



**BIOMASSA TOTAL NA SAVANA NEOTROPICAL:  
ESTIMATIVA DE ESTOQUES E MODELAGEM COM VARIÁVEIS EDÁFICAS**

**KENNEDY NUNES OLIVEIRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

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

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

**BIOMASSA TOTAL NA SAVANA NEOTROPICAL:  
ESTIMATIVA DE ESTOQUES E MODELAGEM COM  
VARIÁVEIS EDÁFICAS**

**KENNEDY NUNES OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: Dr. EDER PEREIRA MIGUEL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**PUBLICAÇÃO: PPGCFL.DM406.2026**  
**BRASÍLIA / DF: FEVEREIRO – 2026**

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

**BIOMASSA TOTAL NA SAVANA NEOTROPICAL:  
ESTIMATIVA DE ESTOQUES E MODELAGEM COM  
VARIÁVEIS EDÁFICAS**

**KENNEDY NUNES OLIVEIRA**

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

**APROVADA POR:**

---

**Dr. Eder Pereira Miguel, Universidade de Brasília (UnB)**  
**(ORIENTADOR)**

---

**Dra. Alba Valéria Rezende, Universidade de Brasília (UnB)**  
**(EXAMINADORA INTERNA)**

---

**Dr. Gileno Brito de Azevedo, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

---

**Dr. Mario Lima dos Santos, Serviço Florestal Brasileiro (SFB)**  
**(EXAMINADOR SUPLENTE)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 27 de FEVEREIRO de 2026.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

--

## REFERÊNCIA

OLIVEIRA, K.N. (2026). Biomassa total na Savana Neotropical: estimativa de estoques e modelagem com variáveis edáficas. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGCFL.DM406.2026. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 88 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Kennedy Nunes Oliveira

TÍTULO: Biomassa total na Savana Neotropical: estimativa de estoques e modelagem com variáveis edáficas

GRAU: Mestre

ANO: 2026

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

---

Kennedy N. Oliveira  
*kennedynuneso@gmail.com*

<sup>5</sup> Assim diz o Senhor: “Maldito é o homem que confia nos homens, que faz da humanidade mortal a sua força, mas cujo coração se afasta do Senhor. <sup>6</sup> Ele será como um arbusto no deserto, não verá quando vier algum bem. Habitará nos lugares áridos do deserto, numa terra salgada e inabitável. <sup>7</sup> Bendito é o homem que confia no Senhor, cuja confiança nEle está. <sup>8</sup> Ele será como uma árvore plantada junto às águas, que estende as suas raízes para o ribeiro, ela não temerá quando chegar o calor, porque as suas folhas estão sempre verdes. No ano da seca não se angustia e nunca deixará de dar fruto.” **Jr. 17**

Aos meus pais,  
Maria das N. N. Ferreira e,  
na esperança do reencontro,  
Ivanir R. Oliveira (*in memoriam*).  
**Dedico.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por manter viva, todos os dias, a esperança pela eternidade (Ec. 3:11; Dn 2).  
“Como posso retribuir toda a Sua bondade para comigo?” (Sl. 116:12).

Aos meus pais, Maria das N. N. Ferreira e Ivanir R. Oliveira (*i.m.*), por oferecer aquilo que um dia sequer tiveram e acreditarem em mim.

A minha eterna namorada, agora noiva, Ane Stefany S. V. Manso, por escolher compartilhar a vida comigo.

Aos familiares, que tanto amo e nunca deixarei de amar.

Aos amigos e colegas, espero ter sido verdadeiro.

A Universidade de Brasília (UnB), por ser uma das melhores do país e gratuita.

Aos professores do Depto. de Engenharia Florestal, a carreira de vocês me inspira.

Ao projeto EcoSiPas, nas pessoas de Aldicir O. Scariot, Eraldo A. T. Matricardi e Eder P. Miguel, pela oportunidade de intercâmbio na Alemanha.

Aos professores Dr. Eder P. Miguel (UnB), por me orientar, embora não saiba se conseguiu, e à Dra. Alba V. Rezende (UnB) e ao Dr. Gileno B. de Azevedo (UFMS), por dedicarem seu tempo e compartilharem seus conhecimentos na contribuição para o presente trabalho.

Minha mais sincera gratidão.

## RESUMO

### BIOMASSA TOTAL NA SAVANA NEOTROPICAL: ESTIMATIVA DE ESTOQUES E MODELAGEM COM VARIÁVEIS EDÁFICAS

**Autor:** Kennedy Nunes Oliveira

**Orientador:** Dr. Eder Pereira Miguel

**Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais**

**Universidade de Brasília (UnB)**

**Brasília, fevereiro de 2026**

No domínio da Savana Neotropical, poucos estudos estimaram os estoques totais de biomassa, em razão do caráter moroso e oneroso dessas estimativas, especialmente da biomassa abaixo do solo. Neste estudo, inventários florestais foram realizados em unidades amostrais temporárias de 1000 m<sup>2</sup> estabelecidas em áreas de cerrado sentido restrito e de Carrasco no Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil, com o objetivo de estimar e comparar os estoques totais e por compartimento de biomassa, bem como modelar a biomassa em áreas de cerrado sentido restrito a partir de variáveis estruturais e edáficas. Além da biomassa, foi caracterizada a florística de cada formação vegetal. A biomassa total (TB) considerou os estoques acima (AGB: biomassa lenhosa (AGWB), necromassa e serrapilheira) e abaixo do solo (BGB) (biomassa de raízes). A biomassa lenhosa foi estimada a partir de uma equação alométrica regional, considerando indivíduos com diâmetro basal medido a 0,3 m do solo  $\geq 5$  cm. As raízes foram quantificadas pelo método de trincheiras de 1 m<sup>3</sup>, subdivididas em cinco camadas iguais. A necromassa foi estimada pelo método da interseção de linha, considerando detritos com diâmetro  $\geq 3$  cm, e a serrapilheira foi coletada por meio de gabarito de 0,25 m<sup>2</sup>. No cerrado sentido restrito, a biomassa total foi de 45,24 Mg ha<sup>-1</sup>, com predominância da biomassa lenhosa (20,47 Mg ha<sup>-1</sup>; 45%), seguida das biomassas de raízes (18,47 Mg ha<sup>-1</sup>; 41%), serrapilheira (5,49 Mg ha<sup>-1</sup>; 12%) e necromassa (0,81 Mg ha<sup>-1</sup>; 2%). No Carrasco, a biomassa total foi de 59,01 Mg ha<sup>-1</sup>, dominada pela biomassa de raízes (32,37 Mg ha<sup>-1</sup>; 55%), seguida pela biomassa lenhosa (16,57 Mg ha<sup>-1</sup>; 28%) e pela serrapilheira (8,39 Mg ha<sup>-1</sup>; 14%) e necromassa (1,68 Mg ha<sup>-1</sup>; 3%). Apesar da elevada densidade de indivíduos lenhosos de pequeno diâmetro nas áreas de Carrasco, os indivíduos do cerrado sentido restrito contribuíram mais para o estoque total de biomassa por apresentarem maior diâmetro médio. Em contrapartida, o Carrasco investe mais na produção de biomassa radicular, em razão da elevada densidade de indivíduos e à sobreposição da malha de raízes, o que sugere limitações hídricas e nutricionais na subsuperfície, típicas de solos arenosos. As áreas de cerrado sentido restrito e Carrasco diferiram significativamente na composição florística, pela similaridade de Jaccard, e nos estoques de biomassa total, serrapilheira e biomassa de raízes, pelo teste da soma de postos de Wilcoxon, com nível de significância igual a 5%. A AGB, a AGWB e a necromassa foram semelhantes entre as formações vegetais. A razão raiz:biomassa lenhosa (BGB:AGWB) foi inferior a 1 no cerrado sentido restrito e superior a 1 no Carrasco, aproximando-se, respectivamente, a proporções observadas em savanas e em formações arbustivas e campestres ao redor do mundo. Para as áreas de cerrado sentido restrito, a biomassa foi modelada por unidade de área, de forma hierárquica, considerando biomassa total (TB: acima e abaixo do solo), biomassa total das árvores (TTB: AGWB + BGB) e biomassa lenhosa (AGWB). A seleção dos modelos foi baseada no menor Critério de Informação de Akaike (AIC) e a validação realizada via *bootstrap*. Como variáveis preditoras para a modelagem da biomassa foram consideradas variáveis físicas e químicas do solo e a área basal da vegetação lenhosa. O desempenho dos modelos foi avaliado por meio da correlação de Pearson entre valores observados e preditos ( $r_{py}$ ), que apresentou 0,76, 0,72 e 0,94 para TB = 24,522 + 3,081(G) - 90,831(Mg) + 21,727(AI), TTB = 29,083 + 2,781(G) - 86,823(Mg) e AGWB = 1,801 · G<sup>1,060</sup> · e<sup>(-1,483 · Mg + 0,006 · Areia)</sup>, respectivamente, e pela raiz do erro quadrático médio (RMSE), com valores de 24,40%, 27,06% e 18,10% para os mesmos níveis. A inclusão de variáveis químicas do solo, como alumínio e magnésio, e variáveis físicas, como teor de areia, melhorou as estimativas de biomassa por unidade de área, evidenciando vantagens importantes, pois reduz custos e tempo operacional, diminui a dependência taxonômica e incorpora aspectos relacionados às adaptações nutricionais da vegetação nativa aos solos característicos do bioma.

**Palavras-chave:** Cerrado, Carrasco, biomassa acima do solo, raiz, necromassa, serrapilheira

## ABSTRACT

### TOTAL BIOMASS IN THE NEOTROPICAL SAVANNA: STOCK ESTIMATION AND MODELING USING EDAPHIC VARIABLES

**Author:** Kennedy Nunes Oliveira  
**Supervisor:** Dr. Eder Pereira Miguel  
**Postgraduate Programme in Forest Sciences**  
**University of Brasília (UnB)**  
**Brasília, February 2026**

In the domain of the Neotropical Savanna, few studies have estimated total biomass stocks due to the time-consuming and costly nature of these estimations, especially for belowground biomass. In this study, forest inventories were conducted in temporary sample units of 1000 m<sup>2</sup> established in areas of cerrado sensu stricto and Carrasco in the North and Northwest of Minas Gerais State, Brazil, with the aim of estimating and comparing total and compartmental biomass stocks, as well as modeling biomass in cerrado sensu stricto areas based on structural and edaphic variables. In addition to biomass, the floristic composition of each vegetation formation was characterized. Total biomass (TB) considered both aboveground (AGB: woody biomass (AGWB), deadwood, and litter) and belowground stocks (BGB) (root biomass). Woody biomass was estimated using a regional allometric equation, considering individuals with basal diameter measured at 0.3 m above ground  $\geq 5$  cm. Roots were quantified using the 1 m<sup>3</sup> trench method, subdivided into five equal layers. Deadwood was estimated using the line-intersect method, considering debris with diameter  $\geq 3$  cm, and litter was collected using a 0.25 m<sup>2</sup> frame. In cerrado sensu stricto, total biomass was 45.24 Mg ha<sup>-1</sup>, with woody biomass predominating (20.47 Mg ha<sup>-1</sup>; 45%), followed by root biomass (18.47 Mg ha<sup>-1</sup>; 41%), litter (5.49 Mg ha<sup>-1</sup>; 12%), and deadwood (0.81 Mg ha<sup>-1</sup>; 2%). In Carrasco, total biomass was 59.01 Mg ha<sup>-1</sup>, dominated by root biomass (32.37 Mg ha<sup>-1</sup>; 55%), followed by woody biomass (16.57 Mg ha<sup>-1</sup>; 28%), litter (8.39 Mg ha<sup>-1</sup>; 14%), and deadwood (1.68 Mg ha<sup>-1</sup>; 3%). Despite the high density of small-diameter woody individuals in the Carrasco areas, individuals in cerrado sensu stricto contributed more to the total biomass stock due to their larger mean diameter. In contrast, Carrasco invests more in root biomass production due to the high density of individuals and the overlapping root network, which suggests water and nutrient limitations in the subsurface, typical of sandy soils. The cerrado sensu stricto and Carrasco areas differed significantly in floristic composition, according to the Jaccard similarity index, and in total biomass, litter, and root biomass stocks, according to the Wilcoxon rank-sum test, with a significance level of 5%. AGB, AGWB, and deadwood were similar between the vegetation formations. The root-to-woody biomass ratio (BGB:AGWB) was below 1 in cerrado sensu stricto and above 1 in Carrasco, approximating, respectively, proportions observed in savannas and in shrubland and grassland formations worldwide. For cerrado sensu stricto areas, biomass was modeled per unit area hierarchically, considering total biomass (TB: above- and belowground), total tree biomass (TTB: AGWB + BGB), and woody biomass (AGWB). Model selection was based on the lowest Akaike Information Criterion (AIC), and validation was performed via bootstrap. Predictor variables for biomass modeling included soil physical and chemical variables and the basal area of woody vegetation. Model performance was assessed using Pearson correlation between observed and predicted values ( $r_{\hat{y}_y}$ ), which were 0.76, 0.72, and 0.94 for TB =  $24.522 + 3.081(G) - 90.831(\text{Mg}) + 21.727(\text{Al})$ , TTB =  $29.083 + 2.781(G) - 86.823(\text{Mg})$ , and AGWB =  $1.801 \cdot G^{1.060} \cdot e^{(-1.483 \cdot \text{Mg} + 0.006 \cdot \text{Areaia})}$ , respectively, and by the root mean square error (RMSE), with values of 24.40%, 27.06%, and 18.10% for the same levels. The inclusion of soil chemical variables, such as aluminum and magnesium, and physical variables, such as sand content, improved biomass estimates per unit area, highlighting important advantages, as it reduces costs and operational time, decreases taxonomic dependence, and incorporates aspects related to the nutritional adaptations of native vegetation to the characteristic soils of the biome.

