

Campo Grande, MS / Maio, 2026

## Equações para predição do carbono total nos solos do bioma Cerrado Sul-Mato-Grossense

Ademir Fontana<sup>(1)</sup>, Manuel Cláudio da Motta Macedo<sup>(2)</sup>, Felipe Martini Santos<sup>(3)</sup>, Viviana Meneghini<sup>(4)</sup>, Fabiano de Carvalho Balieiro<sup>(5)</sup>, Alexandre Romeiro de Araújo<sup>(6)</sup>, Michely Tomazi<sup>(7)</sup>, Júlio César Salton<sup>(8)</sup>, Lenise Castilho Monteiro<sup>(9)</sup>

<sup>(1)</sup> Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS. <sup>(2)</sup> Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS. <sup>(3)</sup> Engenheiro-florestal, doutor em Ciências Ambientais e Florestais, professor da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Aquidauana, MS. <sup>(4)</sup> Engenheira-agrônoma, estudante de doutorado da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP. <sup>(5)</sup> Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ. <sup>(6)</sup> Zootecnista, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS. <sup>(7)</sup> Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS. <sup>(8)</sup> Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS. <sup>(9)</sup> Engenheira-agrônoma; doutora em Produção Vegetal, analista técnica do Serviço Nacional de Aprendizagem Rural, Campo Grande, MS.

OBJETIVOS DE  
DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL



**Embrapa Gado de Corte**  
Av. Rádio Maia, 830 - Zona Rural  
Campo Grande, MS, 79106-550  
www.embrapa.br/gado-de-corte  
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Alessandra Corallo Nicacio

Secretário-executivo

Rodrigo Carvalho Alva

Membros

Filipe Toscano de Brito S. Corrêa

Dalizia Montenegro de Aguiar

Lenita Ramires dos Santos

Liana Jank

Rodiney de Arruda Mauro

Jacqueline Cavalcante Barros

Flábio Ribeiro de Araújo

Marcio Martinello Sanches

Guilherme Cunha Malaífa

Edição executiva

Rodrigo Carvalho Alva

Revisão de texto

Rodrigo Carvalho Alva

Normalização bibliográfica

Autor principal

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Rodrigo Carvalho Alva

Tiragem: Publicação digital: PDF

Todos os direitos  
reservados à Embrapa.

**Resumo** – A quantificação do carbono (C) no solo pode ser feita por diversos métodos, como a combustão seca (via seca), que determina o C total e, a oxidação úmida (via úmida), que determina o C orgânico (C org). O método via seca determina o C presente em estruturas inorgânicas (carbonatos e/ou bicarbonatos) juntamente com as orgânicas (carvão, raízes, folhas e galhos e, o húmus). O método via úmida, que é o método mais utilizado nos laboratórios brasileiros, determina o C das estruturas orgânicas facilmente oxidáveis como o húmus. Este trabalho tem por objetivo desenvolver equações para a predição do C total a partir do C org para solos do bioma Cerrado no estado de Mato Grosso do Sul. Foram obtidas amostras de solo nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm de solos com variação de classe de textura, uso com vegetação natural ou cultivo agrícola em diferentes arranjos, como: pastagem em monocultivo contínuo (*Brachiarias* e *Panicum*), culturas anuais de grãos (soja/milho em cultivos contínuos), sistemas integrados (Integração Lavoura-Pecuária-Floresta - ILPF, Integração Pecuária-Floresta - IPF e Integração Lavoura-Pecuária - ILP). Foram determinados os teores de C total e C org, e na sequência calibradas e validadas as funções para predição do C total. Os teores de C org entre 1,6 a 26,5 g kg<sup>-1</sup> são inferiores aos teores de C total (1,9 a 35,4 g kg<sup>-1</sup>). A taxa de recuperação com média de 80% (36 a 121%), sendo a maioria entre 65 e 95%. O fator de correspondência do C org para o C total tem média de 1,27 (0,83 a 2,78). Diversas equações têm elevada precisão para predição dos teores de C total a partir do C org, com destaque, para a equação geral F5 (C total = 1,3199 x C org - 0,3242), que é independente das camadas de solo até a profundidade de 40 cm, uso ou cultivo e textura do solo. As equações são recomendadas para solos sem observação evidente de carbonatos e/ou bicarbonatos, bem como, para locais em que a ocorrência de fogo é eventual e sob condições naturais do bioma Cerrado no estado de Mato Grosso do Sul.

**Termos para indexação:** Análise de carbono, carbono orgânico, correspondência nos teores de carbono.

### **Equations for predicting total soil carbon in the Cerrado biome of Mato Grosso do Sul**

**Abstract** – Soil carbon (C) quantification can be performed using various methods, such as dry combustion (dry method), which determines total C and, wet oxidation (wet method), which determines organic C. The dry method determines the C present in inorganic structures (carbonates and/or bicarbonates) along with organic structures (charcoal, roots, leaves and branches, and humus). The wet method, which is the most widely used method in Brazilian laboratories, determines the C in easily oxidizable organic structures such as humus. This work aims to develop equations for predicting total C from organic C in soils of the Cerrado biome in the state of Mato Grosso do Sul. Soil samples were obtained from the 0-10, 10-20, 20-30, and 30-40 cm layers of soils with varying texture classes, land use with natural vegetation or agricultural cultivation in different arrangements, such as: continuous monoculture pasture (*Brachiaria* and *Panicum*), annual grain crops (soybean/corn in continuous cultivation), and integrated systems (Crop-Livestock-Forest Integration, Livestock-Forest Integration and Crop-Livestock Integration). Total C and organic C contents were determined, and subsequently, calibration functions for predicting total C were obtained. Organic C contents between 1.6 and 26.5 g kg<sup>-1</sup> are lower than total C contents (1.9 to 35.4 g kg<sup>-1</sup>). The average of recovery rate is 80% (36 to 121%), with most values between 65 and 95%. The average of correspondence factor of organic C to total C is 1.27 (0.83 to 2.78). Several equations have high accuracy for predicting total C content from organic C, notably the general equation (total C = 1.3199 x organic C - 0.3242), which is independent of soil layers up to a depth of 40 cm, land use or cultivation, and soil texture. These equations are recommended for soils without evident observation of carbonates and/or bicarbonates, as well as for locations where fire is occasional and under the natural conditions of the Cerrado biome in the state of Mato Grosso do Sul.

