, R. K. (2009). *Estudo dirigido: Estatística descritiva* (3ª ed). Editora Érica.
- Almeida, C. C., Fontes, M. P. F., Dias, A. C., Pereira, T. T. C., & Ker, J. C. (2021). Mineralogical, chemical and electrochemical attributes of soils. *Scientia Agricola*, 78(6), e20200071. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2020-0071>
- Bekman, O. R., & Costa Neto, P. L. de O. (2009). *Análise estatística da decisão* (2ª ed). Editora Blucher.
- Blanco, H., & Lal, R. (2023). Soil and Water Management. Em H. Blanco & R. Lal, *Soil Conservation and Management* (p. 1–22). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30341-8_1

- Castro Filho, C., Muzilli, O., & Podanoschi, A. L. (1998). Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22(3), 527–538. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000300019>
- Cruz, D. L. D. S., Vale Júnior, J. F. D., Timoni Buchdid Camargo Neves, L., Milanez Tosin Lima, J., De Brito Carvalho, L., & De Lima Coutinho, O. (2024). Aggregate Stability Of An Ultisol In Regions Of The Brazilian Amazon. *Revista de Agricultura Neotropical*, 11(4). <https://doi.org/10.32404/rean.v11i4.8763>
- Dugard, P., Todman, J., & Staines, H. (2022). Multivariate analysis of variance (MANOVA). Em P. Dugard, J. Todman, & H. Staines, *Approaching Multivariate Analysis* (2º ed, p. 55–82). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003343097-3>
- EMBRAPA, E. B. de P. A. (2017). *Manual de métodos de análise de solo* (3º ed). <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>
- Fox, J., & Weisberg, S. (2023). *Car: Companion to Applied Regression* [Software]. <https://cran.r-project.org/package=car>.
- Gil, A. C. (2017). *Como elaborar projetos de pesquisa* (6º ed). Editora Atlas.
- Harlow, L. L., & Duerr, S. R. (2013). Multivariate Analysis of Variance. Em T. Teo (Org.), *Handbook of Quantitative Methods for Educational Research* (p. 123–143). SensePublishers. https://doi.org/10.1007/978-94-6209-404-8_6
- Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate Stability and Size Distribution. Em A. Klute (Org.), *SSSA Book Series* (p. 425–442). Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>
- Khomiakov, D. M. (2020). Soil Is an Essential Component of the Biosphere and the Global Food System (Critical Assessment of the Situation). *Moscow University Soil Science Bulletin*, 75(4–5), 147–158. <https://doi.org/10.3103/S0147687420040055>
- Kodešová, R., Rohošková, M., & Žigová, A. (2009). Comparison of aggregate stability within six soil profiles under conventional tillage using various laboratory tests. *Biologia*, 64(3), 550–554. <https://doi.org/10.2478/s11756-009-0095-6>
- Ma, F., Liu, L., Han, X., Wang, Y., Wan, H., Xia, J., & Lu, X. (2024). Using a novel vector length stability index (VLSI) to evaluate soil aggregate stability: A preliminary study. *CATENA*, 240, 107995. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107995>
- McFadden, L. (2013). Paleosols and wind-blown sediments | Soil Morphology in Quaternary Studies. Em *Encyclopedia of Quaternary Science* (p. 402–411). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53643-3.00150-3>
- Monteith, S., Seybold, C., & Nelson, K. (2024). A practical, reproducible laboratory method for assessing soil aggregate stability. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 7(4), e70014. <https://doi.org/10.1002/agg2.70014>
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. Editora da UAB/NTE/UFSM. <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/15824>
- Poelau, C., Riefling, T., Schiedung, M., & Anlauf, R. (2024). Land use and soil property effects on aggregate stability assessed by three different slaking methods. *European Journal of Soil Science*, 75(4), e13549. <https://doi.org/10.1111/ejss.13549>
- R, C. T. (2023). *R: A Language and environment for statistical computing* (Versão 4.3) [Software]. <https://cran.r-project.org>
- Santos, H. G. dos, Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C. dos, Oliveira, V. Á. de, Lumberras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A. de, Filho, J. C. de A., Oliveira, J. B. de, & Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos* (5º ed). Embrapa.
- Shitsuka, R., Shitsuka, R. I. C. M., Shitsuka, D. M., & Shitsuka, C. D. W. M. (2014). *Matemática fundamental para tecnologia*. Editora Erica.
- Shukla, K. (2018). A Review Analysis on the Role of Soils in Watershed Management. *Journal of Geotechnical Engineering*, 5(1), 23–29.
- Siebers, N., Voggenreiter, E., Joshi, P., Rethemeyer, J., & Wang, L. (2024). *Synergistic relationships between the age of soil organic matter, Fe speciation, and aggregate stability*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-5851>
- Singh, V. (2024). Land and Soil Resources. Em V. Singh, *Textbook of Environment and Ecology* (p. 123–141). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8846-4_8
- The jamovi project* (Versão 2.5). (2024). [Software]. <https://www.jamovi.org>.
- Thoresen, K., Chandler, K. L., & Mary, W. (2021). *The Earth Beneath Our Feet: An earth science unit for high-ability learners in grades 3-4* (1º ed). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003238775>
- Van Den Bergh, S. G., Chardon, I., Leite, M. F. A., Korthals, G. W., Mayer, J., Coughon, M., Reheul, D., De Boer, W., & Bodelier, P. L. E. (2024). Soil aggregate stability governs field greenhouse gas fluxes in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 191, 109354. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109354>
- Vieira, S. (2021). *Introdução a Bioestatística* (6º ed). Grupo Gen.
- Yoder, R. E. (1936). A Direct Method of Aggregate Analysis of Soils and a Study of the Physical Nature of Erosion Losses¹. *Agronomy Journal*, 28(5), 337–351. <https://doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>