**Keywords:** Cerrado, Carrasco, aboveground biomass, root, deadwood, litter

## SUMÁRIO

	<b>RESUMO .....</b>	<b>viii</b>
	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>QUESTÕES DE PESQUISA .....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1</b>	<b>Geral .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2</b>	<b>Específicos .....</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1</b>	<b>CERRADO .....</b>	<b>17</b>
4.1.1	Cerrado sentido restrito .....	18
4.1.2	Variáveis edáficas.....	18
<b>4.2</b>	<b>CARRASCO .....</b>	<b>20</b>
<b>4.3</b>	<b>BIOMASSA FLORESTAL .....</b>	<b>20</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Métodos diretos de determinação da biomassa .....</b>	<b>21</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Métodos indiretos de estimativa da biomassa.....</b>	<b>22</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>23</b>
	<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>29</b>
	<b>BIOMASSA TOTAL EM ÁREAS DE CERRADO E CARRASCO NO DOMÍNIO DA SAVANA NEOTROPICAL.....</b>	<b>29</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>31</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
<b>2.1</b>	<b>Área de estudo .....</b>	<b>32</b>
<b>2.2</b>	<b>Coleta de dados .....</b>	<b>34</b>
2.2.1	Inventário Florestal.....	34
2.2.2	Estimativa do estoque total de biomassa (TB) .....	35
2.2.2.1	Biomassa lenhosa (AGWB) .....	35
2.2.2.2	Necromassa .....	35
2.2.2.3	Serrapilheira .....	37
2.2.2.4	Biomassa de raízes (BGB) .....	37
<b>2.3</b>	<b>Análise de dados .....</b>	<b>38</b>
2.3.1	Florística, diversidade e estrutura da vegetação .....	38
2.3.2	Análise da biomassa .....	39
<b>3</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
<b>3.1</b>	<b>Florística, diversidade e estrutura florestal .....</b>	<b>40</b>
<b>3.2</b>	<b>Estoques de biomassa .....</b>	<b>42</b>
<b>3.3</b>	<b>RESUMO GRÁFICO.....</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>DISCUSSÕES.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Florística, diversidade e estrutura da vegetação .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Estoques de biomassa .....</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>48</b>

## SUMÁRIO

	<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>54</b>
	<b>MODELAGEM DA BIOMASSA COM INCLUSÃO DE VARIÁVEIS EDÁFICAS NA SAVANA NEOTROPICAL</b> .....	<b>54</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>57</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>58</b>
<b>2.1</b>	<b>Área de estudo</b> .....	<b>58</b>
<b>2.2</b>	<b>Coleta de dados</b> .....	<b>59</b>
2.2.1	Inventário florestal.....	59
2.2.2	Estimativa do estoque total de biomassa (TB) .....	61
2.2.2.1	Biomassa lenhosa (AGWB) .....	61
2.2.2.2	Necromassa .....	61
2.2.2.3	Serrapilheira .....	63
2.2.2.4	Biomassa de raízes (BGB) .....	63
2.2.3	Características química e física do solo.....	64
<b>2.3</b>	<b>Análise de dados</b> .....	<b>65</b>
2.3.1	Florística, diversidade e estrutura da vegetação .....	65
2.3.2	Modelagem da biomassa por unidade de área .....	66
<b>2.4</b>	<b>RESUMO GRÁFICO</b> .....	<b>68</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>68</b>
<b>3.1</b>	<b>Estoques de biomassa e relação solo–vegetação</b> .....	<b>68</b>
<b>3.2</b>	<b>Modelagem da biomassa por unidade de área</b> .....	<b>70</b>
<b>4</b>	<b>DISCUSSÕES</b> .....	<b>78</b>
<b>4.1</b>	<b>Estoques de biomassa</b> .....	<b>78</b>
<b>4.2</b>	<b>Equações de biomassa</b> .....	<b>79</b>
<b>4.3</b>	<b>Relação solo–vegetação</b> .....	<b>82</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>83</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>84</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>29</b>
<b>Figura 1.</b> Distribuição das unidades amostrais do inventário florestal realizado em áreas de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR), localizadas nas bacias hidrográficas do Rio Pardo e do Rio Urucuia, ao Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.....	33
<b>Figura 2.</b> Visão das paisagens das unidades amostrais de (a) cerrado sentido restrito (CSS) e (b) Carrasco (CAR), localizadas nas bacias hidrográficas do Rio Pardo e do Rio Urucuia, ao Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil. ....	33
<b>Figura 3.</b> Esquema geral de amostragem aplicada para as áreas de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR). AGB e BGB = biomassa acima e abaixo do solo, respectivamente; AGWB = biomassa lenhosa; Db = diâmetro basal; d = diâmetro; L = comprimento da linha.....	34
<b>Figura 4.</b> Estrutura horizontal e diagrama de Venn da riqueza de espécies (S) da vegetação de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR), na região Norte e Noroeste de Minas Gerais, Brasil.....	41
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>54</b>
<b>Figura 1.</b> Visão geral das paisagens (a) e distribuição das unidades amostrais do inventário florestal (b) realizado em áreas de cerrado sentido restrito (CSS), localizadas nas bacias hidrográficas do Rio Pardo e do Rio Urucuia, ao Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.....	59
<b>Figura 2.</b> Esquema geral de amostragem aplicada em áreas de cerrado sentido restrito (CSS). AGB e BGB = biomassa acima e abaixo do solo, respectivamente; AGWB = biomassa lenhosa; Db = diâmetro basal; d = diâmetro; L = comprimento da linha. ....	60
<b>Figura 3.</b> Amostragem (a) e pesagem (b) de raízes, seguidas da coleta da densidade do solo (c), em áreas de cerrado sentido restrito, Sudeste do Brasil. ....	64
<b>Figura 4.</b> Valores observados <i>versus</i> preditos (a), resíduos <i>versus</i> valores preditos (b), histograma das classes de resíduos (c) e resíduos padronizados <i>versus</i> valores preditos (d) para os modelos de biomassa total (TB) M1, M2 e M3 (Tabela 7), por unidade de área, no cerrado sentido restrito, na região Norte e Noroeste de Minas Gerais, Brasil. A linha vermelha representa a linha de tendência. ....	73
<b>Figura 5.</b> Valores observados <i>versus</i> preditos (a), resíduos <i>versus</i> valores preditos (b), histograma das classes de resíduos (c) e resíduos padronizados <i>versus</i> valores preditos (d) para os modelos de biomassa total das árvores (TTB) M4 e M5 (Tabela 7), por unidade de área, no cerrado sentido restrito, na região Norte e Noroeste de Minas Gerais, Brasil. A linha amarela representa a linha de tendência. ....	74
<b>Figura 6.</b> Valores observados <i>versus</i> preditos (a), resíduos <i>versus</i> valores preditos (b), histograma das classes de resíduos (c) e resíduos padronizados <i>versus</i> valores preditos (d) para os modelos de biomassa lenhosa (AGWB) M6, M7 e M8 (Tabela 7), ajustados por unidade de área, no cerrado sentido restrito, na região Norte e Noroeste de Minas Gerais, Brasil. A linha azul representa a linha de tendência.....	75
<b>Figura 7.</b> Validação dos modelos de biomassa total (TB) com 10.000 replicações <i>bootstrap</i> no cerrado sentido restrito, na região Norte e Noroeste de Minas Gerais, Brasil: histograma dos resíduos (a) e gráfico QQ do RMSE <i>versus</i> quantis da distribuição normal (b) para os modelos M1, M2 e M3 (Tabela 7). A linha vermelha representa o RMSE ajustado. ....	77
<b>Figura 8.</b> Validação dos modelos de biomassa total das árvores (TTB) com 10.000 replicações <i>bootstrap</i> no cerrado sentido restrito, na região Norte e Noroeste de Minas Gerais, Brasil: histograma dos resíduos (a) e gráfico QQ do RMSE <i>versus</i> quantis da distribuição normal (b) para os modelos M4 e M5 (Tabela 7). A linha amarela representa o RMSE ajustado. ....	77
<b>Figura 9.</b> Validação dos modelos de biomassa lenhosa (AGWB) com 10.000 replicações <i>bootstrap</i> no cerrado sentido restrito, na região Norte e Noroeste de Minas Gerais, Brasil: histograma dos resíduos (a) e gráfico QQ do RMSE <i>versus</i> quantis da distribuição normal (b) para os modelos M6, M7 e M8 (Tabela 7). A linha azul representa o RMSE ajustado. ....	78

## LISTA DE TABELAS

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>29</b>
<b>Tabela 1.</b> Classificação da necromassa segundo os estágios de decomposição. ....	36
<b>Tabela 2.</b> Densidade básica ( $\rho$ ) ( $\text{g cm}^{-3}$ ) segundo o grau de decomposição e diâmetro do detrito lenhoso. ....	36
<b>Tabela 3.</b> Fórmulas utilizadas na análise florística e de diversidade da vegetação lenhosa de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR).....	38
<b>Tabela 4.</b> Fórmulas utilizadas na análise da fitossociologia da vegetação lenhosa do cerrado sentido restrito (CSS) e do Carrasco (CAR). ....	39
<b>Tabela 5.</b> Parâmetros estimados da vegetação nas áreas de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR), Minas Gerais, Brasil. ....	40
<b>Tabela 6.</b> Medidas descritivas dos estoques totais e por compartimento da biomassa em áreas de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR), na região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil. ....	42
<b>Tabela 7.</b> Fitossociologia das 10 espécies ranqueadas segundo o estoque de biomassa lenhosa em áreas de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR) na região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil. ....	43
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>54</b>
<b>Tabela 1.</b> Classificação da necromassa segundo os estágios de decomposição. ....	62
<b>Tabela 2.</b> Densidade básica ( $\rho$ ) ( $\text{g cm}^{-3}$ ) segundo o grau de decomposição e diâmetro do detrito lenhoso. ....	62
<b>Tabela 3.</b> Fórmulas utilizadas na análise da fitossociologia da vegetação lenhosa do cerrado sentido restrito (CSS).....	65
<b>Tabela 4.</b> Estatísticas descritivas da biomassa total e de seus compartimentos, bem como dos atributos físico-químicos do solo, para áreas de cerrado sentido restrito ( $n = 40$ ) na região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil. ....	69
<b>Tabela 5.</b> Biomassa lenhosa e valor de importância das dez espécies com maiores estoques de biomassa no cerrado sentido restrito na região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.....	70
<b>Tabela 6.</b> Modelos de biomassa por unidade de área ajustados para áreas de cerrado sentido restrito na região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil. ....	71
<b>Tabela 7.</b> Estimativas dos parâmetros dos modelos de biomassa por unidade de área ajustados para cerrado sentido restrito no Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil. ....	72
<b>Tabela 8.</b> Validação dos modelos de biomassa por unidade de área ajustados para o cerrado sentido restrito na região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil. ....	76
<b>Tabela 9.</b> Equações de melhor ajuste para estimar a biomassa em cerrado sentido restrito obtidas para a região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil. ....	78

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

As florestas abrigam a maior parte das espécies do planeta e fornecem bens e serviços ecossistêmicos essenciais à humanidade, incluindo alimentos, fibras, madeira, medicamentos, água de qualidade, valores estéticos e espirituais e regulação climática (McKinley et al., 2011; Pan et al., 2013), pois, constituem o componente dominante do sumidouro de carbono terrestre (Pan et al., 2011; Xu et al., 2021).

Embora as florestas tropicais concentrem o maior potencial de aumento dos estoques de biomassa (Erb et al., 2018), análises recentes indicam que a capacidade de sumidouro de carbono das florestas tropicais intactas pode estar em declínio (Carle et al., 2025), sinalizando possível transição futura de sumidouros para fontes de carbono (Brienen et al., 2015; Hubau et al., 2020; Gatti et al., 2021; Koch, Hubau e Lewis, 2021; Bauman et al., 2022). Em nível nacional, Brasil e Indonésia concentram 35% do carbono armazenado nas florestas tropicais e respondem pelas maiores emissões decorrentes da perda florestal (Baccini et al., 2012).

Nesse contexto, é importante conhecer os estoques de carbono que as florestas do mundo têm sequestrado e onde estão armazenados, para se confirmar se as tendências recentes são consistentes com o papel esperado do sumidouro terrestre (Pan et al., 2024). Portanto, a quantificação da biomassa total é indispensável para subsidiar essas informações, porém, pelo fato de se tratar de uma atividade onerosa e morosa, a maioria dos estudos considera apenas a biomassa aérea (Ribeiro et al., 2011).

A América do Sul abriga as florestas tropicais mais extensas e diversas do mundo (Bennett et al., 2023), além de cerca de 8 a 10% da cobertura global de savanas (Borghetti et al., 2023).

O Brasil é detentor da maior Savana Neotropical, o Cerrado. Porém, nas últimas seis décadas, extensas áreas do bioma têm sido progressivamente substituídas por culturas agrícolas e pastagens (Sano et al., 2010; Strassburg et al., 2017; Soterroni et al., 2019; Alencar et al., 2020), o que leva o Cerrado a ser considerado uma das últimas grandes fronteiras agrícolas do mundo (Spera et al., 2016; Klink et al., 2020) e a região agrícola mais produtiva do país (Rausch et al., 2019). Ecossistemas não florestais são historicamente negligenciados, mesmo cobrindo extensas áreas e apresentando níveis de biodiversidade comparáveis aos das formações florestais (Overbeck et al., 2015).

O Cerrado apresenta elevada diversidade estrutural e ampla heterogeneidade ambiental, características que são reflexo da complexidade ecológica e funcional observada em florestas tropicais (Erb et al., 2018). Sua diversidade geomorfológica governa a heterogeneidade edáfica

ao longo do domínio, e a variação no material de origem e nas formas de relevo é determinante na formação dos solos (Lira-Martins et al., 2022).

As comunidades vegetais do Cerrado são adaptadas a solos ácidos e pobres em nutrientes. Alterações na química do solo podem afetar significativamente a estrutura da vegetação (Castro et al., 2025), e, conseqüentemente, os estoques de biomassa. A vegetação do Cerrado apresenta adaptações para tolerar elevados teores de alumínio, sem prejuízos metabólicos, o que lhes permite crescer e se desenvolver normalmente (Haridasan, 2008). Destacam-se, nesse contexto, as famílias Rubiaceae, Melastomataceae e Vochysiaceae, sendo a família Vochysiaceae uma das mais importantes e hiperdominantes do bioma (Alvarez et al., 2025), com gêneros como *Vochysia* e *Qualea* amplamente registrados em diferentes tipos de solo (Souza et al., 2015; Castro et al., 2022).

Na perspectiva de botânicos pioneiros sobre o efeito do solo na distribuição da vegetação no bioma, a florística dos diferentes tipos de vegetação do Cerrado responde a variações edáficas (Arens, 1958; Goodland e Pollard, 1973; Furley e Ratter, 1988), entretanto, nas últimas décadas, parte da literatura tem privilegiado o papel do fogo como principal fator determinante das mudanças na vegetação, em detrimento das propriedades edáficas (Murphy e Bowman, 2012; Lehmann et al., 2014; Dantas et al., 2016; Lira-Martins et al., 2022), sendo que, segundo Cole (1986), o clima e o solo exercem os efeitos mais significativos na fisionomia e na distribuição das savanas.

Nesse contexto, a ampla distribuição espacial do Cerrado reflete a atuação conjunta desses fatores ambientais ao longo do território brasileiro. A área contínua do bioma incide sobre os estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Piauí, Maranhão, Rondônia, Pará, Paraná e o Distrito Federal, estando presente em todas as regiões do país e ocupando cerca de 23,3% do território nacional (IBGE, 2019). Em suas porções norte e nordeste, o Cerrado estende-se para áreas sob influência do clima semiárido, onde gradientes climáticos e edáficos promovem a formação de mosaicos vegetacionais e zonas de transição com outros domínios fitogeográficos.

Na região semiárida do Brasil, além do Cerrado, ocorre uma formação vegetal própria denominada Carrasco, que é caracterizada como um arbustal decíduo (Araújo et al., 2011). O termo Carrasco tem sido utilizado para designar diferentes tipos de vegetação no Nordeste do Brasil e também em outras regiões (Araújo et al., 1998). O Carrasco está presente tanto no interior do domínio quanto em ecótonos entre os biomas Cerrado e Caatinga, ou seja, o maior domínio fitogeográfico semiárido da América do Sul (Moro et al., 2024). Os principais estudos

dessa formação vegetal datam do século passado (Andrade-Lima, 1978; Araújo et al., 1998), permanecendo ainda pouco investigada, especialmente quanto às suas relações ecológicas com biomas adjacentes (Ribeiro e Walter, 2008) e, de forma ainda mais acentuada, quanto à quantificação de seus estoques de biomassa.

Diante do contexto apresentado, considerando que os atributos do solo influenciam a estrutura e a distribuição das espécies, é plausível supor que também influenciem os padrões de alocação e distribuição da biomassa. Assim, a incorporação de variáveis edáficas em modelos de biomassa constitui uma abordagem promissora para aprimorar estimativas de biomassa por unidade de área em formações vegetais na Savana Neotropical.

Considerando essa necessidade, este estudo teve como objetivo estimar a biomassa total em áreas do domínio da Savana Neotropical, considerando uma formação vegetal do Cerrado (cerrado sentido restrito) e o Carrasco, além de modelar a biomassa em áreas de cerrado sentido restrito com a inclusão de variáveis edáficas, buscando aprimorar as estimativas por unidade de área.

## **2 QUESTÕES DE PESQUISA**

- a) Qual a contribuição dos diferentes compartimentos da biomassa do cerrado sentido restrito e do Carrasco nos seus respectivos estoques totais de biomassa?
- b) A inclusão de variáveis do solo na modelagem da biomassa em áreas de cerrado sentido restrito permite melhorar as estimativas da variável por unidade de área?

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Geral**

O objetivo geral deste estudo foi estimar o estoque total de biomassa em áreas de Cerrado (cerrado sentido restrito) e Carrasco nas regiões Norte e Noroeste do estado de Minas Gerais, bem como modelar a biomassa em áreas de Cerrado (cerrado sentido restrito) com a inclusão de variáveis edáficas.