**Index Terms:** Carbon analysis, organic carbon, correspondence in carbon content.

### **Introdução**

A comparação e correspondência dos teores de carbono (C) obtidos por diferentes métodos é uma prerrogativa para as avaliações do componente orgânico no solo. Essa condição visa atender diferentes expectativas, como a possibilidade do monitoramento do C para fins da qualificação do manejo, tipos de cultivo e/ou arranjos de cultivo, bem como, a quantificação para avaliação do balanço de C pelos cultivos agrícolas, visando atender ao emergente mercado ou crédito de C.

O C no solo, pode compor estruturas minerais - C inorgânico, como os carbonatos ou bicarbonatos e, estruturas orgânicas - C orgânico, como os resíduos de animais e plantas em diversas fases de transformação ou humificação (húmus) e ainda o carvão (carbono pirogênico, *biochar* ou biocarvão) (Guerra e Santos, 2008; Fontana e Bianchi, 2017).

Para a determinação conjunta do C inorgânico e C orgânico, ou seja, o C total, destaca-se o método da combustão seca (via seca) em autoanalisadores elementares, como o equipamento CHNS/O e TOC. Contudo, inclui-se os métodos que aplicam técnicas de detecção proximal, como a espectroscopia de infravermelho, incluindo infravermelho próximo (NIR), infravermelho visível-próximo (Vis-NIR) e infravermelho médio (MIR); espectroscopia de quebra induzida por laser (LIBS); espalhamento inelástico de nêutron (INS) ou conhecido como análise de raios gama estimulada por nêutrons ou espectroscopia (FAO, 2020).

Quanto ao método que determina o C orgânico (C org), destaca-se a oxidação química (via úmida), onde aplica-se uma solução oxidante aos materiais orgânicos facilmente oxidáveis ou decomponíveis (húmus), não contabilizando o C de compostos inorgânicos ou recalcitrantes como o carvão e raízes, folhas e galhos, como nos métodos Embrapa - Walkley e Black modificado (Fontana; Campos, 2017) e Walkley e Black (Walkley; Black, 1934; FAO, 2020)..

Ao teor do C total, é de maneira geral igual ou superior ao C org, o que caracteriza a necessidade de equalização ou harmonização pela obtenção da correspondência direta ou por meio de equações matemáticas. Esta condição é relevante, especialmente quando a intenção é atender aos critérios de certificação e mercado de C, uma vez que, de um lado os parâmetros de referência utilizam o C total e por outro lado, o C org é aquele obtido na maioria dos laboratórios de rotina e comerciais do Brasil. Ademais, esses laboratórios contam com uma ampla quantidade de dados de C org, o que poderia ser utilizada para estabelecer padrões e os níveis de referência de C total nos solos em diferentes tipos de solo, uso ou cultivo e clima.



As áreas de vegetação natural contam com diferentes condições de conservação e fisiografias e, as áreas de cultivo com diferentes sistemas de produção, como: pastagem em monocultivo contínuo (braquiária e panicum), culturas anuais de grãos (soja/milho em cultivos contínuos), sistemas de integração (Integração Lavoura-Pecuária-Floresta - ILPF, Integração Pecuária-Floresta - IPF e Integração Lavoura-Pecuária - ILP), tempo de cultivo e disponibilidade de biomassa ou forragem e cobertura do solo (cultivo com pastagem) (Figura 2 e Tabela 1).



**Figura 2.** A e B: Pastagem braquiária: baixa e alta produção de forragem, respectivamente. C: Pastagem panicum - alta produção de forragem. D: Nativa – Cerrado strictu sensu. E: IPF – braquiária e eucalipto. F: ILP – braquiária e soja. G: ILPF – soja, braquiária e eucalipto. H: Anuais – soja/milho.

**Tabela 1.** Unidades produtivas com a descrição do município, tipo de solo, cultivo, idade, detalhes do tipo de cultivo, adubação, calagem e disponibilidade de biomassa.

UP	Município	Classe de solo	Cultivo	Idade		Pastagem	Grãos		Sistemas Integrados			Adubação			Produção de forragem e cobertura do solo	
				Anos	Espécie		Sistema de Plantio	Outras culturas	Pastagem/espécie	Grão/ Tipo	Floresta/ Tipo	Frequência	NPK	Calagem		
1	Ribas do Rio Pardo	RQ	IPF	10	panicum	panicum					Eucalipto			x	x	Baixa
2	Ribas do Rio Pardo	RQ	Pastagem	10	panicum									x		Baixa
3	Ribas do Rio Pardo	RQ	Pastagem	30	braquiária											Baixa
4	Ribas do Rio Pardo	RQ	IPF	4		braquiária					Eucalipto			x	x	Média
5	Selvíria	NV	ILP	10		braquiária				Soja				x	x	Alta
6	Selvíria	NV	ILP	7		braquiária				Soja				x	x	Alta
7	Selvíria	NV	Cerradão											x	x	
8	Selvíria	NV	ILP	10		panicum				Soja				x	x	Alta
9	Selvíria	RQ	Pastagem	25	braquiária											Baixa
10	Selvíria	RQ	ILP	15		braquiária				Soja				x	x	Alta
11	Selvíria	RQ	ILP	15		braquiária				Milho				x	x	Alta
12	Três Lagoas	RQ	Pastagem	5	braquiária								3 x ano	x		Alta
13	Três Lagoas	RQ	Pastagem	5	panicum								3 x ano	x		Alta
14	Três Lagoas	RQ	Pastagem	16	braquiária											Baixa
15	Santa Rita do Pardo	RQ	Cerrado													
16	Santa Rita do Pardo	RQ	Pastagem	3	braquiária											Alta
17	Santa Rita do Pardo	RQ	Pastagem	18	braquiária											Média
18	Santa Rita do Pardo	RQ	Pastagem	9	braquiária											Alta
19	Santa Rita do Pardo	RQ	Cerrado (24 anos)													
20	Santa Rita do Pardo	RQ	Pastagem	4	braquiária									x	x	Baixa
21	Santa Rita do Pardo	RQ	Pastagem	8	panicum									x	x	Média
22	Santa Rita do Pardo	RQ	Pastagem	2	braquiária									x	x	Média
23	Santa Rita do Pardo	RQ	Pastagem	8	braquiária									x	x	Alta

UP	Município	Classe de solo	Cultivo	Idade		Pastagem	Grãos		Sistemas Integrados			Adubação			Produção de forragem e cobertura do solo
				Anos	Espécie		Sistema de Plantio	Outras culturas	Pastagem/ espécie	Grão/ Tipo	Floresta/ Tipo	Frequência	NPK	Calagem	
24	Santa Rita do Pardo	RQ	Pastagem	6	braquiária								x		Alta
25	Santa Rita do Pardo	RQ	Pastagem	15	braquiária										Baixa
26	Santa Rita do Pardo	RQ	Pastagem	19	braquiária										Baixa
27	Paraíso das Águas	RQ	Soja	1		PD	Milheto							x	
28	Paraíso das Águas	RQ	Pastagem	3	braquiária									x	Alta
29	Paraíso das Águas	RQ	Pastagem	3	panicum									x	Média
30	Bandeirantes	RQ	IPF	13						braquiária		Eucalipto			Média
31	Bandeirantes	RQ	Cerrado												
32	Bandeirantes	RQ	Pastagem	20	braquiária										Alta
33	Bandeirantes	RQ	Pastagem	20	panicum										Alta
34	Bandeirantes	RQ	IPF	6						panicum		Eucalipto			Baixa
35	Bandeirantes	RQ	Pastagem	20	braquiária										Alta
36	Bandeirantes	RQ	Pastagem	20	braquiária										Alta
37	Bandeirantes	RQ	ILP	2						braquiária	Soja			x	Alta
38	Paraíso das Águas	RQ	ILP	9						panicum	Soja			x	Alta
39	Paraíso das Águas	RQ	ILP	13						braquiária	Soja			x	Média
40	Paraíso das Águas	RQ	ILP	7						braquiária	Algodão			x	Média
41	Paraíso das Águas	RQ	ILP	2						Mix (braquiária, panicum, estilósantes)	Soja			x	Baixa
42	Paraíso das Águas	RQ	ILP	7						Mix (braquiária, panicum, estilósantes)	Soja			x	Alta
43	Paraíso das Águas	RQ	ILPF	9						braquiária	Soja	Eucalipto		x	Média
44	Paraíso das Águas	RQ	Cerrado											x	
45	Paraíso das Águas	RQ	ILP	9						braquiária	Soja			x	Alta

UP	Município	Classe de solo	Idade		Cultivo	Pastagem		Grãos		Sistemas Integrados			Adubação			Produção de forragem e cobertura do solo
			Anos	Espécie		Sistema de Plantio	Outras culturas	Pastagem/espécie	Grão/Tipo	Floresta/Tipo	Frequência	NPK	Calagem			
46	Bandeirantes	RQ	Pastagem	20	braquiária										Alta	
47	Bandeirantes	RQ	Pastagem	3	braquiária										Média	
48	Bandeirantes	RQ	Pastagem	3	braquiária									x	Média	
49	Bandeirantes	RQ	ILP (sem pastejo)	3		braquiária				Soja					Média	
50	Bandeirantes	RQ	ILP (sem pastejo)	3		braquiária				Soja					Alta	
51	Bandeirantes	RQ	ILP (sem pastejo)	3		braquiária				Soja					Média	
52	Bandeirantes	RQ	ILP (sem pastejo)	3		braquiária				Soja					Média	
53	Bandeirantes	RQ	ILP (sem pastejo)	3		braquiária				Soja					Alta	
54	Dourados	LVd	Soja/Milho	27			PC	Aveia/trigo/braquiária/Nabo					Anual	x	x	
55	Dourados	LVd	Soja/Milho	27			SPD	Aveia/trigo/braquiária/Nabo					Anual	x	x	
56	Dourados	LVd	ILP	27						Soja			Anual	x	Alta	
57	Dourados	LVd	Pastagem	27	braquiária										Alta	
58	Dourados	LVd	Cerrado (campo sujo)													
59	Ponta Porã	LVd	Pastagem	10	braquiária										Média	
60	Ponta Porã	LVd	ILPF	10		braquiária				Soja	Eucaípto				Média	
61	Ponta Porã	LVd	ILP	10		braquiária				Soja					Média	
62	Ponta Porã	LVd	Soja/Milho	10			PC	Aveia/trigo/braquiária/Nabo								
63	Ponta Porã	LVd	Soja/Milho	10			SPD	Aveia/trigo/braquiária/Nabo								

UP	Município	Classe de solo	Idade		Cultivo	Pastagem		Grãos		Sistemas Integrados				Adubação		Produção de forragem e cobertura do solo	
			Anos	Espécie		Sistema de Plantio	Outras culturas	Pastagem/espécie	Grão/Tipo	Floresta/Tipo	Frequência	NPK	Calagem				
64	Ponta Porã	LVd	Pastagem	15	panicum											x	Média
65	Ponta Porã	LVd	Pastagem	15	braquiária											x	Média
66	Maracaju	RL	SAF	3													
67	Maracaju	LVd	Soja/Milho	20		SPD	braquiária									x	
68	Ribas do Rio Pardo	RQ	Pastagem	4	braquiária									Anual	x	x	Alta
69	Ribas do Rio Pardo	RQ	Pastagem	3	braquiária									Anual	x	x	Alta
70	Ribas do Rio Pardo	RQ	Pastagem	30	braquiária												Baixa
71	Ribas do Rio Pardo	RQ	Pastagem		braquiária									Anual	x	x	Alta
72	Ribas do Rio Pardo	RQ	Pastagem	12	braquiária									Anual	x	x	Média
73	Ribas do Rio Pardo	RQ	Cerrado														
74	Ribas do Rio Pardo	RQ	Pastagem	8	braquiária									Anual	x	x	Alta
75	Ribas do Rio Pardo	RQ	Pastagem		braquiária									Anual	x	x	Média
76	Ribas do Rio Pardo	RQ	Pastagem		braquiária									Anual	x	x	Alta
77	Campo Grande	LV	Cerrado														
78	Campo Grande	LV	Pastagem	29	braquiária												Baixa
79	Campo Grande	LV	Soja/Pousio	29		PC											
80	Campo Grande	LV	Soja	29		PD	braquiária										
81	Campo Grande	LV	Pastagem	29	braquiária												Média
82	Campo Grande	LV	ILPF (Lavourea)	13	braquiária									braquiária		Soja	Eucaípto
83	Campo Grande	LV	ILP (Pastagem)	29										braquiária		Soja	
84	Campo Grande	LV	Pastagem	40	braquiária												Alta
85	Campo Grande	LV	Cerrado														Alta