### 3.2 Específicos

- Estimar os estoques de biomassa lenhosa, de serrapilheira, de necromassa e de biomassa abaixo do solo (biomassa de raízes), em áreas de Cerrado (cerrado sentido restrito) e Carrasco;
- Modelar, por unidade de área, a biomassa em áreas de cerrado sentido restrito, de maneira hierárquica, para três níveis incluindo variáveis físico-químicas do solo: (i) biomassa total – TB, (ii) biomassa total das árvores – TTB e (iii) biomassa lenhosa – AGWB;
- Identificar a(s) variável(eis) com maior poder preditivo em cada nível e propor as equações mais adequadas para cada nível de modelagem.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 CERRADO

O Cerrado compreende um complexo de campos e savanas tropicais que dominam a parte central do Brasil, com manchas menores na região Amazônica, no Paraguai e na Bolívia (Pivello et al., 2025). A porção brasileira cobre uma área do tamanho da Inglaterra, França, Alemanha, Itália e Espanha combinadas (Lahsen, Bustamante e Dalla-Nora, 2016).

Essa Savana Neotropical é o segundo maior bioma da América do Sul e apresenta um mosaico composto por 11 tipos fitofisionômicos organizados em três categorias: florestas (floresta ciliar, mata de galeria, floresta seca e cerradão), savanas (cerrado sentido restrito, parque de cerrado, palmeiral e vereda) e campos (campo limpo, campo sujo e campo rupestre) (Ribeiro e Walter, 2008).

O Cerrado abriga elevada diversidade de plantas vasculares, com mais de 12 mil espécies registradas (Mendonça et al., 2008). É considerado a savana arborizada mais biodiversa do planeta, com aproximadamente 40% de sua flora composta por espécies endêmicas (Forzza et al., 2012; Vieira et al., 2022), que correspondem a cerca de 1,5% das espécies vegetais endêmicas do mundo (Myers et al., 2000).

As savanas constituem a forma dominante do Cerrado, ocupando cerca de 60% de sua área e apresentando dois estratos vegetais principais: um formado por arbustos e árvores dispersos e outro dominado por gramíneas no estrato herbáceo (Klink et al., 2020). Entre as formações

vegetais do Cerrado, o cerrado sentido restrito é a mais frequente (Eiten, 1978; Ribeiro e Walter, 2008).

#### 4.1.1 Cerrado sentido restrito

O cerrado sentido restrito caracteriza-se pela presença de árvores de pequeno porte, geralmente inclinadas e tortuosas, com ramificações irregulares e evidências frequentes de queimadas. Arbustos e subarbustos distribuem-se de forma esparsa na paisagem. Os solos associados a essa formação vegetal pertencem principalmente às classes Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo (Ribeiro e Walter, 2008). Apesar das boas características físicas, os solos do cerrado sentido restrito apresentam acidez forte ou moderada, com pH entre 4,5 e 5,5 e deficiência generalizada de nutrientes essenciais, especialmente fósforo e nitrogênio. Frequentemente os solos apresentam altos teores de alumínio, e o conteúdo de matéria orgânica varia de médio a baixo (Haridasan, 2008).

Diversos fatores influenciam a densidade lenhosa do cerrado sentido restrito, com destaque para as condições edáficas, como pH, saturação por alumínio e fertilidade do solo (Goodland e Ferri, 1979; Ruggiero et al., 2002; Haridasan, 2008); condições hídricas e profundidade do solo (Ab'Sáber, 1983; Jackson et al., 1999, 2000; Bucci et al., 2008); frequência e intensidade das queimadas (Miranda e Sato, 2005; Simon et al., 2009; Durigan e Ratter, 2016) e ações antrópicas como desmatamento, fragmentação e mudanças no uso da terra (Klink e Machado, 2005; Strassburg et al., 2017; Sano et al., 2019). Todos esses fatores refletem na estrutura da vegetação e na distribuição espacial dos indivíduos lenhosos, influenciando os padrões de estoque e distribuição da biomassa na fisionomia.

#### 4.1.2 Variáveis edáficas

O Cerrado é representado por um mosaico de formações vegetais que se distribuem, principalmente, em função de fatores climáticos e edáficos (Haridasan, 1987), além da irregularidade dos incêndios naturais (Simon e Dantas, 2025). Embora os fatores climáticos, especialmente temperatura e precipitação, dominem, frequentemente, os padrões biogeográficos do Cerrado em larga escala, a heterogeneidade do solo em escala local pode sustentar comunidades vegetais distintas dentro de regiões climaticamente uniformes (Machado et al., 2025).

O mosaico de tipos de solo seleciona espécies especializadas em condições específicas de nutrientes, mesmo em escalas espaciais muito pequenas (Abrahão et al., 2019). Na transição

Amazônia–Cerrado, por exemplo, Elias et al. (2019) constataram que a variação do solo é um fator-chave na distribuição da flora arbórea. Padrões semelhantes foram registrados em áreas de cerrado típico e cerrado rupestre na Serra Negra, Goiás (Abreu et al., 2012), bem como em ecótonos floresta–cerrado no norte de Minas Gerais (Souza et al., 2024) e em ambientes de florestas secas do Cerrado (Machado et al., 2025), onde as características do solo influenciam de forma significativa a composição florística e a estrutura da vegetação arbóreo-arbustiva.

Esses achados estão alinhados com evidências globais de que fatores edáficos, particularmente pH, capacidade de troca catiônica efetiva e textura, atuam como filtros em ecossistemas de florestas secas. De forma semelhante, a capacidade de troca catiônica e suas interações com o fósforo e a matéria orgânica foram identificadas como determinantes da ocorrência de espécies e da cobertura vegetal em veredas (savana lacustre brasileira) (Nogueira et al., 2022). O pH do solo também explicou diferenças na distribuição de espécies e nas concentrações de nutrientes foliares entre savana arborizada e floresta sazonalmente seca no Brasil (Viani et al., 2014).

As espécies do Cerrado apresentam adaptações morfológicas e fisiológicas que otimizam seu estabelecimento em condições edáficas específicas (Lira-Martins et al., 2022). Independentemente do tipo de solo, algumas espécies acumulam grandes quantidades de alumínio (Haridasan, 1982; Haridasan e Araújo, 1988). Além disso, o Cerrado constitui uma rica fonte de espécies e de atributos funcionais associados à tolerância a restrições ambientais, como baixa disponibilidade de fósforo, pH baixo, alta disponibilidade de alumínio e limitação hídrica (Lambers et al., 2020).

Alterações experimentais nas condições edáficas reforçam esse papel estruturante do solo. A adição de nitrogênio e fósforo, bem como a calagem, modificaram a composição de espécies, beneficiando poucas espécies dominantes em áreas de cerrado típico (Castro et al., 2025).

Diante desse conjunto de evidências, destaca-se a necessidade de integrar dados edáficos às análises de comunidades vegetais, inclusive em estudos de biomassa. Se os atributos do solo influenciam a estrutura e a distribuição das espécies, é esperado que também afetem a alocação e a distribuição da biomassa. Portanto, a incorporação de variáveis edáficas na modelagem estatística destinada à estimativa dos estoques de biomassa em formações vegetais do Cerrado pode ampliar significativamente o poder explicativo dos modelos, especialmente quando estes são capazes de captar as adaptações do estrato lenhoso a solos ácidos e de baixa fertilidade.

## 4.2 CARRASCO

No contexto do semiárido brasileiro, a Caatinga é o bioma predominante e exclusivo do Brasil. Entretanto, outras formações vegetacionais também ocorrem nessa região, entre elas o “Carrasco” (Araújo et al., 1998), também denominado “Caatinga sedimentar” ou “Caatinga de areia” (Moro et al., 2024).

Embora, o Carrasco seja considerado um tipo de Caatinga, em função da caducifolia, suas características estruturais como elevada densidade de indivíduos, aparente uniestratificação e quase ausência de cactáceas e bromeliáceas, justificam seu reconhecimento como uma fisionomia vegetal própria (Andrade-Lima, 1978).

O Carrasco é caracterizado por uma paisagem com arbustos pequenos, ramificados e agrupados (Pontes et al., 2024). Ocorre principalmente na zona de transição entre o Cerrado (Savana Neotropical) e a Caatinga (Semiárido Brasileiro), e é considerado uma fisionomia de ecótono (Felfili e Silva Júnior, 2001). Sua estrutura densa e de baixo porte, associada a solos arenosos (Araújo e Martins, 1999) e a solos desenvolvidos sobre areias quartzosas, atualmente classificados como Neossolos Quartzênicos (Ribeiro e Walter, 2008), indica limitações hídricas e nutricionais nas camadas mais profundas do solo. Além disso, essa fisionomia apresenta elevada abundância de trepadeiras (Araújo e Martins, 1999).

Em termos de produção, os poucos estudos realizados no Carrasco abordaram principalmente aspectos florísticos e de diversidade (Araújo, Martins e Shepherd, 1999), bem como fenologia e dispersão de espécies lenhosas (Vasconcelos, Araújo e Lopes, 2010) e dinâmica de fungos (Pontes et al., 2024).

## 4.3 BIOMASSA FLORESTAL

Biomassa é definida como a massa de matéria de origem biológica, viva ou morta, de origem animal ou vegetal (Silveira et al., 2008). Nas ciências florestais, o termo refere-se à quantidade de material vegetal disponível em uma floresta. Os principais componentes da biomassa incluem a biomassa viva acima do solo, composta por árvores e arbustos, a biomassa morta acima do solo, formada por serrapilheira e necromassa, e a biomassa abaixo do solo, composta pelas raízes. A biomassa total corresponde à soma desses componentes (Pan et al., 2011).

Para determinar e estimar o estoque de biomassa acumulado em uma floresta, utilizam-se métodos diretos e/ou indiretos.

### 4.3.1 Métodos diretos de determinação da biomassa

Os métodos diretos consistem na pesagem real da biomassa com auxílio de balança e, quando aplicados a organismos vivos, implicam a destruição do material vegetal.

Para árvores e arbustos, esses métodos são geralmente classificados em dois tipos: o método da árvore individual e o método da parcela de área fixa (Sanquetta, 2002), aplicável também à necromassa, serrapilheira e raízes.

O método da parcela, pouco utilizado, consiste no corte e pesagem de toda a biomassa contida em uma área previamente definida (Silveira et al., 2008). Os métodos baseados na árvore individual consideram diferentes estratégias para a seleção e derrubada de árvores-amostra ou árvores-modelo, incluindo, em alguns casos, a escavação das raízes. Essas estratégias compreendem a seleção de árvores distribuídas em classes de tamanho, a seleção proporcional à frequência nas classes de tamanho ou a seleção baseada em parâmetros fitossociológicos (Jorge e Eufrade Junior, 2023).

Para a quantificação da biomassa de raízes, os métodos mais utilizados incluem a escavação de raízes de árvores individuais, a abertura de trincheiras e a coleta de monolitos. Esses métodos apresentam variações quanto ao volume e distribuição do solo amostrado, e quanto aos critérios de classificação dos tamanhos das raízes (Taylor et al., 2013; Freschet et al., 2021).

A biomassa de madeira morta pode ser classificada em árvores mortas em pé, denominadas *standing dead trees* ou *snags*, resíduos lenhosos grosseiros, conhecidos como *coarse woody debris* (CWD), e resíduos lenhosos finos, denominados *fine woody debris* (FWD), geralmente associados à serrapilheira, que corresponde à necromassa fina não lenhosa (Russell et al., 2015). Para as duas primeiras categorias, os métodos usuais consideram o volume e a densidade básica da madeira em diferentes estágios de decomposição. A necromassa é obtida pelo produto entre o volume e a densidade básica da madeira em cada classe de decomposição (Maas et al., 2020). Enquanto a densidade é frequentemente estimada pelo método de imersão em mercúrio, devido à fragilidade do material (Vital, 1984; Villanova et al., 2023), o volume da necromassa para detritos maiores é geralmente obtido pelos métodos clássicos de cubagem rigorosa, como Smalian, Huber ou Newton (Husch, Miller e Kershaw, 2003). Já para galhos e ramos finos, o volume é determinado por imersão em água, com base no princípio de Arquimedes (ASTM, 2022).

A ausência de padronização do diâmetro mínimo para inclusão nas categorias de necromassa constitui um dos principais desafios para a quantificação adequada do estoque de biomassa nesse compartimento. Em alguns casos, resíduos lenhosos acima de um centímetro são considerados grosseiros, enquanto em outros, resíduos abaixo de 10 cm são classificados como finos (Chao et al., 2017).

Para a serrapilheira, o método mais utilizado envolve o uso de gabaritos quadrados, a pesagem da biomassa úmida em campo e, após secagem, a extrapolação dos valores para unidade de área (Maas et al., 2020).

#### **4.3.2 Métodos indiretos de estimativa da biomassa**

Nos métodos indiretos, a biomassa é estimada por meio de correlações com variáveis de fácil obtenção, sem a necessidade de destruição do material vegetal. Esses métodos podem ser classificados como método da proporção e método de regressão. Entretanto, o desenvolvimento desses métodos depende, em algum momento, da aplicação de métodos diretos.

O método da proporção consiste na conversão do volume da árvore ou da unidade de área em biomassa por meio de fatores de conversão (Brown, 1997). Outra abordagem desse método envolve o uso de proporções entre raiz e parte aérea (Mokany, Ralson e Prokushkin, 2006). As limitações associadas à determinação e estimativa da biomassa de raízes são amplamente reconhecidas, abrangendo aspectos metodológicos, custos financeiros e tempo de execução (Taylor et al., 2013; Pardi et al., 2025).

O método de regressão baseia-se no ajuste de modelos e no desenvolvimento de equações que relacionam a biomassa, como variável dependente, com uma ou mais variáveis independentes de fácil mensuração. E aqui se abre um enorme leque de possibilidades aplicáveis a qualquer reservatório de biomassa.

Para estimar o volume de detritos lenhosos no piso florestal, o método mais utilizado é o da interseção de linhas (Van Wagner, 1982; Keller et al., 2004). As linhas podem ser dispostas de diferentes formas, como uma única linha reta, duas linhas perpendiculares (SFB, 2019, 2021) ou um triângulo equilátero (Van Wagner, 1982). O volume de necromassa por hectare é estimado por meio de equações que consideram o diâmetro das peças e o comprimento das linhas (Van Wagner, 1968).

Na fisionomia de cerrado sentido restrito, a maioria das equações de biomassa publicadas é baseada na árvore individual e utiliza principalmente o diâmetro, a altura e a densidade da

madeira como variáveis preditoras (Rezende et al., 2006; Ribeiro et al., 2011; Chave et al., 2014), o que resulta em uma dependência taxonômica acentuada, como no caso das florestas tropicais.