UP: Unidade Produtiva; RQ: Neossolo Quartzarênico; RL: Neossolo Litólico; NV: Nitossolo Vermelho; LV: Latossolo Vermelho; LVd: Latossolo Vermelho distrófico; ILPF: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta; IPF: Integração Pecuária-Floresta; ILP: Integração Lavoura-Pecuária; SAF: Sistema Agroflorestal; PD: Plantio Direto; PC: Sistema Plantio Direto; SPD: Sistema Plantio Direto; x: aplicação. Células em branco: dados e/ou informações não obtidos.

### Coleta e preparo das amostras deformadas de solo

A coleta de solo em cada UP ocorreu em área com aproximadamente 1 ha, com pelo menos 5 amostras simples para formar uma amostra composta. No caso de sistemas integrados com árvores (IPF ou ILPF), foi obtido a proporção de cada componente (árvores e pastagem/lavoura) e coletadas amostras simples na mesma proporção.

As amostras de solo deformadas foram obtidas com auxílio de trado holandês nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm.

Na sequência, as amostras de solo foram secas ao ar livre em casa de vegetação de vidro, maceradas manualmente e peneiradas em malha de 2,00 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA).

### Determinação das frações granulométricas e classes de textura

Uma amostra de TFSA foi pesada (20 g) e submetida a uma solução de hidróxido de sódio, com dispersão mecânica em agitador horizontal por 18 horas. Foram obtidas as frações: areia grossa (2 – 0,512 mm), areia fina (0,512 - 0,053 mm), silte (0,053 a 0,002 mm) e argila total (< 0,002 mm) (Donagemma et al., 2017). A partir dos teores das frações granulométricas foi obtido o grupamento textural, conforme descrito no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2025).

### Determinação do carbono orgânico (C org)

Uma amostra de TFSA foi pesada (0,5 g) e submetida a oxidação em 10 mL de solução com mistura de dicromato de potássio e ácido sulfúrico (solução sulfocrômica), associado com fonte de calor externa (chapa aquecedora). Caso observado a cor esverdeada dessa mistura (solo+solução), foi adicionado o mesmo volume da solução sulfocrômica até observar a oxidação da matéria orgânica pela cor amarelo-castanha (mistura solo+solução). Sendo considerado no cálculo do teor de C org. Este método é definido como método Embrapa, em função da adição da fonte de calor externa ao método proposto por Walkley e Black (1934).

Nesse método, o C presente nos compostos orgânicos (matéria orgânica) reage com o dicromato de potássio (oxidação) e assume-se que o dicromato reduzido equivale ao C org da amostra de solo. Como se trata de uma reação de oxirredução, a estequiometria contabiliza o número de elétrons transferidos para a matéria orgânica com valência média próxima a zero e, ao final da reação, todo o C oxidável será transformado em CO<sub>2</sub> (valência +4) (Walkley e Black, 1934).

A determinação do C org ocorre indiretamente em função da reação do C presente nos compostos orgânicos com o dicromato de potássio. O cálculo do teor de C org ocorre a partir do cálculo do volume de dicromato de potássio utilizado na oxidação da matéria orgânica, o qual é obtido pela diferença entre o volume de uma prova em branco e da amostra de solo, ambas pela titulação com a solução de sulfato ferroso amoniacal (Fontana; Campos, 2017).

### Determinação do carbono total (C total)

Uma amostra de solo macerada foi pesada (25 mg) e submetida à combustão com temperatura em torno de 1.000 °C em equipamento (auto)analisador elementar. Pela combustão, o C é convertido em CO<sub>2</sub>, sendo arrastado para fora da câmara de combustão por meio de um gás de transporte inerte, como o hélio, e passa através de uma coluna aquecida (em torno de 625 °C) de cobre de elevada pureza. O cobre tem a função de remover o oxigênio residual não consumido na combustão (Fontana e Bianchi, 2017).

Para a determinação do C total, o gás gerado na câmara de combustão (CO<sub>2</sub>) é separado em uma coluna de cromatografia gasosa, seguido da detecção por condutividade térmica e expresso diretamente de forma numérica em % (Fontana; Bianchi, 2017). O equipamento utilizado foi o CHNS/O (Perkin Elmer 2.400).

### Análise dos dados e obtenção (calibração) das equações de predição do C total

O número de dados varia devido a perda de amostras ao longo da preparação, assim como, da combinação de camadas para avaliação dos dados. Excepcionalmente, a camada de 30-40 cm tem o menor número de dados devido a inclusão para coleta ao longo do desenvolvimento do projeto.

Nos solos não foi observada a presença de carbonatos ou bicarbonatos, o que seria eliminado com tratamento químico com ácido forte diluído (Fontana; Bianchi, 2017). A presença de carvão não foi quantificada, uma vez avaliado a ocorrência de forma eventual e sem observação de prática de fogo nos cultivos agrícolas.

A calibração das funções foi feita com todos os dados analisados e contempla possível participação do C presente C em carbonatos, bicarbonatos e carvão, mesmo que em pouca quantidade.

Foi calculada a taxa de recuperação (TR%) considerando o C total como método de referência:

$$TR \% = 1 - \left[ \frac{(C \text{ total} - C \text{ org})}{C \text{ total}} \right] \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Em seguida, foi calculado o fator de correspondência ou fator de correção (FC) entre os métodos:

$$FC = \frac{C_{total}}{C_{org}} \quad \text{Eq. 2}$$

Para a calibração das equações de predição do C total foi utilizado o modelo linear do software R (R Core Team, 2022). Para a validação das equações propostas foi utilizado dados de uma base externa obtida na mesma região.

A avaliação do desempenho preditivo das equações teve como premissa a raiz quadrada média do erro (*root mean square error* - RMSE) e no coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{\text{ajus}}$ ). Quanto mais próximo de zero o RMSE, mais precisa são as previsões pelas equações. O  $R^2$  assume valores entre 0,0 e 1,0, onde um valor de 1,0 indica o ajuste perfeito.

$$RMSE = \left[ (1/N) \sum_{i=1}^N (C_{total_{pred,i}} - C_{total_{obs,i}})^2 \right]^{1/2}$$

Eq. 3

$$R^2_{\text{adj}} = 1 - \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (C_{total_{obs,i}} - C_{total_{pred,i}})^2}{\sum_{i=1}^N (C_{total_{obs,i}} - \bar{C}_{total})^2} \right) \frac{(N-1)}{(N-p)}$$

Eq. 4

em que:  $C_{total_{obs,i}}$ : i-ésimo valor observado,  $C_{total_{pred,i}}$ : i-ésimo valor previsto, N: número de observações, p: número de preditores.

### Validação das equações de predição do C total

A avaliação das equações de predição foi efetuada pela plotagem em uma linha 1:1 (linha de identidade) dos teores preditos do C total com os teores determinados do C total.

A precisão dos modelos lineares foi avaliada utilizando os gráficos de dispersão dos resíduos (observados menos previstos) versus os valores observados de C total.

A validação da equação selecionada foi feita com dados de C total determinados em amostras de solo externas, ou seja, que não fazem parte do conjunto de calibração (Tabela 2).

**Tabela 2.** Estatística descritiva dos atributos do solo para validação das equações independente das camadas até a profundidade de 40 cm.

Variável	Areia grossa	Areia fina	Areia total	Silte	Argila	C org	C total
	g kg <sup>-1</sup>						
Média	198	185	383	153	464	15,1	18,9
Erro padrão	42	47	86	28	63	2,1	2,6
Mediana	90	108	191	189	576	14,9	18,0
Moda	-	-	-	-	100	-	-
Desvio padrão	139	155	285	93	208	7,0	8,7
Curtose	-1,75	1,23	-0,19	-1,43	-0,27	-0,45	-0,54
Assimetria	0,48	1,59	1,06	-0,53	-1,03	-0,31	-0,08
Mínimo	71	70	160	10	100	2,5	4,1
Máximo	408	494	890	258	664	24,8	31,4
Contagem	11	11	11	11	11	11	11

C org: carbono orgânico; C total: carbono total.

## Resultados e discussão

### Desenvolvimento e validação das equações de predição do C total

Pela composição granulométrica é possível observar a grande variabilidade de solos, com destaque para a amplitude dos teores da areia total (87 a 946 g kg<sup>-1</sup>) e argila (40 a 740 g kg<sup>-1</sup>), enquanto, o silte tem a menor variação (0 a 288 g kg<sup>-1</sup>) (Tabela 3).

Esses teores de areia e argila expressam uma ampla faixa ou domínio para a qual as equações desenvolvidas a seguir podem ser aplicadas, exceto, para o silte. Especialmente para a argila, é o componente do solo mais utilizado para a obtenção das relações de causa-efeito para entender a expectativa de acúmulo de C e será abordado a seguir com avaliação da correlação dos teores de C total com o C org.

Os teores de C org são inferiores ao C total (Tabela 3), com os valores do C org entre 1,6 e 26,5 g kg<sup>-1</sup> (média = 7,6 g kg<sup>-1</sup>), enquanto, o C total com valores entre 1,9 e 35,4 g kg<sup>-1</sup> (média = 9,7 g kg<sup>-1</sup>). Os valores de ambos os tipos de C destacam uma faixa aparentemente estreita, contudo, atendem os locais de amostragem que contemplam ampla variação da vegetação natural preservada (Cerradão e *stricto sensu*) e em regeneração (Cerrado *stricto sensu* e Cerradão) e, cultivos agrícolas com arranjos de culturas de maior ocorrência em diferentes níveis de manejo e produtividade.

O valor da taxa de recuperação (TR) para o C org em detrimento ao C total tem média de 80% (36 a 121%) (Tabela 3), sendo a maioria entre 65 e 95%, enquanto, o fator de correspondência (FC = C total / C org) está entre 0,83 a 2,78 (maioria entre 1,00 e 1,87), com a média de 1,27, moda de 1,00 e mediana de 1,25.

Notadamente, tanto a TR, quanto o FC estão em consonância ao apresentado pelos proponentes do método via úmida, os quais determinaram a TR média de 76% (60 a 86%) e o FC de 1,32 (Walkley; Black, 1934).

Valores semelhantes e com média de 1,22 (1,16 a 1,23) foram obtidos para o FC na camada superficial de três tipos de solo (Cambissolo, Latossolo e Neossolo) em cultivo de eucalipto da região centro-leste do estado de Minas Gerais (Gatto et al., 2009).

Como forma de avaliar uma possível interferência da composição granulométrica do solo com a determinação dos tipos de C e uma possível diferenciação com a classe de textura, destaca-se a correlação linear, positiva e semelhante dos teores de C org e C total com a argila (0,72 e 0,71, respectivamente) (Figura 3).

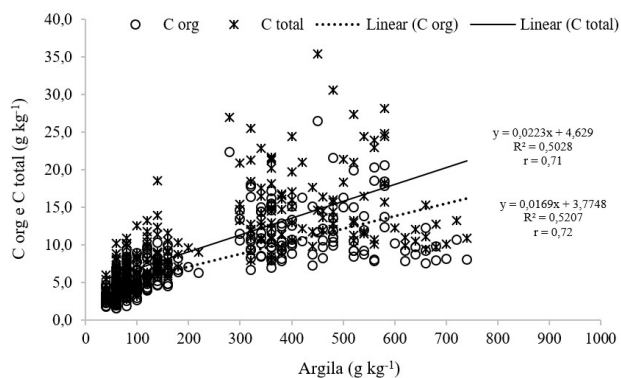
Além da semelhança nos valores da correlação dos tipos de C com a argila, destaca-se a semelhança dos valores do FC nas diferentes classes de textura, sendo, na textura arenosa 1,26, textura média 1,27, textura argilosa 1,31 e na textura muito argilosa 1,24.