## REFERÊNCIAS

- Ab'Sáber AN (1983) O domínio dos cerrados: introdução ao conhecimento. **Revista do Serviço Público** 11:41-55, 1983.
- Abrahão A, Costa PDB, Lambers H et al (2019) Soil types select for plants with matching nutrient-acquisition and -use traits in hyperdiverse and severely nutrient-impoverished campos rupestres and cerrado in Central Brazil. **J Ecol** 107:1302–1316. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13111>
- Abreu MF, Pinto JRR, Maracahipes L et al. (2012) Influence of edaphic variables on the floristic composition and structure of the tree-shrub vegetation in typical and rocky outcrop cerrado areas in Serra Negra, Goiás State, Brazil. **Brazilian Journal of Botany** 35:259-272.
- Alencar AZ, Shimbo J, Lenti, F et al. (2020) Mapping three decades of changes in the brazilian savanna native vegetation using landsat data processed in the google earth engine platform. **Remote Sensing** 12:924. <https://doi.org/10.3390/rs12060924>
- Alvarez F, Marimon-Junior BH, Marimon BS et al (2025) Tree species hyperdominance and rarity in the South American Cerrado. **Commun Biol** 8:695. <https://doi.org/10.1038/s42003-025-07623-w>
- Andrade-Lima D (1978) Vegetação. In: Lins RC (ed) **Bacia do Parnaíba: aspectos fisiográficos**. Instituto Joaquim Nabuco de Pesquisas Sociais, Recife, pp 131–135. (Série Estudos e Pesquisas, 9)
- Araújo FS, Martins FR (1999) Fisionomia e organização da vegetação do carrasco no planalto da Ibiapaba, estado do Ceará. **Acta Botanica Brasilica** 13:01–13. <https://doi.org/10.1590/S0102-33061999000100002>
- Araújo FS, Martins FR, Shepherd GJ (1999) Variações estruturais e florísticas do carrasco no planalto da Ibiapaba, estado do Ceará. **Rev Bras Biol** 59:663–678. <https://doi.org/10.1590/S0034-71081999000400015>
- Araujo FS, Sampaio EV, Figueiredo MA, Rodal MJN, Fernandes AG (1998) Composição florística da vegetação de carrasco, Novo Oriente, CE. **Braz J Bot** 21:105–116. <https://doi.org/10.1590/S0100-84041998000200001>
- Araújo FSD, Costa RCD, Lima JR, Vasconcelos SFD, Girão LC et al. (2011) Floristics and life-forms along a topographic gradient, central-western Ceará, Brazil. **Rodriguésia** 62:341-366. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201162210>
- Arens K (1958) O Cerrado como Vegetação Oligotrófica. **Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade de São Paulo**. Botânica, pp. 57-77.
- ASTM (2022) **American Society for Testing and Materials D2395–17: Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials**. ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/D2395-17>
- Baccini A, Goetz S, Walker W et al. (2012) Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. **Nature Clim Change** 2:182–185. <https://doi.org/10.1038/nclimate1354>
- Bauman D, Fortunel C, Delhaye G et al. (2022) Tropical tree mortality has increased with rising atmospheric water stress. **Nature** 608:528–533. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04737-7>
- Bennett AC et al. (2023) Sensitivity of South American tropical forests to an extreme climate anomaly. **Nat. Clim. Chang.** 13:967–974. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01776-4>

- Borghetti F, Barbosa E, Ribeiro L et al. (2023) Fitogeografia das savanas sul-americanas. **Heringeriana** 17:e918014. <https://doi.org/10.17648/heringeriana.v17i1.918014>
- Brienen R, Phillips O, Feldpausch T et al. (2015) Long-term decline of the Amazon carbon sink. **Nature** 519:344–348. <https://doi.org/10.1038/nature14283>
- Brown S (1997) **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer**. Rome: FAO. 55 p.
- Bucci SJ, Scholz FG, Goldstein G, Meinzer FC, Franco AC, Zhang Y, Hao GY (2008) Water relations and hydraulic architecture in Cerrado trees: adjustments to seasonal changes in water availability and evaporative demand. **Brazilian Journal of Plant Physiology** 20:233-245. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202008000300007>
- Carle H, Bauman D, Evans MN et al. (2025) Aboveground biomass in Australian tropical forests now a net carbon source. **Nature** 646:611–618. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09497-8>
- Castro IB, Ferreira-Sousa L, Mello TRB et al. (2025) Ecological legacies in a tropical savanna: woody layer responses to long-term changes in soil chemistry. **Oecologia** 207:106. <https://doi.org/10.1007/s00442-025-05747-8>
- Castro LMR, Vinson CC, da Gordo SMC et al. (2022) Molecular and physiological aspects of plant responses to aluminum: what do we know about Cerrado plants? **Braz. J. Bot** 45:545–562. <https://doi.org/10.1007/s40415-021-00781-1>
- Chao KJ, Chen YS, Song GZM, Chang YM, Sheue CR, Phillips OL, Hsieh CF (2017) Carbon concentration declines with decay class in tropical forest woody debris. **Forest Ecology and Management** 391:75-85. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.01.020>
- Chave J et al. (2014) Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biol** 20:3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Cole MM (1986) **The savannas: biogeography and geobotany**. London: Academic Press. 438 p.
- Dantas V de L, Hirota M, Oliveira RS, Pausas JG (2016) Disturbance maintains alternative biome states. **Ecol Lett** 19:12–19. <https://doi.org/10.1111/ele.12537>
- Durigan G, Ratter JA (2016) The need for a consistent fire policy for Cerrado conservation. **Journal of Applied Ecology** 53:11-15. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12559>
- Eiten G (1978) Delimitation of the Cerrado concept. **Plant Ecol** 36:169–178. <https://doi.org/10.1007/BF02342599>
- Elias F, Junior BHM, Oliveira FJM et al. (2019) Soil and topographic variation as a key factor driving the distribution of tree flora in the Amazonia/Cerrado transition. **Acta Oecologica** 100:103467. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2019.103467>
- Erb KH, Kastner T, Plutzer C et al. (2018) Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. **Nature** 553:73–76. <https://doi.org/10.1038/nature25138>
- Felfili JM, Silva Júnior MC (eds) (2001) **Biogeografia do bioma Cerrado: estudo fitofisionômico na Chapada do Espigão Mestre do São Francisco**. Universidade de Brasília, Brasília.
- Forzza RC, Baumgratz JFA, Bicudo CEM et al. (2012) New Brazilian floristic list highlights conservation challenges. **BioScience** 62:39-45. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.1.8>
- Freschet GT, Pagès L, Iversen CM et al. (2021) A starting guide to root ecology: strengthening ecological concepts and standardising root classification, sampling, processing and trait measurements. **New Phytologist** 232:973–1122. <https://doi.org/10.1111/nph.17572>
- Furley PA, Ratter JA (1988) Soil Resources and Plant Communities of the Central Brazilian Cerrado and Their Development. **J Biogeogr** 15:97–108. <https://doi.org/10.2307/2845050>

- Gatti LV, Basso LS, Miller JB et al. (2021) Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature** 595:388–393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- Goodland R, Pollard R (1973) The Brazilian Cerrado Vegetation: A Fertility Gradient. **J Ecol** 61:219–224. <https://doi.org/10.2307/2258929>
- Goodland RA, Ferri MG (1979) **Ecologia do Cerrado**. Itatiaia, Belo Horizonte.
- Haridasan M (1982) Aluminium accumulation by some Cerrado native species of central Brazil. **Plant Soil** 65:265–273. <https://doi.org/10.1007/BF02374657>
- Haridasan M (1987) Distribution and mineral nutrition of aluminum-accumulating species in different plant communities of the Cerrado region of central Brazil. In: San Jose JJ, Montes R (eds) **The bioproductive capacity of savannas**. Caracas, Venezuela, IVIC./CIET, pp 309–348.
- Haridasan M (2008) Nutritional adaptations of native plants of the Cerrado biome in acid soils. **Braz J Plant Physiol** 20:183–195. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202008000300003>
- Haridasan M, Araújo GM (1988) Aluminium-accumulating species in two forest communities in the cerrado region of central Brazil. **For Ecol Manag** 24:15–26. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(88\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-1127(88)90021-7)
- Hubau W, Lewis SL, Phillips OL et al. (2020) Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. **Nature** 579:80–87. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0>
- Husch B, Miller CI, Kershaw J (2003) **Forest mensuration**. 4. ed. New Jersey: John Willey e Sons, Inc, 443 p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019) **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000**. Rio de Janeiro, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 168 p.
- Jackson PC, Meinzer FC, Bustamante MMC, Goldstein G, Franco AC et al. (1999) Partitioning of soil water among tree species in a Brazilian Cerrado ecosystem. **Tree physiology** 19:717–724. <https://doi.org/10.1093/treephys/19.11.717>
- Jackson RB, Schenk HJ, Jobbágy EG, Canadell J, Colello GD, Dickinson RE, Field CB, Friedlingstein P, Heimann M, Hibbard K, Kicklighter DW (2000) Belowground consequences of vegetation change and their treatment in models. **Ecological Applications** 10:470–483. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0470:BCOVCA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0470:BCOVCA]2.0.CO;2)
- Jorge LAB, Eufrade Junior HJ (2023) **Dendrometria e inventário florestal com aplicações em R**. 179 p.
- Keller M, Palace M, Asner GP, Pereira Jr R, Silva JNM (2004) Coarse woody debris in undisturbed and logged forests in the eastern Brazilian Amazon. **Global Change Biology** 10:784–795. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00770.x>
- Klink CA et al. (2020) The role of vegetation on the dynamics of water and fire in the Cerrado ecosystems: Implications for management and conservation. **Plants** 9:1803. <https://doi.org/10.3390/plants9121803>
- Klink CA, Machado RB (2005) Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conserv Biol** 19:707–713. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x>
- Koch A, Hubau W, Lewis SL (2021) Earth system models are not capturing present-day tropical forest carbon dynamics. **Earth's Future** 9:e2020EF001874. <https://doi.org/10.1029/2020EF001874>
- Lahsen M, Bustamante MMC, Dalla-Nora EL (2016) Undervaluing and overexploiting the Brazilian cerrado at our peril. **Environ Sci Pol Sustain Dev** 58:4–15. <https://doi.org/10.1080/00139157.2016.1229537>

- Lambers H, Britto Costa P, Oliveira RS et al. (2020) Towards more sustainable cropping systems: lessons from native Cerrado species. **Theor. Exp. Plant Physiol.** 32:175–194. <https://doi.org/10.1007/s40626-020-00180-z>
- Lehmann CER, Anderson TM, Sankaran M et al (2014) Savanna vegetation–fire–climate relationships differ among continents. **Science** 343:548–552. <https://doi.org/10.1126/science.1247355>
- Lira-Martins D, Nascimento DL, Abrahão A et al. (2022) Soil properties and geomorphic processes influence vegetation composition, structure, and function in the Cerrado Domain. **Plant Soil** 476:549–588. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05517-y>
- Maas GCB, Sanquetta CR, Marques R, Machado SDA, Sanquetta MNI (2020) Quantification of carbon in forest necromass: State of the art. **Cerne** 26:98–108. <https://doi.org/10.1590/01047760202026012661>
- Machado DL, Silva Santos GA, Freitas MS et al. (2025) Effects of Soil Attributes on Floristic Composition and Structure of Dry Forests in the Brazilian Savanna. **Austral Ecology** 50:e70063. <https://doi.org/10.1111/aec.70063>
- McKinley DC, Ryan MG, Birdsey RA, Giardina CP et al. (2011) A synthesis of current knowledge on forests and carbon storage in the United States. **Ecological applications** 21:1902–1924. <https://doi.org/10.1890/10-0697.1>
- Mendonça RC et al. (2008) Flora Vascular do Bioma Cerrado: checklist com 12.356 espécies. Pp. 213–228. In: Sano, S.M.; Almeida, S.P. & Ribeiro, J.F. (Eds.). **Cerrado: Ecologia e Flora**. Volume 1. Brasília, Embrapa Cerrados.
- Miranda HS, Sato MN (2005) Efeitos do fogo na vegetação lenhosa do Cerrado. In: Scariot A, Felfili JM, Souza Silva JC (eds) **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**, 1st edn. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, pp 95–105
- Mokany K, Raison RJ, Prokushkin AS (2006) Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. **Glob Change Biol** 12:84–96. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x>
- Moro MF, Amorim VO, de Queiroz, LP et al. (2024) Biogeographical Districts of the Caatinga Dominion: A Proposal Based on Geomorphology and Endemism. **Bot. Rev.** 90:376–429. <https://doi.org/10.1007/s12229-024-09304-5>
- Murphy BP, Bowman DMJS (2012) What controls the distribution of tropical forest and savanna? **Ecol Lett** 15:748–758. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01771.x>
- Myers N et al. (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature** 403:853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Nogueira EV, Bijos NR, Trindade VL et al. (2022) Differences in soil properties influence floristic changes in the Veredas of the Brazilian Cerrado. **Braz. J. Bot** 45:763–774. <https://doi.org/10.1007/s40415-022-00795-3>
- Overbeck GE et al. (2015) Conservation in Brazil needs to include non-forest ecosystems. **Diversity and distributions** 21:1455–1460. <https://doi.org/10.1111/ddi.12380>
- Pan Y, Birdsey RA, Fang J et al. (2011) A large and persistent carbon sink in the world’s forests. **Science**, 333:988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Pan Y, Birdsey RA, Phillips OL et al. (2024) The enduring world forest carbon sink. **Nature** 631:563–569. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>
- Pan Y, Birdsey RA, Phillips OL, Jackson RB (2013) The structure, distribution, and biomass of the world's forests. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics** 44:593–622. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135914>
- Pardi R, Gargano ML, Lasorella C et al. (2025) Optimizing soil core fine root collection and characterization: significant time reduction with a sub-sampling approach. **Plant and Soil** 508:347–360. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06805-5>

- Pivello VR, Martins M, Christianini AV, Carmignotto AP, Gomes BF, Fidelis A (2025) Fire in the Cerrado. In: Fidelis, A., Pivello, V.R. (eds) **Fire in the South American Ecosystems**. Ecological Studies, vol 250. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-89372-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-89372-8_5)
- Pontes JS, Oehl F, Pereira CD et al. (2024) Heterogeneity in Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Plant Communities of the Brazilian Cerrado, Transitional Areas toward the Caatinga, and the Atlantic Forest. **Microb Ecol** 87:1-15. <https://doi.org/10.1007/s00248-023-02337-0>
- Rausch LL, Gibbs HK, Schelly I et al. (2019) Soy expansion in Brazil's Cerrado. **Conservation letters** 12:e12671. <https://doi.org/10.1111/conl.12671>
- Rezende AV et al. (2006) Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado *stricto sensu* em Brasília, DF. **Sci For** 71:65–76.
- Ribeiro JF, Walter BMT (2008) As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: Sano SM, Almeida SP, Ribeiro JF (eds) **Cerrado: ecologia e flora**, vol 1. Embrapa Cerrados, Planaltina, pp 151–212.
- Ribeiro SC et al. (2011) Above- and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. **For Ecol Manag** 262:491–499. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.017>
- Ruggiero PGC, Batalha MA, Pivello VR et al. (2002) Soil-vegetation relationships in cerrado (Brazilian savanna) and semideciduous forest, Southeastern Brazil. **Plant Ecology** 160:1–16. <https://doi.org/10.1023/A:1015819219386>
- Russell MB, Fraver S, Aakala T et al. (2015) Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood: A review. **Forest Ecology and Management** 350:107–128. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.033>
- Sano EE et al. (2019) Land use dynamics in the Brazilian Cerrado in the period from 2002 to 2013. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 54:e00138. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00138>
- Sano EE, Rosa R, Brito JLS et al. (2010) Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environ. Monit. Assess.** 166:113–124. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0988-4>
- Sanquetta CR (2002) Métodos de determinação de biomassa florestal. In: Sanquetta CR et al. (Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: [s.n.], p. 119-140.
- Serviço Florestal Brasileiro (SFB) (2019) **Manual de campo: procedimentos para coleta de dados biofísicos e socioambientais**. Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, 90 p
- Serviço Florestal Brasileiro (SFB) (2021) **Manual de campo: procedimentos para coleta de dados biofísicos e socioambientais**. Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, 94 p
- Silveira P et al. (2008) O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta** 38:185-206. <https://doi.org/10.5380/rf.v38i1.11038>
- Simon MF et al. (2009) Recent assembly of the cerrado, a neotropical plant diversity hotspot, by in situ evolution of adaptations to fire. **Proc Natl Acad Sci USA** 106:20359–20364. <https://doi.org/10.1073/pnas.0903410106>
- Simon MF, Dantas VL (2025) Fire as an evolutionary driver in South America. In: Fidelis A, Pivello VR (eds) *Fire in the South American ecosystems*. Ecological studies, vol 250. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-89372-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-89372-8_2)
- Soterroni AC, Ramos FM, Mosnier A et al. (2019) Expanding the soy moratorium to Brazil's Cerrado. **Science advances** 5:eaav7336. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav7336>
- Souza AP, Corrêa GR, Arruda DM et al. (2024) Edaphic gradient shapes the structure and composition of vegetation in the forest-cerrado ecotone in north of Minas Gerais, Brazil. **Braz. J. Bot** 47:1147–1161. <https://doi.org/10.1007/s40415-024-01036-5>