Aos valores da correlação dos tipos de C com a argila, denota a influência da fração mais fina e reativa

**Tabela 3.** Estatística descritiva dos atributos do solo para calibração das equações independente das camadas até a profundidade de 40 cm.

Variável	Areia grossa	Areia fina	Areia total	Silte	Argila	C org	C total	TR	FC
	g kg <sup>-1</sup>								
Média	452	254	709	67	224	7,6	9,7	80	1,27
Erro padrão	11	8	14	4	11	0,3	0,4	0,77	0,01
Mediana	488	259	840	45	120	6,6	8,1	80	1,25
Moda	588	432	884	16	60	4,8	8,0	100	1,00
Desvio padrão	185	135	241	62	189	4,6	6,2	11	0,20
Curtose	-0,77	-0,60	-0,46	1,86	-0,48	1,61	1,81	1,74	12,82
Assimetria	-0,31	0,37	-0,95	1,52	0,90	1,26	1,34	0,14	2,19
Mínimo	47	34	87	0	40	1,6	1,9	36	0,83
Máximo	807	612	946	288	740	26,5	35,4	121	2,78
Contagem	284	284	284	284	284	284	284	280	284

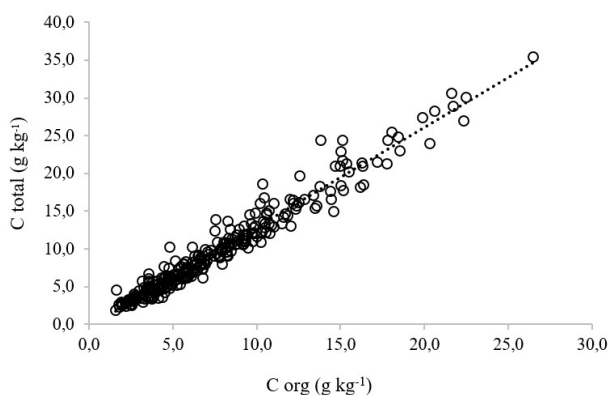
C org: carbono orgânico; C total: carbono total; TR: taxa de recuperação; FC: fator de correspondência ou conversão.



**Figura 3.** Dispersão dos teores de argila com o C org e C total de todas as amostras (n=284).

do solo para a manutenção ou estabilização da matéria orgânica no solo, que é obtida pelas interações pela formação de complexos organominerais e oclusão pela formação de agregados estáveis (Sollins et al., 1996; Baldock e Skjemstad, 2000; Six et al., 2000, 2002).

Na sequência, como forma inicial de avaliação da correspondência entre os tipos de C, destaca-se a correlação linear, positiva e significativa dos teores de C org com o C total ao nível satisfatório (valor de 0,98) (Figura 4).



**Figura 4.** Dispersão dos teores de C org com o C total de todas as amostras (n=284).

**Tabela 4.** Equações de regressão para predição dos teores de C total ( $\text{g kg}^{-1}$ ) a partir dos teores de C org ( $\text{g kg}^{-1}$ ) nos solos no bioma Cerrado Sul-Mato-Grossense.

Função	Camada	Equação	R <sup>2</sup>	RMSE	N	Condição
F1	0-10	$C \text{ total} = 1,315 \times C \text{ org} - 0,4717$	0,96	1,57	84	Geral
F2	10-20	$C \text{ total} = 1,3448 \times C \text{ org} - 0,3436$	0,94	1,46	84	Geral
F3	20-30	$C \text{ total} = 1,3324 \times C \text{ org} - 0,3943$	0,96	0,89	84	Geral
F4	30-40	$C \text{ total} = 1,3328 \times C \text{ org} - 0,3467$	0,97	0,83	32	Geral
F5	0-40	$C \text{ total} = 1,3199 \times C \text{ org} - 0,3242$	0,96	1,30	284	Geral
F6	0-20	$C \text{ total} = 1,3169 \times C \text{ org} - 0,3165$	0,95	1,53	168	Geral
F7	20-40	$C \text{ total} = 1,3332 \times C \text{ org} - 0,3859$	0,96	0,87	116	Geral

Esse valor é semelhante ao observado em outros trabalhos realizados no Brasil, como a correlação do C org obtido pelo método Walkley e Black (WB) com o C total para diferentes tipos de solo e camadas do solo entre 0,951 e 0,993 (Gatto et al., 2009) e para diferentes tipos de solo na camada de 0 a 20 cm de 0,925 (Sato et al., 2014).

Entre o C org obtido pelo método WB modificado e o C total para diferentes tipos de solo na camada de 0 a 20 cm o valor de 0,936 (Frattini; Kalckmann, 1997) e 0,936 (Sato et al., 2014) e, para diferentes tipos de solo, horizontes e classes texturais os valores entre 0,95 a 0,975 (Machado et al., 2003).

Notadamente, a correlação linear elevada, positiva e significativa entre os tipos de C (Figura 4) é indicativo de correspondência satisfatória e configura uma possível condição para a obtenção de funções (equações matemáticas) para a predição do C total a partir do C org.

Considerando essa possibilidade, são propostas equações para a predição dos teores de C total a partir dos teores de C org sob diferentes condições (Tabela 4). Algumas outras condições também foram avaliadas e envolvem a combinação de uso ou cultivo, camada e textura do solo, uso e camada do solo e, textura e camada do solo.

Na definição das equações também foi avaliado a influência de componentes presentes no solo que contém C, sendo especialmente, compostos recalcitrantes que podem superestimar o C total. Para o carvão, é relatado a ocorrência de fogo eventual, enquanto, para carbonatos ou bicarbonatos, sem observação evidente de rocha calcária ou outra alcalina, bem como da prática de calagem em grande quantidade.