- Souza MC, Bueno PC, Morellato PPC, Habermann G (2015) Ecological strategies of Al-accumulating and non-accumulating functional groups from the Cerrado *sensu stricto*. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** 87:813-823. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520140222>
- Spera AS, Galford GL, Coe MT et al. (2016) Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global change biology** 22:3405-3413. <https://doi.org/10.1111/gcb.13298>
- Strassburg BB et al. (2017) Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nat Ecol Evol** 1:0099. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099>
- Taylor BN et al. (2013) Sampling volume in root studies: the pitfalls of under-sampling exposed using accumulation curves. **Ecology letters** 16:862-869. <https://doi.org/10.1111/ele.12119>
- Van Wagner CE (1982) **Practical aspects of the line intersect method**. Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experiment Station, Chalk River, Ontario
- Vasconcelos SF, Araújo FS, Lopes AV (2010) Phenology and dispersal modes of wood species in the Carrasco, a tropical deciduous shrubland in the Brazilian semiarid. **Biodiversity and Conservation**, 19:2263-2289. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9841-x>
- Viani RAG, Rodrigues RR, Dawson TE et al. (2014) Soil pH accounts for differences in species distribution and leaf nutrient concentrations of Brazilian woodland savannah and seasonally dry forest species. **Perspect Plant Ecol Evol Syst** 16:64–74. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2014.02.001>
- Vieira LT, Azevedo TN, Castro AA et al. (2022) Reviewing the Cerrado's limits, flora distribution patterns, and conservation status for policy decisions. **Land Use Policy** 115:106038. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106038>
- Villanova PH, Torres CMME, Jacovine LAG et al. (2023) Physical and chemical properties of Coarse Woody Debris submitted to the natural process of decomposition in a Secondary Atlantic Forest Fragment in Brazil. **Sci Rep** 13:7377. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34526-9>
- Vital BR **Boletim Técnico: Métodos de Determinação de Densidade da Madeira**. (Sociedade de Investigações Florestais, 1984).
- Xu L et al. (2021) Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century. **Sci. Adv.** 7:eabe9829. [10.1126/sciadv.abe9829](https://doi.org/10.1126/sciadv.abe9829)

## **CAPÍTULO 1**

### **BIOMASSA TOTAL EM ÁREAS DE CERRADO E CARRASCO NO DOMÍNIO DA SAVANA NEOTROPICAL**

## Resumo

No domínio da Savana Neotropical, poucos estudos estimaram os estoques totais de biomassa, devido ao caráter moroso e oneroso dessas estimativas, especialmente da biomassa abaixo do solo. Neste estudo, foram realizados inventários florestais em áreas de cerrado sentido restrito e de Carrasco na região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil, com o objetivo de estimar e comparar os estoques totais e por compartimento de biomassa lenhosa, necromassa, serrapilheira e biomassa de raízes. A biomassa lenhosa foi estimada por equação alométrica regional, as raízes pelo método da trincheira, a necromassa pelo método da interseção de linha e a serrapilheira por gabarito. No cerrado sentido restrito, a biomassa total foi de 45,24 Mg ha<sup>-1</sup>, com predominância da biomassa lenhosa (20,47 Mg ha<sup>-1</sup>; 45%), seguida das biomassa de raízes (18,47 Mg ha<sup>-1</sup>; 41%), serrapilheira (5,49 Mg ha<sup>-1</sup>; 12%) e necromassa (0,81 Mg ha<sup>-1</sup>; 2%). No Carrasco, a biomassa total foi de 59,01 Mg ha<sup>-1</sup>, dominada pela biomassa de raízes (32,37 Mg ha<sup>-1</sup>; 55%), seguida pela biomassa lenhosa (16,57 Mg ha<sup>-1</sup>; 28%) e pela serrapilheira (8,39 Mg ha<sup>-1</sup>; 14%) e necromassa (1,68 Mg ha<sup>-1</sup>; 3%). As áreas de cerrado sentido restrito e Carrasco diferiram significativamente na composição florística, pela similaridade de Jaccard, e nos estoques de biomassa total, serrapilheira e biomassa de raízes, pelo teste de soma de postos de Wilcoxon, com  $\alpha$  igual a 5%. A AGB, a AGWB e a necromassa foram semelhantes entre as formações vegetais. A razão raiz:biomassa lenhosa (BGB:AGWB) foi inferior a 1 no cerrado sentido restrito e superior a 1 no Carrasco, aproximando-se, respectivamente, proporções observadas em savanas e em formações arbustivas e campestres ao redor do mundo. Apesar da elevada densidade de indivíduos lenhosos de pequeno diâmetro nas áreas de Carrasco, os indivíduos do cerrado sentido restrito contribuíram mais para o estoque total de biomassa por apresentarem maior diâmetro médio. Em contrapartida, o Carrasco investe mais na produção de biomassa radicular, em razão da elevada densidade de indivíduos e à sobreposição da malha de raízes, o que sugere limitações hídricas e nutricionais na subsuperfície, típicas de solos arenosos.

**Palavras-chave:** biomassa aérea, biomassa de raízes, Semiárido Brasileiro, árvores, arbustos

## Abstract

In the Neotropical Savanna domain, few studies have estimated total biomass stocks due to the time-consuming and costly nature of such measurements, especially belowground biomass. In this study, forest inventories were conducted in areas of cerrado *sensu stricto* and Carrasco in the northern and northwestern regions of the State of Minas Gerais, Brazil, with the aim of estimating and comparing total biomass stocks and by compartment: woody biomass, deadwood, litter, and root biomass. Woody biomass was estimated using a regional allometric equation, roots by the trench method, deadwood by the line-intersect method, and litter using a frame. In the cerrado *sensu stricto*, total biomass was 45.24 Mg ha<sup>-1</sup>, dominated by woody biomass (20.47 Mg ha<sup>-1</sup>; 45%), followed by root biomass (18.47 Mg ha<sup>-1</sup>; 41%), litter (5.49 Mg ha<sup>-1</sup>; 12%), and deadwood (0.81 Mg ha<sup>-1</sup>; 2%). In Carrasco, total biomass was 59.01 Mg ha<sup>-1</sup>, dominated by root biomass (32.37 Mg ha<sup>-1</sup>; 55%), followed by woody biomass (16.57 Mg ha<sup>-1</sup>; 28%), litter (8.39 Mg ha<sup>-1</sup>; 14%), and deadwood (1.68 Mg ha<sup>-1</sup>; 3%). The cerrado *sensu stricto* and Carrasco areas differed significantly in floristic composition, according to the Jaccard similarity index, and in total biomass, litter, and root biomass stocks, according to the Wilcoxon rank-sum test, at  $\alpha = 5\%$ . AGB, AGWB, and deadwood were similar between vegetation formations. The root-to-woody biomass ratio (BGB:AGWB) was below 1 in cerrado *sensu stricto* and above 1 in Carrasco, approximating, respectively, proportions observed in savannas and in shrubland and grassland formations worldwide. Despite the high density of small-diameter woody individuals in Carrasco, individuals in cerrado *sensu stricto* contributed more to total biomass stocks due to their larger mean diameter. Conversely, Carrasco invests more in root biomass production due to high individual density and overlapping root networks, suggesting water and nutrient limitations in the subsurface, typical of sandy soils.

**Keywords:** aboveground biomass, root biomass, Brazilian Semi-arid, trees, shrubs

## 1 INTRODUÇÃO

As savanas representam um componente importante da vegetação mundial, cobrindo um sexto da superfície terrestre (~20%) (Grace et al., 2006). No Brasil, as savanas são encontradas, predominantemente, no Cerrado (IBGE, 2019; Oliveras e Malhi, 2016), que é o segundo maior bioma brasileiro e da América do Sul (IBGE, 2019; MapBiomias, 2021).

Apesar da elevada biodiversidade do Cerrado (Klink e Machado, 2005; Myers et al., 2000), pouca atenção tem sido dada ao bioma, especialmente quando o foco é para serviços ecossistêmicos (Grace et al., 2006; Morandi et al., 2020). A degradação associada às mudanças no uso da terra no Cerrado (Klink et al., 2020; Strassburg et al., 2017; Colman et al., 2024) ocorre em ritmo acelerado, resultando em altas emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil (SEEG, 2021).

Como consequência, o bioma ocupa a segunda posição entre os maiores emissores de dióxido de carbono do país, sendo superado apenas pelo bioma Amazônia (Silva Junior et al., 2020; SEEG, 2021). As mudanças climáticas no Cerrado, decorrentes das emissões de gases de efeito estufa estão remodelando ativamente as comunidades dessa importante savana neotropical, onde o prolongamento da estação seca tende a diminuir a biomassa (Hofmann et al., 2025).

Com a crise climática mundial (IPCC, 2006), o número de pesquisas que buscam estimativas precisas dos estoques de carbono na biomassa (IPCC, 2023) tem aumentado. A biomassa é uma *proxy* do carbono (Pellegrini et al., 2018; Zhou et al., 2022) e é definida como a massa seca de origem biológica, viva ou morta, vegetal ou animal (Silveira et al., 2008).

No Cerrado, poucos são os estudos que quantificaram a biomassa total de suas formações vegetais (Righi et al., 2023), já que essa é uma atividade morosa e onerosa, que envolve a amostragem de vários compartimentos, acima e abaixo do nível do solo. A maioria das pesquisas já realizadas avaliou apenas a biomassa lenhosa (Ribeiro et al., 2011).

O Cerrado é representado por mosaico de formações vegetais (Ribeiro e Walter, 2008) que se distribuem entre formações florestais (floresta ciliar, mata de galeria, floresta seca e cerradão), savânicas (cerrado sentido restrito, savana parque, palmeiral e vereda) e campestres (campo limpo, campo sujo e campo rupestre). Porém, no âmbito do bioma também ocorrem outras importantes formas de vegetação que fazem transição com outros biomas brasileiros, como é o caso do Carrasco (Araujo et al., 1998), que ocorre na zona de transição entre o Cerrado

e a Caatinga (Felfili e Silva Júnior, 2001). A Caatinga é o bioma predominante e exclusivo do Brasil, típico da região semiárida.

Embora o Carrasco seja considerado um tipo formação vegetal da Caatinga, especialmente devido a sua caducifolia, suas características estruturais, como elevada densidade de indivíduos, uniestratificação aparente e quase ausência de cactáceas e bromeliáceas, justificam seu reconhecimento como um tipo vegetacional próprio, de transição (Andrade-Lima, 1978; Felfili e Silva Júnior, 2001).

Os poucos estudos existentes sobre a vegetação do Carrasco estão relacionados apenas a florística (Araújo, Martins e Shepherd, 1999), fenologia e dispersão de espécies lenhosas (Vasconcelos, Araújo e Lopes, 2010).

Dessa forma, o objetivo deste estudo foi estimar os estoques de biomassa total, incluindo os compartimentos acima (biomassa lenhosa, necromassa e serrapilheira) e abaixo (raízes) do solo, em áreas de cerrado sentido restrito e de Carrasco na região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Área de estudo**

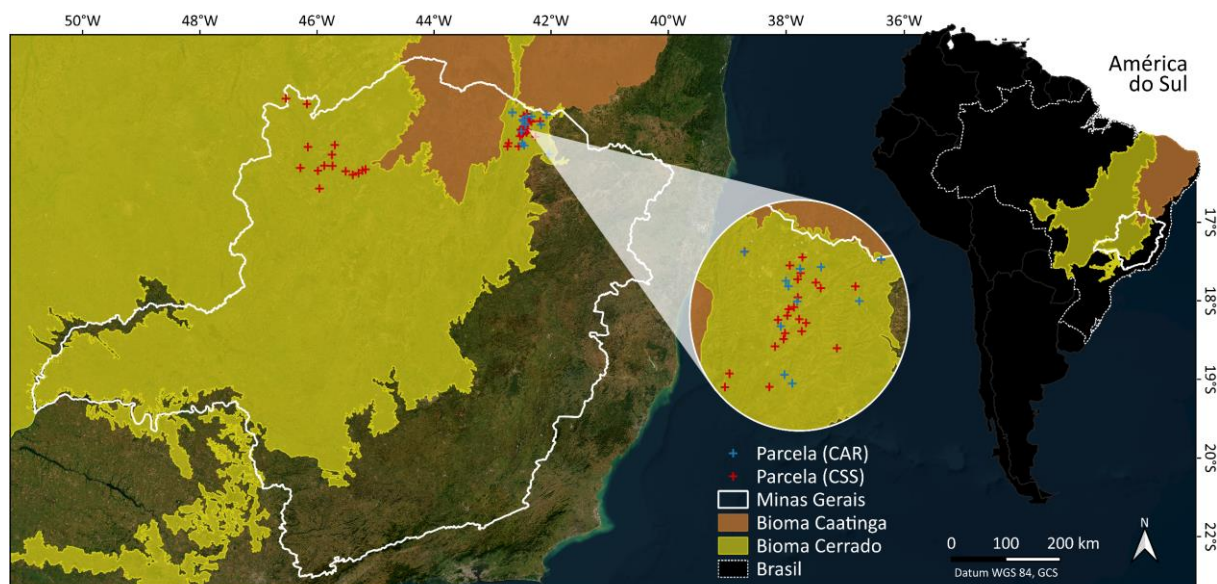
O estudo foi realizado em áreas de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR) (Ribeiro e Walter, 2008; Andrade-Lima, 1978), na região das bacias hidrográficas do Rio Pardo e do Rio Urucuia, localizadas, respectivamente, ao Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais – MG, Brasil (Figs. 1 e 2).

O Sistema Brasileiro de Cadastro Ambiental Rural (SICAR) foi utilizado para identificar o número e a localização geográfica de propriedades rurais na área das duas bacias hidrográficas. As propriedades estão distribuídas nos municípios de Vargem Grande, Montezuma, Indaiabira, Rio Pardo, São João do Paraíso e Taiobeiras, na região Norte de MG, e Pintópolis, Urucuia, Riachinho, Bonfinópolis, Uruana de Minas, Arinos e Formoso, na região Noroeste do estado.

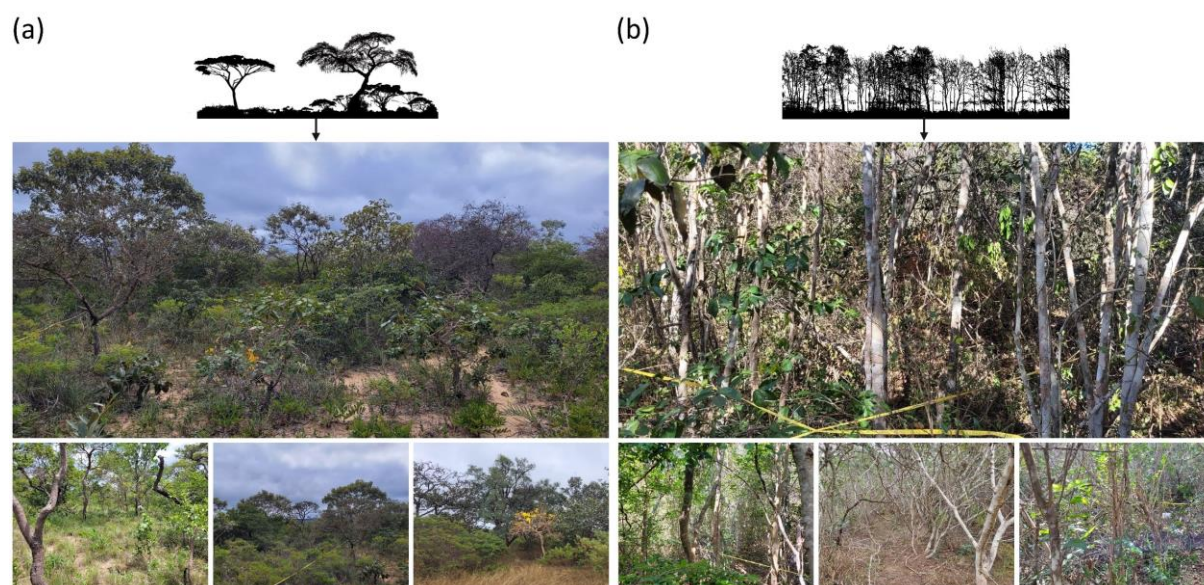
As áreas de CSS foram amostradas em todos os municípios citados, com exceção de Taiobeiras. Já as áreas de CAR foram avaliadas apenas nos municípios de Taiobeiras, Rio Pardo, São João do Paraíso, Vargem Grande e Montezuma, localizados na região Norte de MG.

A região é caracterizada por um clima tropical quente e úmido de savana (Aw - tropical (A), com estação seca no inverno (w) e temperatura média do mês mais frio  $\geq 18$  °C), de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (Alvares et al., 2013; Martins et al., 2018).

As normais climatológicas das estações do Instituto Nacional de Meteorologia (1991–2020) indicaram precipitação média anual em torno de 1.100 mm e temperatura média anual de 25 °C para a região Noroeste (estação de Arinos-MG) e de 820 mm e 24 °C para a região Norte (estação de Salinas-MG) (INMET, 2023).



**Figura 1.** Distribuição das unidades amostrais do inventário florestal realizado em áreas de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR), localizadas nas bacias hidrográficas do Rio Pardo e do Rio Urucuia, ao Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.



**Figura 2.** Visão das paisagens das unidades amostrais de (a) cerrado sentido restrito (CSS) e (b) Carrasco (CAR), localizadas nas bacias hidrográficas do Rio Pardo e do Rio Urucuia, ao Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.

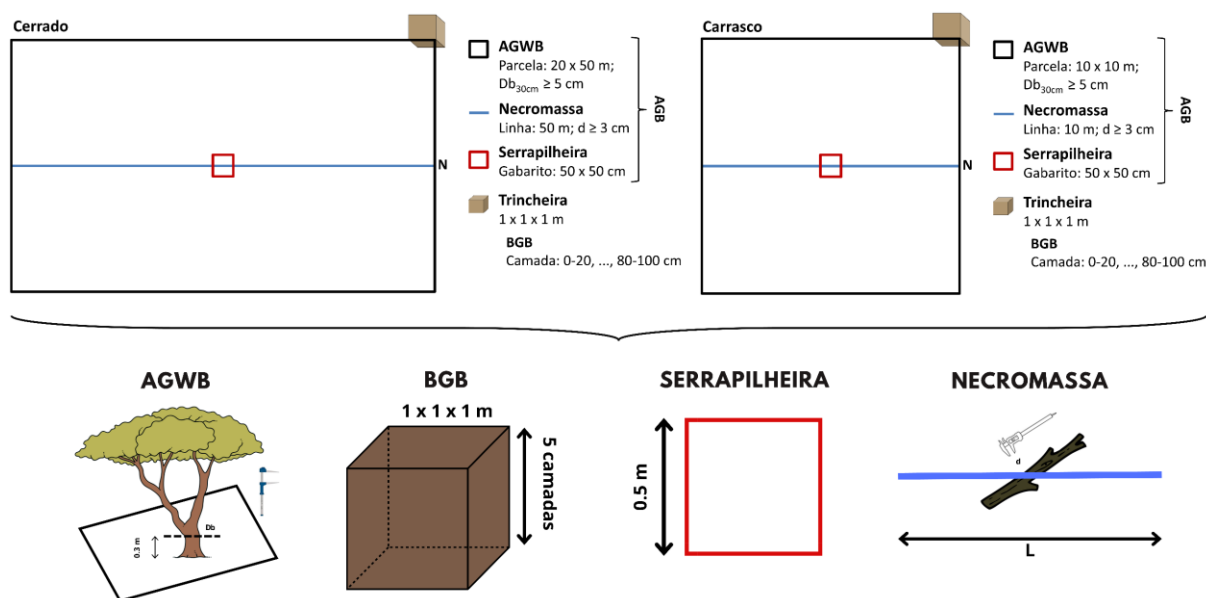
## 2.2 Coleta de dados

### 2.2.1 Inventário Florestal

As unidades amostrais temporárias (Fig. 1) foram alocadas de maneira aleatória dentro da de abrangência de estudo, considerando as propriedades rurais previamente selecionadas utilizando o SICAR. Estudos socioambientais e sobre o uso de sistemas silvipastoris na área de estudo precederam a alocação das unidades amostrais temporárias (Ribeiro et al., 2025).

Um total de 52 unidades amostrais foram alocadas, sendo 40 em ambiente de CSS e 12 em ambiente de CAR. No CSS foram utilizadas unidades amostrais de 1000 m<sup>2</sup> (20 × 50 m) e no CAR, as unidades amostrais foram de 100 m<sup>2</sup> (10 × 10 m). Os tamanhos das unidades amostrais (Fig. 3) foram definidos de acordo com o Manual de Parcelas Permanentes dos Biomas Cerrado e Pantanal (Felfili, Carvalho e Haidar, 2005).

Tanto no CSS quanto no CAR, todos os indivíduos lenhosos com diâmetro basal (Db), medido a 30 cm do solo, igual ou superior a 5 cm foram registrados e identificados botanicamente segundo o APG IV (APG, 2016). O Db foi mensurado com auxílio de suta. No caso de indivíduos com múltiplos fustes, foram incluídos no levantamento todos os fustes com  $Db \geq 5$  cm.



**Figura 3.** Esquema geral de amostragem aplicada para as áreas de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR). AGB e BGB = biomassa acima e abaixo do solo, respectivamente; AGWB = biomassa lenhosa; Db = diâmetro basal; d = diâmetro; L = comprimento da linha.

## 2.2.2 Estimativa do estoque total de biomassa (TB)

Para a estimativa do estoque TB no CSS e no CAR foram considerados os compartimentos da vegetação acima do solo (biomassa lenhosa de árvores e arbustos), necromassa e serrapilheira e abaixo do solo (raízes).

### 2.2.2.1 Biomassa lenhosa (AGWB)

A partir dos dados do inventário florestal nas áreas de CSS e CAR foram estimados os estoques de AGWB de cada indivíduo arbóreo e arbustivo amostrado, para obtenção da biomassa lenhosa de cada unidade amostral.

A biomassa da parte aérea de cada indivíduo lenhoso de cada formação vegetal foi estimada a partir da equação 1 (Morais et al., 2014), com uma transformação inversa para a escala original utilizando o fator de correção de Sprugel (Sprugel, 1983). A equação considera apenas a biomassa do fuste com casca, determinada até o diâmetro mínimo de 3,0 cm no topo do fuste.

$$AGWB = e^{-10.87846 + 2.84969 \cdot \ln(Db)} \cdot 1.0085 \quad (\text{Eq. 1})$$

em que AGWB = biomassa lenhosa do indivíduo *i* (Mg); Db = diâmetro basal do indivíduo *i*, medido a 30 cm do solo (cm); R<sup>2</sup>adj (coeficiente de determinação ajustado) = 0,94; Syx (erro padrão da estimativa) = 0,1301 (Mg) e 61,74 (%).

O conjunto de dados utilizado por Morais et al. (2014) foi proveniente do Inventário Florestal de Minas Gerais para o cerrado sentido restrito (Scolforo, Oliveira e Acerbi Júnior, 2008). Ao todo, foram cubadas 868 árvores pertencentes a 99 espécies, distribuídas em 70 gêneros e 37 famílias, amostradas em 20 fragmentos florestais localizados em diferentes regiões do estado. O volume individual de cada árvore foi obtido pelo método de Huber, e a biomassa foi obtida pelo produto do volume pela densidade básica da madeira, determinada mediante a retirada de discos em cinco posições ao longo da altura comercial.

### 2.2.2.2 Necromassa

A necromassa foi obtida pelo método da interseção de linha (Van Wagner, 1982). Para isto, uma linha amostral foi alocada no centro de cada unidade amostral de CSS e de cada unidade amostral de CAR. No CSS, o comprimento da linha (L) foi igual a 50 m e no CAR o comprimento foi igual a 10 m.

Devido às inúmeras terminologias relacionadas à madeira morta (FAO, 2025), a necromassa foi denominada detritos lenhosos, compreendendo galhos, tocos e árvores ou arbustos mortos e caídos no chão, ou seja, a biomassa lenhosa não viva que não é contabilizada como serrapilheira (Maas et al., 2020). Assim, todos os detritos lenhosos com diâmetro  $\geq 3$  cm que interceptaram a linha (L) ou sua projeção vertical, foram incluídos no levantamento. O diâmetro dos detritos foi mensurado com o auxílio de um paquímetro digital. Além disso, os detritos foram classificados quanto ao grau de decomposição em: (1) novo, (2) decomposição inicial e (3) decomposição avançada (SFB, 2019, 2021) (Tabela 1).

**Tabela 1.** Classificação da necromassa segundo os estágios de decomposição.

Classe de decomposição	Característica
1 - Novo	Presença de ramos e textura de madeira intacta.
2 - Decomposição inicial	Resquícios de casca, sem ramos e madeira firme.
3 - Decomposição avançada	Sem casca, sem ramos e madeira em estágio de decomposição médio a avançado, esfarelado.

Serviço Florestal Brasileiro (2019)

A massa de madeira morta para cada unidade amostral foi obtida utilizando a equação 2 (Van Wagner, 1982). A necromassa para foi dada pelo produto do volume e da densidade básica média ( $\rho$ ) (Tabela 2) dos detritos lenhosos que interceptaram a linha (L) em cada unidade amostral (Equação 2).

$$\text{Necromassa} = \pi \cdot \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{8 \cdot L} \cdot \rho_i \quad (\text{Eq. 2})$$

em que Necromassa = massa de madeira morta ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );  $d_i$  = diâmetro (cm) de cada peça que interceptou L; L = comprimento da linha (m);  $\rho_i$  = densidade básica média dos detritos por parcela ( $\text{g cm}^{-3}$ ), considerando o diâmetro e suas respectivas classes de decomposição.

**Tabela 2.** Densidade básica ( $\rho$ ) ( $\text{g cm}^{-3}$ ) segundo o grau de decomposição e diâmetro do detrito lenhoso.

Classe de diâmetro (cm)	Classe de decomposição		
	1	2	3
$2 < d < 4$	0,52	0,31	0,28
$4 \leq d < 6$	0,63	0,43	0,35
$6 \leq d < 8$	0,75	0,45	0,37
$8 \leq d < 10$	0,78	0,48	0,45
$\geq 10$	0,62	0,44	0,36

Luccas (2011)

### 2.2.2.3 Serrapilheira

No centro de cada unidade amostral implantada para o inventário do CSS e do CAR foi instalado um gabarito de 50 cm x 50 cm para coleta da serrapilheira, ou seja, detritos finos, não lenhosos (diâmetro < 3 cm). A serrapilheira de cada gabarito foi coletada e pesada para obtenção da massa total úmida. Uma subamostra da serrapilheira de cada gabarito foi retirada, pesada e colocada para secagem em estufa com circulação e renovação de ar a  $70 \pm 2$  °C até a obtenção da massa constante (variação  $\leq 1$  %), a fim de determinar a massa seca e, assim, a biomassa total seca de serrapilheira por unidade de área (Tedesco et al., 1995).

A massa seca de serrapilheira foi obtida pelo método da proporcionalidade (Torres et al., 2013), conforme a equação 3. Após a determinação da massa seca, os valores foram extrapolados para megagramas por hectare.

$$MS = MU \cdot \frac{Ms}{Mu} \quad (\text{Eq. 3})$$

em que MS = massa seca da amostra em campo (g); MU = massa úmida da amostra em campo (g); Ms = massa seca da subamostra (g); Mu = massa umidade da subamostra (g).

### 2.2.2.4 Biomassa de raízes (BGB)

Para a amostragem de raízes nas áreas de CSS e CAR, foi escavada uma trincheira de 1 m  $\times$  1 m  $\times$  1 m (1 m<sup>3</sup>), posicionada adjacente ao perímetro de cada unidade amostral implantada para o inventário da vegetação lenhosa. As raízes foram coletadas em camadas de 20 cm de profundidade, correspondentes a 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. Com auxílio de peneiras, as raízes foram separadas do solo.

Para cada camada, obteve-se a massa total úmida de raízes de cada amostra. Posteriormente, uma subamostra foi retirada das amostras de cada profundidade, para secagem em estufa com circulação e renovação de ar a  $70 \pm 2$  °C até que atingisse a massa constante (variação  $\leq 1$  %), a fim de determinar a massa seca e, assim, a biomassa total seca de raízes por camada (Tedesco et al., 1995).

A determinação da massa seca de raízes adotou o mesmo procedimento utilizado da determinação da massa seca da serrapilheira.

## 2.3 Análise de dados

### 2.3.1 Florística, diversidade e estrutura da vegetação

A florística do CSS e do CAR foi avaliada pela riqueza (S) e pela diversidade de espécies. A riqueza considerou o número de famílias, gêneros e espécies registrado em cada formação vegetal.

Os índices de Shannon-Wiener (Magurran, 1988) e de Uniformidade ou Equabilidade de Pielou (J') (Pielou, 1966, 1975) foram utilizados para avaliar a diversidade florística (Tabela 3). Em geral, o Índice de Shannon-Wiener (H') varia entre 1,5 e 3,5, e, excepcionalmente, ultrapassa 4,5. Quando se opta pela base de logaritmos naturais, as propriedades matemáticas de H' demonstram maior consistência e coerência. Portanto, é fortemente recomendado o uso de nats por indivíduo (Hutcheson, 1970), acompanhando a tendência global em direção ao uso da base natural (Magurran, 1988; May, 1975). A proporção relativa das espécies (J') é derivada de H' e reflete o grau de uniformidade na distribuição dos indivíduos entre as diferentes espécies presentes.

A similaridade florística entre o CSS e o CAR foi avaliada por meio de um diagrama de Venn e do Índice de Similaridade de Jaccard (J) (Mueller-Dombois e Ellenberg, 1974), que considera o número de espécies comuns (c) entre duas áreas e o número de espécies exclusivas de cada uma delas (a, b) (Tabela 3).

**Tabela 3.** Fórmulas utilizadas na análise florística e de diversidade da vegetação lenhosa de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR).

Índice	Fórmula
Diversidade de Shannon-Weiner (H')	$H' = - \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{N} \cdot \ln \left( \frac{n_i}{N} \right)$
Equabilidade de Pielou (J')	$J' = \frac{H'}{\ln(S)}$
Similaridade de Jaccard (J)	$J = \frac{c}{a + b - c}$

em que N = Número total de indivíduos amostrados;  $n_i$  = Número de indivíduos amostrados da espécie i; S = Número total de espécies; ln = logaritmo natural; a = Número de espécies da área A; b = Número de espécies da área B; c = Número de espécies comuns entre A e B.

A estrutura da vegetação foi avaliada por meio da análise fitossociológica de cada formação vegetal e considerou as variáveis densidade, dominância e frequência das espécies e, conseqüentemente, o correspondente Valor de Importância (VI%). O VI% expressa o nível de relevância ecológica de cada espécie amostrada em cada formação vegetal (Taylor, Kent e

Coker, 1993) (Tabela 4) e resulta da soma dos valores relativos das métricas citadas anteriormente. A estrutura horizontal da vegetação também foi avaliada em função da distribuição diamétrica dos indivíduos, com intervalos de classe de 5 cm.

**Tabela 4.** Fórmulas utilizadas na análise da fitossociologia da vegetação lenhosa do cerrado sentido restrito (CSS) e do Carrasco (CAR).

Variável	Unidade	Fórmula
Área basal da espécie i ( $G_i$ )	$m^2 ha^{-1}$	$G_i = \sum_{i=1}^n \frac{\pi \cdot Db_i^2}{40.000}$
Densidade absoluta da espécie i ( $DA_i$ )	indivíduos $ha^{-1}$	$DA_i = \frac{n_i}{A}$
Densidade relativa da espécie i ( $DR_i$ )	%	$DR_i = \frac{DA_i}{\sum_{i=1}^n DA_i} \cdot 100$
Dominância absoluta da espécie i ( $DoA_i$ )	$m^2 ha^{-1}$	$DoA_i = \frac{G_i}{A}$
Dominância relativa da espécie i ( $DoR_i$ )	%	$DoR_i = \frac{DoA_i}{\sum_{i=1}^n DoA_i} \cdot 100$
Frequência absoluta da espécie i ( $FA_i$ )	%	$FA_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \cdot 100$
Frequência relativa da espécie i ( $FR_i$ )	%	$FR_i = \frac{FA_i}{\sum_{i=1}^n FA_i} \cdot 100$
Valor de importância da espécie i ( $VI_i$ )	%	$IV_i = \frac{DR_i + DoR_i + FR}{3}$

$Db_i$  = diâmetro basal, medido a 30 cm do solo do indivíduo i (cm);  $P_i$  = Número de unidades amostrais com ocorrência da espécie i;  $n_i$  = Número de indivíduos amostrados da espécie i.

### 2.3.2 Análise da biomassa

A biomassa total (TB) para o CSS e para o CAR foi obtida pela soma da biomassa lenhosa (AGWB), da necromassa, da serrapilheira e da biomassa abaixo do solo (BGB).

Para fins de comparação entre CSS e CAR, o diâmetro basal mínimo de inclusão dos indivíduos adotado nas análises foi  $Db \geq 5$  cm, uma vez que a densidade de indivíduos por unidade de área no Carrasco é muito superior à do Cerrado, situação que seria acentuada caso o limite fosse  $Db \geq 3$  cm.