Na sequência, tendo como base os valores do RMSE, todas as equações desenvolvidas têm boa precisão para a predição dos teores de C total (Tabela 4). Dessa forma, para as avaliações e validações

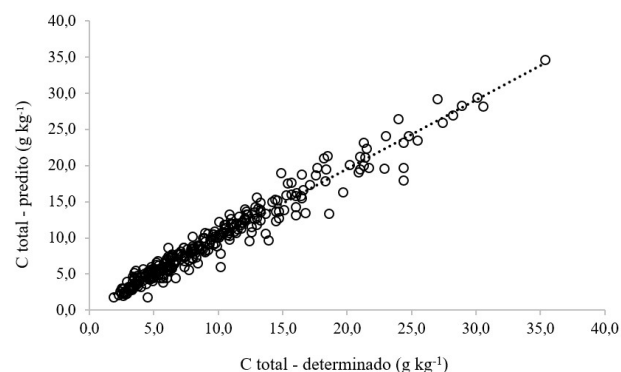
Função	Camada	Equação	R <sup>2</sup>	RMSE	N	Condição
F8	0-40	$C_{total} = 1,2814 \times C_{org} - 0,1309$	0,94	1,21	134	Pastagem
F9	0-40	$C_{total} = 1,3264 \times C_{org} - 0,6111$	0,92	1,61	31	Soja/Milho
F10	0-40	$C_{total} = 1,3313 \times C_{org} - 0,3957$	0,93	1,38	62	ILP
F11	0-40	$C_{total} = 1,162 \times C_{org} + 0,8466$	0,93	1,08	31	ILPF + IPF
F12	0-40	$C_{total} = 1,3866 \times C_{org} - 0,6185$	0,98	1,11	30	Cerrado
F13	0-40	$C_{total} = 1,2188 \times C_{org} + 0,1261$	0,84	0,83	148	Textura Arenosa
F14	0-40	$C_{total} = 1,249 \times C_{org} + 0,134$	0,91	1,54	53	Textura Média
F15	0-40	$C_{total} = 1,3639 \times C_{org} - 0,7199$	0,92	1,60	83	Textura Argilosa e Muito Argilosa

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMSE: g kg<sup>-1</sup>; N: número de amostras; C total: carbono total; C org: carbono orgânico; Geral: independentemente de uso ou cultivo, profundidade do solo e textura do solo.

a seguir foi selecionada a função mais generalista, a qual corresponde a F5 ( $C_{total} = 1,3199 \times C_{org} - 0,3242$ ) e também atende às diferentes camadas do solo até a profundidade de 40 cm, usos ou cultivos.

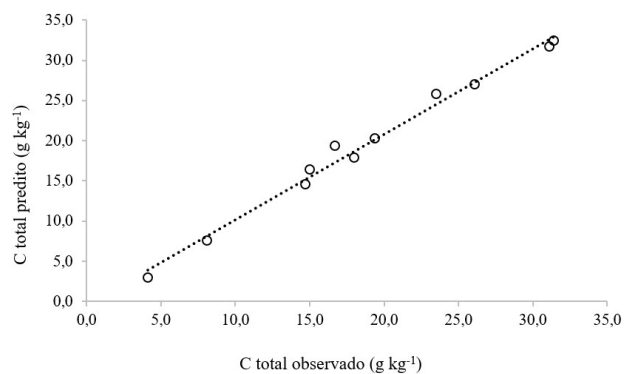
Diferentemente dos autores do método via úmida (Walkley; Black, 1934), o desenvolvimento e aplicação de equações para a predição do C total vai além de um FC generalizado e, mostra-se mais assertivo, pois considera as variações no entorno desse fator médio.

Ainda, como forma de avaliação da eficácia da predição do C total, destaca-se a dispersão e tendência entre os teores de C total observados pelos teores de C total preditos (Figura 5). Ademais, a validação com dados externos tem o valor do RMSE de 1,31 g kg<sup>-1</sup> e o R<sup>2</sup> ajustado de 0,99 (Figura 6). Quanto à dispersão dos teores de C total observados pelos resíduos, os valores também são satisfatórios (Figura 7).

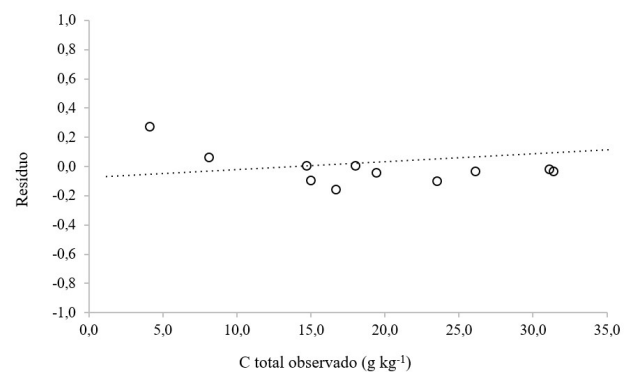


**Figura 5.** Teores de C total determinados vs preditos pela função F5 (n=284).

Em condição semelhante, Gatto et al. (2009) observaram os melhores ajustes e elevada precisão na função mais generalista, no caso, independentemente do tipo de solo e profundidade.



**Figura 6.** Teores de C total observados vs C total preditos pela função F5 com dados externos (validação).



**Figura 7.** Teores de C total observados vs resíduos pela função F5 com dados externos (validação).

### Utilização do fator de correspondência e das equações de predição

Quanto ao fator de correspondência (FC) de 1,27, é ligeiramente inferior ao valor de 1,32 proposto por Walkley e Black (1934). Essa diferença pode estar associada às características específicas dos solos tropicais avaliados, como menor presença de C recalcitrante e ausência de carbonatos e/ou bicarbonatos e, principalmente pela regionalização da amostragem de solo (tipo de vegetação natural e cultivos agrícolas) e variações na eficiência de oxidação da matéria orgânica pelo método modificado.

Diferentemente de utilizar um valor fixo do FC de 1,32, que de forma generalizada é amplamente aplicado, as equações desenvolvidas neste trabalho incorporam a variabilidade observada nos dados, proporcionando maior precisão na estimativa do C total para condições regionalizadas (bioma e cultivos).