A comparação entre as duas formações vegetais (CSS e CAR) quanto aos estoques totais de biomassa e os estoques por compartimento foi realizada a partir do teste da soma dos postos de Wilcoxon (Mann-Whitney para amostras independentes) (Wilcoxon, 1945), uma alternativa não paramétrica ao teste  $t$ , devido à violação da normalidade dos dados, verificada pelo teste de Shapiro-Wilk (Shapiro e Wilk, 1965). O mesmo procedimento foi adotado para comparar a biomassa de raízes, por camada, entre as duas formações vegetais. O nível de significância

adotado foi  $\alpha < 0,05$ . Todas as análises estatísticas e gráficas foram realizadas no software R (R Core Team, 2025).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Florística, diversidade e estrutura florestal

Para as áreas de CSS foram encontrados 920 ind. ha<sup>-1</sup>, distribuídos em 44 famílias botânicas e 150 espécies. Dentre as famílias identificadas, as mais ricas em número de espécies foram Fabaceae com 32 espécies, Vochysiaceae com 11 espécies, Myrtaceae com 9 espécies, Rubiaceae com 7 espécies, Bignoniaceae com 6 espécies e Malpighiaceae com 5 espécies. As famílias mais numerosas, com mais de 100 ind. ha<sup>-1</sup>, foram: Vochysiaceae (201 ind. ha<sup>-1</sup>), Fabaceae (182 ind. ha<sup>-1</sup>), Myrtaceae (152 ind. ha<sup>-1</sup>) e Combretaceae com (53 ind. ha<sup>-1</sup>). Já as famílias Boraginaceae, Celastraceae, Chrysobalanaceae, Lamiaceae, Rutaceae e Solanaceae tiveram apenas um indivíduo por hectare, sendo, portanto, consideradas raras na comunidade.

As espécies com maior número de indivíduos por hectare foram: *Eugenia dysenterica* (145 ind. ha<sup>-1</sup>), *Qualea parviflora* (77 ind. ha<sup>-1</sup>) e *Callisthene fasciculata* (52 ind. ha<sup>-1</sup>). As três principais espécies em termos de densidade, frequência e dominância relativas, foram *Eugenia dysenterica*, *Qualea parviflora* e *Qualea grandiflora*, com valores de importância (VI%) iguais a 11,2, 6,7 e 4,0 %, respectivamente. Juntas, somaram 22% do VI%. O índice de Shannon-Weiner (H') encontrado foi de 3,80 e a equabilidade de Pielou (J') igual a 0,80 (Tabela 5).

**Tabela 5.** Parâmetros estimados da vegetação nas áreas de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR), Minas Gerais, Brasil.

Vegetação	Db médio (cm)	Db máximo (cm)	G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	N (Indivíduos ha <sup>-1</sup> )	S (No. de espécies)	H'	J'	J
CSS	9,3	48,8	8,0744	920	150	3,80	0,80	0,10
CAR	7,1	21,0	9,3486	1675	45	3,13	0,82	

Db = diâmetro basal médio e máximo, medido a 0.3 m do solo  $\geq 5$  cm; G = área basal; N = Número de indivíduos lenhosos; S = riqueza de espécies; H' = índice de diversidade de Shannon-Wiener; J' = índice de equabilidade de Pielou; J = índice de similaridade de Jaccard.

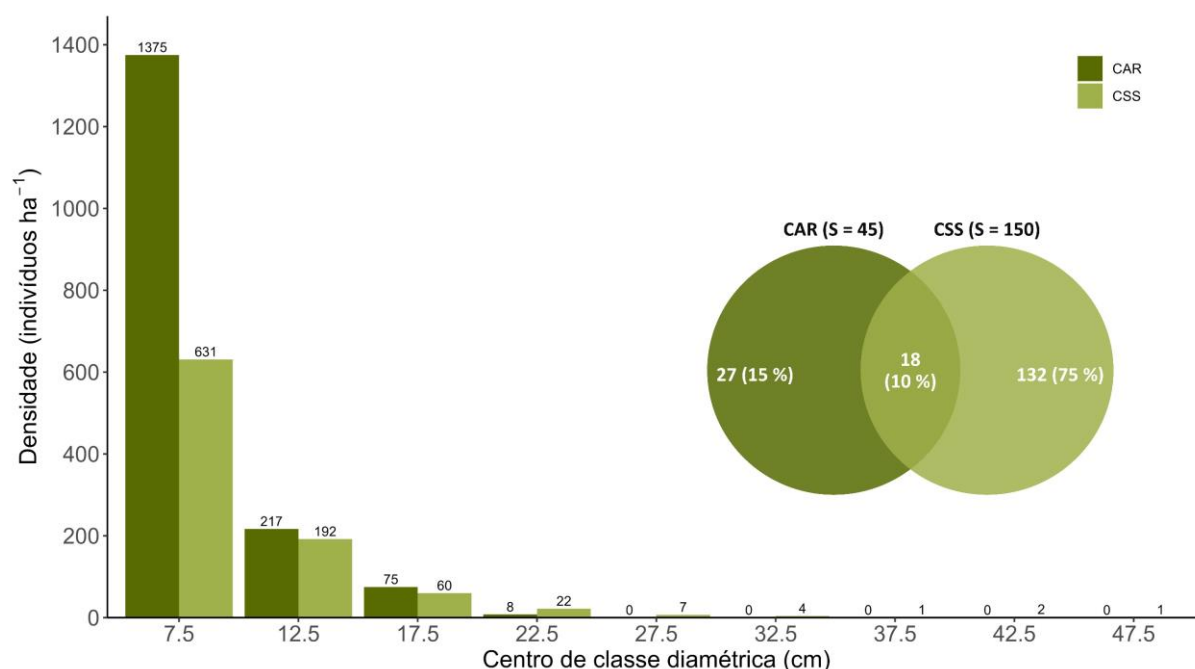
Para as áreas de CAR foram registrados 1.675 ind. ha<sup>-1</sup>, distribuídos em 18 famílias botânicas e 45 espécies. Dentre as famílias identificadas, as mais ricas em número de espécies foram Fabaceae com 17 espécies, Euphorbiaceae com 4 espécies, Erythroxylaceae e Myrtaceae com 3 espécies cada, e Annonaceae, Rutaceae, Rubiaceae e Combretaceae com 2 espécies cada. Sapotaceae, Salicaceae, Apocynaceae, Polygonaceae, Sapindaceae, Vochysiaceae, Solanaceae, Lauraceae, Malvaceae e Proteaceae apresentaram apenas 1 espécie cada.

As famílias mais numerosas, com mais de 100 ind. ha<sup>-1</sup>, foram Fabaceae (800 ind. ha<sup>-1</sup>), Vochysiaceae (275 ind. ha<sup>-1</sup>), Rutaceae (150 ind. ha<sup>-1</sup>) e Euphorbiaceae (92 ind. ha<sup>-1</sup>).

As espécies com maior número de indivíduos por hectare foram: *Pseudopiptadenia brenanii* (308 ind. ha<sup>-1</sup>), *Callisthene major* (275 ind. ha<sup>-1</sup>) e *Metrodorea mollis* (133 ind. ha<sup>-1</sup>). Essas três espécies também foram as principais em termos de densidade, frequência e dominância relativas, com valores de importância (VI%) iguais a 18,6, 11,4 e 6,8 %, respectivamente. Juntas, somaram 37% do VI%. O índice de Shannon-Weiner (H') encontrado foi de 3,13 e a equabilidade de Pielou (J') igual a 0,82.

O diagrama de Venn (Fig. 4) apresenta a riqueza de espécies (S) igual a 150 e 45 para as áreas de CSS e CAR, respectivamente. As áreas compartilham apenas 10% (18) do número total de espécies, o que corresponde a um índice de Jaccard (J) igual a 0,10 (Tabela 5).

Quanto à estrutura horizontal das áreas de cada formação vegetal, a distribuição de indivíduos entre classes de diâmetro seguiu um modelo de distribuição em J-reverso ou exponencial negativo, com a maioria dos indivíduos concentrada nas classes menores. A primeira classe de diâmetro (5-10 cm) representou 69% e 82% do total de indivíduos por hectare nas áreas de CSS e CAR, respectivamente. A classe seguinte (10-15 cm) representou 21% e 13% dos indivíduos amostrados, nas áreas de CSS e CAR, respectivamente.



**Figura 4.** Estrutura horizontal e diagrama de Venn da riqueza de espécies (S) da vegetação de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR), na região Norte e Noroeste de Minas Gerais, Brasil.

### 3.2 Estoques de biomassa

O estoque total de biomassa estimado para as áreas de CSS foi de 45,24 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo distribuído de forma decrescente entre os compartimentos analisados da seguinte forma: biomassa lenhosa (AGWB) (20,47 Mg ha<sup>-1</sup>; 45%), biomassa de raízes (BGB) (18,47 Mg ha<sup>-1</sup>; 41%), serrapilheira (5,49 Mg ha<sup>-1</sup>; 12%) e necromassa (0,81 Mg ha<sup>-1</sup>; 2%). A biomassa total acima do solo (AGB) correspondeu a 26,77 Mg ha<sup>-1</sup>. A razão BGB:AGB foi igual a 0,69 e a razão BGB:AGWB foi igual a 0,90 (Tabela 6).

Para o CAR, o estoque estimado para a biomassa total foi de 59,01 Mg ha<sup>-1</sup>. Em ordem decrescente, a contribuição desse estoque para cada compartimento da biomassa ficou definida da seguinte forma: BGB (32,37 Mg ha<sup>-1</sup>; 55%); AGWB (16,57 Mg ha<sup>-1</sup>; 28%); serrapilheira (8,39 Mg ha<sup>-1</sup>; 14%) e necromassa (1,68 Mg ha<sup>-1</sup>; 3%). A AGB totalizou 26,50 Mg ha<sup>-1</sup>. A razão BGB/AGB foi igual a 1,22 e a razão BGB/AGWB foi igual a 1,95 (Tabela 6).

**Tabela 6.** Medidas descritivas dos estoques totais e por compartimento da biomassa em áreas de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR), na região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.

Biomassa	CSS (Média ± SD)	n	CAR (Média ± SD)	n
<b>AGB<sup>ns</sup> (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>	26,77 ± 12,88	40	26,64 ± 7,76	12
AGWB <sup>ns</sup>	20,47 ± 11,26	40	16,57 ± 8,58	12
Necromassa <sup>ns</sup>	0,81 ± 1,62	40	1,68 ± 2,33	12
Serrapilheira*	5,49 ± 4,18	40	8,39 ± 3,60	12
<b>BGB** (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>	18,47 ± 10,88	40	32,37 ± 9,97	12
0-20 cm**	8,49 ± 6,13	40	18,37 ± 6,97	12
20-40 cm <sup>ns</sup>	5,01 ± 4,14	40	6,43 ± 2,87	12
40-60 cm <sup>ns</sup>	2,75 ± 2,63	40	3,13 ± 1,47	12
60-80 cm <sup>ns</sup>	2,19 ± 1,84	25	2,58 ± 1,72	12
80-100 cm <sup>ns</sup>	1,37 ± 1,61	25	1,86 ± 0,98	12
<b>TB* (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>	45,24 ± 17,32	40	59,01 ± 13,63	12
<b>BGB/AGWB</b>	0,90		1,95	
<b>BGB/AGB</b>	0,69		1,22	

TB = biomassa total; AGB e BGB = biomassa acima e abaixo do solo, respectivamente; AGWB = biomassa lenhosa; SD = desvio padrão; n = Número de unidades amostrais. Significativo entre CSS e CAR a 99% (\*\*), 95% (\*) e não significativo (<sup>ns</sup>), de acordo com o teste de Wilcoxon (Mann-Whitney para amostras independentes).

De acordo com o teste de Wilcoxon, para os estoques de biomassa total (TB) e por compartimento, foram observadas diferenças significativas entre as áreas de CSS e CAR para TB ( $P < 0,05$ ), BGB ( $P < 0,01$ ) e serrapilheira ( $P < 0,05$ ). Quanto aos estoques de AGB, AGWB e necromassa, não foram detectadas diferenças significativas, sendo semelhantes entre as formações vegetais (Tabela 6).

Apenas raízes com diâmetros entre 2 mm e 5 cm foram encontradas nas amostras. Raízes com diâmetros menores que 2 mm não podem ser distinguidas de forma confiável da matéria orgânica do solo (Higa et al., 2014). Raízes com  $d \geq 5$  cm não foram registradas nas amostras, pois, tais raízes não são adequadamente amostradas pelo método de trincheira em apenas um ponto da unidade amostral. Raízes dessa classe de tamanho são normalmente incluídas na amostragem destrutiva de indivíduos lenhosos que permite a escavação de todo o sistema radicular.

Para as áreas de CSS, o estoque de biomassa subterrânea diminuiu com a profundidade. Os valores encontrados foram de 8,49 Mg ha<sup>-1</sup> na camada de 0-20 cm, 5,01 Mg ha<sup>-1</sup> na camada de 20-40 cm, 2,75 Mg ha<sup>-1</sup> na camada de 40-60 cm, 2,19 Mg ha<sup>-1</sup> na camada de 60-80 cm e 1,37 Mg ha<sup>-1</sup> na camada de 80-100 cm (Tabela 6).

Nas áreas de CAR, também houve redução da biomassa de raízes com a profundidade. Os valores encontrados foram de 18,37 Mg ha<sup>-1</sup> na camada de 0-20 cm, 6,43 Mg ha<sup>-1</sup> na camada de 20-40 cm, 3,13 Mg ha<sup>-1</sup> na camada de 40-60 cm, 2,58 Mg ha<sup>-1</sup> na camada de 60-80 cm e 1,86 Mg ha<sup>-1</sup> na camada de 80-100 cm (Tabela 6).

A análise pelo teste de Wilcoxon revelou diferenças significativas do estoque de biomassa abaixo do solo entre CSS e CAR apenas na primeira camada de 0-20 cm ( $P < 0,01$ ). Nas demais camadas (20-100 cm), não foram observadas diferenças significativas (Tabela 6).

Para as áreas de CSS, as três espécies que mais estocaram biomassa lenhosa foram *Caryocar brasiliense* (2,86 Mg ha<sup>-1</sup>), *Eugenia dysenterica* (2,29 Mg ha<sup>-1</sup>) e *Qualea parviflora* (1,74 Mg ha<sup>-1</sup>) que juntas representaram 34% do total lenhoso (Tabela 7).

Por outro lado, no CAR, as três espécies mais importantes segundo o VI% foram também as que mais estocaram biomassa lenhosa, ou seja, *Pseudopiptadenia brenanii* (5,19 Mg ha<sup>-1</sup>), *Callisthene major* (1,86 Mg ha<sup>-1</sup>) e *Metrodorea mollis* (1,84 Mg ha<sup>-1</sup>). Juntas representam mais da metade (54%) da biomassa total lenhosa estocada nessa formação vegetal (Tabela 7).

**Tabela 7.** Fitossociologia das 10 espécies ranqueadas segundo o estoque de biomassa lenhosa em áreas de cerrado sentido restrito (CSS) e Carrasco (CAR) na região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.