A proposta de uso da equação geral (F5), permite a estimativa confiável do C total a partir do C org, que é o método amplamente utilizado em laboratórios brasileiros devido ao menor custo e maior operacionalidade.

Nesse contexto, a utilização da equação F5 possibilita o aproveitamento de bases de dados de C org para a estimativa do C total, ampliando o uso dessas informações em inventários de C, estudos de estoque de C e, principalmente, em programas de certificação e mercado de crédito de C.

Adicionalmente, a independência da equação F5 em relação à profundidade (diversas camadas até 40 cm), uso do solo e textura, confere elevada aplicabilidade, reduzindo a necessidade de calibrações específicas para diferentes condições edafoclimáticas dentro do bioma e regiões contempladas pelo estudo.

Embora o método via úmida não quantifique completamente formas mais recalcitrantes de C, como o C pirogênico (carvão), a baixa ocorrência desses compostos nas áreas avaliadas contribui para a forte correspondência entre os métodos. Além disso, a ausência de carbonatos e/ou bicarbonatos elimina a contribuição do C inorgânico para o C total, o que favorece uma relação mais direta entre os dois métodos. Esse conjunto de condições explica a consistência das equações, independentemente das classes de textura e sistemas de uso do solo.

Dessa forma, o uso de equações específicas representa um avanço metodológico em relação à aplicação de fatores constantes, pois reduz erros sistemáticos e aumenta a confiabilidade das estimativas, especialmente em condições regionais específicas como as do Cerrado Sul-Mato-Grossense.

### Conclusões

As equações têm elevada precisão para a predição dos teores de C total a partir do C org nos solos até 40 cm de profundidade para o bioma Cerrado Sul-Mato-Grossense.

A equação F5 ( $C_{total} = 1,3199 \times C_{org} - 0,3242$ ) pode ser utilizada para a predição do C total no solo independentemente da estratificação da coleta e avaliações em camadas até a profundidade de 40 cm, uso ou cultivo e textura do solo para o bioma Cerrado Sul-Mato-Grossense.

As equações são recomendadas para solos arenosos até muito argilosos, sem observação evidente de carbonatos e/ou bicarbonatos, bem como, para locais em que a ocorrência de fogo é eventual e associada às condições naturais do bioma Cerrado no estado de Mato Grosso do Sul.

### Agradecimentos

Esta pesquisa é desenvolvida com apoio do Projeto Rural Sustentável – Cerrado (Projeto P-001-MS-153), fruto da parceria entre o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), o Governo do Reino Unido, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS), a Embrapa e a Rede ILPF. Também à Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do ensino, Ciência e Tecnologia do estado de Mato grosso do Sul (Fundect), chamada 071/2022 MS Carbono Neutro.

### Referências

- BALDOCK, J. A.; SKJEMSTAD, J. O. Role of soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. **Organic Geochemistry**, [s. l.], v. 31, p. 697-710, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00049-8).
- DONAGEMMA, G. K. *et al.* Análise granulométrica. *In*: TEIXEIRA, P. C. *et al.* (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. pt. 1, cap. 10, p. 95-116. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/172279/1/Pt-1-Cap-10-Analise-granulometrica.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2024.
- FAO. **A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes**: GSOC-MRV protocol. Rome: FAO, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb0509en>.
- FONTANA, A.; BIANCHI, S. R. Carbono e nitrogênio total: analisador elementar. *In*: TEIXEIRA, P. C. *et al.*

(ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. pt. 3, cap. 4, p. 393-396. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/194460/1/Pt-3-Cap-4-Carbono-e-nitrogenio-total.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2024.

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. de. Carbono orgânico. In: TEIXEIRA, P. C. *et al.* (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 360-367. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/194453/1/Pt-3-Cap-1-Carbono-organico.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2024.

FRATTINI, C. T. A.; KALCKMANN, R. E. Correlação entre alguns métodos de determinação de carbono. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 2, p. 259-261, 1967.

GATTO, A. *et al.* Comparação de métodos de determinação do carbono orgânico em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 735-740, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000300026>.

GUERRA, J. G. M.; SANTOS, G. A. Métodos químicos e físicos. In: SANTOS, G. A. *et al.* (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 185-199.

IBGE. **Síntese Descrição Biomas**. Rio de Janeiro: IBGE, [20--]. Disponível em: [https://geofp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/estudos\\_ambientais/biomas/documentos/Sintese\\_Descricao\\_Biomas.pdf](https://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/estudos_ambientais/biomas/documentos/Sintese_Descricao_Biomas.pdf). Acesso em: 14 jul. 2025.

MACHADO, P. L. O. A.; CAMPOS, A. C.; SANTOS, F. S. **Métodos de preparo de amostras e de determinação de carbono em solos tropicais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. (Circular Técnica, 19). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/337126/1/circtec192003metodospreparo.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2026.

OLIVEIRA, V. A.; JACOMINE, P. K. T.; COUTO, E. G. Solos do Bioma Cerrado. In: CURI, N. *et al.* (ed.). **Pedologia: solos dos biomas brasileiros**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2017. p. 117-226.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical

Computing, 2022. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 6. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 393 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1176834/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em: 14 jul. 2025.

SATO, J. H. *et al.* Methods of soil organic carbon determination in Brazilian savannah soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, n. 4, p. 302-308, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0306>.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa Geológico do Estado de Mato Grosso do Sul**: escala 1:1.000.000. [Brasília]: CPRM, 2006.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 1042-1049, 2000. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431042x>.

SIX, J. *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 241, p. 155-176, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B. A. Stabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, [s. l.], v. 74, p. 65-105, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00036-5).

THEODOROVICZ, A. M.; THEODOROVICZ, A. Geodiversidade: adequabilidades/potencialidades e limitações frente ao uso e à ocupação. In: THEODOROVICZ, A. M.; THEODOROVICZ, A. (org.). **Geodiversidade do estado de Mato Grosso do Sul**. São Paulo: CPRM, 2010. p. 110-142. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/16734>. Acesso em: 7 abr. 2026.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, n. 1, p. 29-38, jan. 1934. DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.