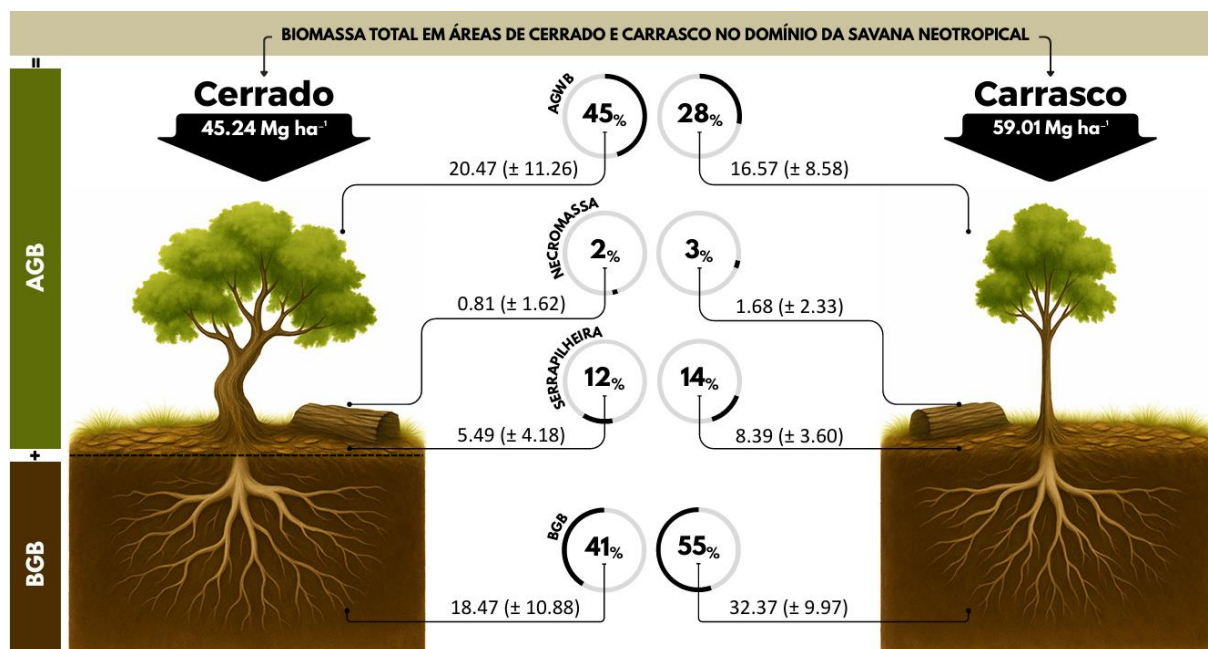
Espécies	Autor	Família	AGWB	FA	FR	DA	DR	DoA	DoR	VI
<b>Cerrado</b>										
<i>Caryocar brasiliense</i>	Cambess.	Caryocaraceae	2,8627	37,5	2,1	15,3	1,7	0,6526	8,1	4,0
<i>Eugenia dysenterica</i>	(Mart.) DC.	Myrtaceae	2,2883	72,5	4,1	145,0	15,8	1,1070	13,7	11,2
<i>Qualea parviflora</i>	Mart.	Vochysiaceae	1,7397	65,0	3,7	77,3	8,4	0,6522	8,1	6,7
<i>Terminalia fagifolia</i>	Mart.	Combretaceae	1,5090	35,0	2,0	32,0	3,5	0,4339	5,4	3,6
<i>Hymenaea stigonocarpa</i>	Mart. ex Hayne	Fabaceae	0,8875	47,5	2,7	21,0	2,3	0,2953	3,7	2,9
<i>Qualea grandiflora</i>	Mart.	Vochysiaceae	0,8339	57,5	3,3	40,0	4,3	0,3580	4,4	4,0

Tab. 7 Cont.

Espécies	Autor	Família	AGWB	FA	FR	DA	DR	DoA	DoR	VI
<b>Cerrado</b>										
<i>Callisthene fasciculata</i>	Mart.	Vochysiaceae	0,7877	12,5	0,7	52,3	5,7	0,3820	4,7	3,7
<i>Vochysia thyrsoidea</i>	Pohl	Vochysiaceae	0,7556	17,5	1,0	11,3	1,2	0,2211	2,7	1,7
<i>Tachigali subvelutina</i>	(Benth.) Oliveira-Filho	Fabaceae	0,6141	25,0	1,4	12,8	1,4	0,2108	2,6	1,8
<i>Machaerium opacum</i>	Vogel	Fabaceae	0,5942	47,5	2,7	18,0	2,0	0,2253	2,8	2,5
<b>Total (Top 10 espécies ordenadas pela biomassa)</b>			<b>12,8728</b>	<b>417,5</b>	<b>23,8</b>	<b>424,8</b>	<b>46,2</b>	<b>4,5383</b>	<b>56,2</b>	<b>42,1</b>
<b>Total (Todas as espécies)</b>			<b>20,4711</b>	<b>1752,5</b>	<b>100</b>	<b>919,8</b>	<b>100</b>	<b>8,0744</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>Carrasco</b>										
<i>Pseudopiptadenia brenanii</i>	G.P.Lewis & M.P.Lima	Fabaceae	5,1933	75,0	11,0	308,3	18,4	2,4728	26,5	18,6
<i>Callisthene major</i>	Mart.	Vochysiaceae	1,8625	33,3	4,9	275,0	16,4	1,2096	12,9	11,4
<i>Metrodorea mollis</i>	Taub.	Rutaceae	1,8263	16,7	2,4	133,3	8,0	0,9330	10,0	6,8
<i>Copaifera langsdorffii</i>	Desf.	Fabaceae	0,8752	41,7	6,1	66,7	4,0	0,4618	4,9	5,01
<i>Dalbergia miscolobium</i>	Benth.	Fabaceae	0,7753	16,7	2,4	33,3	2,0	0,3436	3,7	2,70
<i>Aspidosperma oliganthum</i>	Woodson	Apocynaceae	0,6306	25,0	3,7	33,3	2,0	0,3050	3,3	2,97
<i>Calliandra macrocalyx</i>	Harms	Fabaceae	0,5452	8,3	1,2	66,7	4,0	0,3374	3,6	2,94
<i>Erythroxylum daphnites</i>	Mart.	Erythroxylaceae	0,4788	8,3	1,2	50,0	3,0	0,2968	3,2	2,46
<i>Machaerium acutifolium</i>	Vogel	Fabaceae	0,4174	8,3	1,2	41,7	2,5	0,2223	2,4	2,03
<i>Roupala montana</i>	Aubl.	Proteaceae	0,2810	33,3	4,9	41,7	2,5	0,1980	2,1	3,16
<b>Total (Top 10 espécies ordenadas pela biomassa)</b>			<b>12,8856</b>	<b>266,7</b>	<b>39,0</b>	<b>1050,0</b>	<b>62,7</b>	<b>6,7803</b>	<b>72,5</b>	<b>58,1</b>
<b>Total (Todas as espécies)</b>			<b>16,5718</b>	<b>683,3</b>	<b>100</b>	<b>1675,0</b>	<b>100</b>	<b>9,3486</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

AGWB = biomassa lenhosa ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); FA = frequência absoluta (%); FR = frequência relativa (%); DA = densidade absoluta ( $\text{ind. ha}^{-1}$ ); DR = densidade relativa (%); DoA = dominância absoluta ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ); DoR = dominância relativa (%); VI = valor de importância (%).

### 3.3 RESUMO GRÁFICO



## 4 DISCUSSÕES

### 4.1 Florística, diversidade e estrutura da vegetação

Dentre as famílias registradas no CSS, as mais ricas em número de espécies, como Vochysiaceae, Fabaceae, Malpighiaceae e Myrtaceae são consideradas hiperdominantes no bioma (Alvarez et al., 2025). Quanto às espécies, o gênero *Qualea*, que inclui as espécies *Q. parviflora* e *Q. grandiflora*, abundantes nas áreas de estudo, é o mais dominante da savana brasileira (Cerrado) e as duas espécies apresentadas são comuns e de ampla distribuição no bioma (Françoso, Haidar e Machado, 2016; Alvarez et al., 2025). Corroborando essas verificações, *Q. parviflora* ocupou, respectivamente, a segunda e terceira posição do ranking de valor de importância (VI%) e de estoque de biomassa lenhosa nas áreas de CSS.

Apesar da escassez de informações para o CAR, os estudos existentes sobre diversidade florística, mostram que Fabaceae e Euphorbiaceae se destacam entre as famílias botânicas mais ricas em número de espécies (Araújo et al., 1998; Vasconcelos, Araújo e Lopes, 2010).

Além disso, as áreas não apresentaram similaridade florística, uma vez que o índice de Jaccard calculado foi considerado baixo ( $J < 50\%$ ) (Gauch, 1982). Esse resultado reforça as diferenças florísticas entre o Cerrado e o Carrasco.

Quanto à estrutura horizontal, os indivíduos lenhosos tanto do CSS quanto do CAR se concentraram principalmente nas menores classes de diâmetro, conforme ocorre na maioria das formações tropicais (Harper, 1977), indicando que as comunidades das duas formações vegetais apresentam distribuição diamétrica equilibrada (Meyer, 1952). O CAR apresentou, majoritariamente, indivíduos com diâmetro inferior a 10 cm. Os maiores indivíduos ocorreram na classe de 20-25 cm. O CSS apresentou média de diâmetro basal inferior a 10 cm, porém os maiores indivíduos atingiram cerca de 45 cm a 50 cm de diâmetro, ou seja, o dobro do CAR.

O Cerrado e o Carrasco também diferem quanto à densidade de indivíduos por unidade de área, sendo essa uma das principais características que definem o Carrasco como uma fisionomia própria (Andrade-Lima, 1978).

### 4.2 Estoques de biomassa

Apesar da maior densidade de indivíduos nas áreas de Carrasco, os indivíduos do cerrado sentido restrito contribuíram mais com o estoque total de biomassa, por apresentarem maior diâmetro médio. Em contrapartida, a contribuição da BGB no estoque total de biomassa foi maior nas áreas ocupadas por CAR.

As áreas de CSS e CAR diferiram tanto na composição florística quanto nos estoques de biomassa, apresentando diferenças nos estoques totais, na serrapilheira e na biomassa de raízes superficiais (0–20 cm), com destaque para o maior estoque subterrâneo nas áreas de CSS. Dessa forma, além da savana brasileira, o CAR também merece atenção em estudos de biomassa que considerem tanto a fração aérea quanto a fração subterrânea.

Como a densidade de indivíduos no CAR é muito maior que a densidade no CSS, a proximidade entre os indivíduos resulta em uma grande sobreposição da malha radicular (Zeng et al., 2021), favorecendo a amostragem de raízes de menor diâmetro pelo método da trincheira. Além disso, essa fisionomia se caracteriza pela grande abundância de trepadeiras (Araújo e Martins, 1999).

A estrutura densa e de baixo porte da vegetação do CAR, associada a solos arenosos (Araújo e Martins, 1999), desenvolvidos sobre areias quartzosas (atualmente classificados como Neossolos Quartzênicos) (Ribeiro e Walter, 2008) e pobres em nutrientes, sugere limitações hídricas e nutricionais nas camadas mais profundas do solo. Dessa forma, espera-se que as plantas dessa fisionomia desenvolvam sistemas radiculares predominantemente superficiais, densos e altamente ramificados.

Apesar dessas evidências, os estudos sobre essa vegetação ainda são relativamente escassos (Ribeiro e Walter, 2008; Vasconcelos, Araújo e Lopes, 2010), especialmente quanto ao vínculo sugerido na literatura com a vegetação de Cerrado (Araújo et al., 1998; Araújo e Martins, 1999; Araújo, Martins e Shepherd, 1999; Oliveira et al., 1997). Além disso, até o momento não há registros de artigos científicos que tenham estimado os estoques de biomassa para o Carrasco, de modo que este trabalho possivelmente representa um dos primeiros esforços nesse sentido.

A biomassa total (soma das partes acima e abaixo do solo, medida até 2 m de profundidade) no Brasil Central varia de 21,8 Mg ha<sup>-1</sup> em campo sujo a 77,8 Mg ha<sup>-1</sup> em cerrado denso (Bustamante et al., 2012). Os estoques médios de TB encontrados neste estudo para CSS ( $\approx$  45 Mg ha<sup>-1</sup>) e CAR ( $\approx$  59 Mg ha<sup>-1</sup>) situaram-se dentro dessa faixa.

Em áreas de cerrado sentido restrito no estado de Minas Gerais, foram registrados valores de 62,96 Mg ha<sup>-1</sup> para árvores, 4,68 Mg ha<sup>-1</sup> para arbustos, 6,32 Mg ha<sup>-1</sup> para serrapilheira e 37,51 Mg ha<sup>-1</sup> para raízes, valores superiores aos encontrados neste estudo, mas associados a maior densidade (2086 ind. ha<sup>-1</sup>) e área basal (14,90 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) (Ribeiro et al., 2011).

Embora Terra et al. (2023) tenham trabalhado com estoques de carbono, foi possível estimar os valores correspondentes de biomassa por meio da conversão utilizando o fator 0,471 (47,1%  $\pm$  0,4) proposto por Thomas e Martin (2012), também adotado pelos autores. Resultados

superiores foram reportados para áreas do Sudeste do Brasil, com biomassa lenhosa média de  $\approx 51,80 \text{ Mg ha}^{-1}$  e biomassa subterrânea de  $\approx 30,23 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Terra et al., 2023). Esses valores estão majoritariamente associados a sítios não antropizados e a estudos que separaram raízes finas ( $d < 5 \text{ mm}$ ) e grossas ( $d \geq 5 \text{ mm}$ ), também pelo método da trincheira. No estudo citado anteriormente ocorreu o fenômeno denominado “floresta invertida”, no qual o estoque subterrâneo foi maior que o estoque lenhoso (Durigan, Melo e Brewer, 2012), o que também foi observado nas áreas de CAR deste estudo, mas não nas áreas de CSS.

Além dos valores absolutos dos estoques, uma das relações mais utilizadas para descrever a alocação de biomassa nas plantas é a razão raiz:biomassa lenhosa, frequentemente empregada para estimar a biomassa radicular a partir da biomassa acima do solo, mais facilmente mensurável. Neste estudo, a proporção entre biomassa subterrânea e biomassa lenhosa foi  $< 1$  (0,90) para as áreas de CSS. Esse valor é superior às relações médias relatadas para savanas tropicais em diferentes regiões do mundo (0,67) (Mokany, Ralston e Prokushkin, 2006), bem como às observadas em cerrados sentido restrito nos estados de Minas Gerais (0,60) (Ribeiro et al., 2011) e São Paulo (0,73) (Durigan, Melo e Brewer, 2012).

Por outro lado, devido ao elevado estoque subterrâneo observado, a proporção entre biomassa subterrânea e biomassa lenhosa foi  $> 1$  (1,95) nas áreas de CAR. Esse valor aproxima-se das proporções registradas globalmente para vegetações arbustivas (1,84) e campestres (1,89) (Mokany, Ralston e Prokushkin, 2006), o que é coerente com a característica arbustiva decídua tropical dessa formação no semiárido brasileiro (Araújo e Martins, 1999; Vasconcelos, Araújo e Lopes, 2010).

A alta frequência de fogo comumente relatada para o domínio da Savana Neotropical (Ledru et al., 2026) contribui para explicar a elevada proporção de biomassa subterrânea nas savanas. Diferentemente da biomassa acima do solo (Pellegrini et al., 2018), a biomassa subterrânea raramente é diretamente afetada (Miranda e Sato, 2005). Dessa forma, a presença de estruturas subterrâneas capazes de rebrotar após distúrbios, como observado em muitas espécies do Cerrado, constitui uma importante estratégia adaptativa em ambientes sujeitos a regimes frequentes de fogo (Simon e Dantas, 2025). Esse fator tem sido utilizado para sustentar a hipótese de que as savanas armazenam menos biomassa e carbono acima do solo do que seu potencial (Grace et al., 2006; Zhou et al., 2022).

Por fim, a comparação de estoques totais de biomassa entre estudos ainda enfrenta limitações metodológicas, especialmente na quantificação da biomassa lenhosa, a mais frequentemente estimada. Essas dificuldades incluem diferenças nos critérios do diâmetro de

inclusão, seja à altura do peito (DAP, 1,3 m) ou na base (Db, 0,3 m), além de variações menos comuns, como  $Db \geq 2$  cm (Abdala et al., 1998) e  $Db \geq 3$  cm (Ruggiero et al., 2002). Soma-se a isso a escassez de equações alométricas adequadas, uma vez que a determinação da biomassa total é um processo moroso e oneroso.

Situação semelhante ocorre para outras frações da biomassa, como raízes (Miranda et al., 2014), necromassa (Magnússon et al., 2016) e serrapilheira, uma vez que a necromassa total permite incluir tanto serrapilheira quanto madeira caída (Palace et al., 2012). No caso da biomassa radicular, a estimativa apresenta elevada variabilidade metodológica. As raízes consideradas finas eram comumente definidas como um único conjunto de raízes caracterizadas por sua natureza efêmera, com diâmetro inferior a 2 mm. No entanto, nos últimos anos a robustez dessa definição diminuiu, visto que diversos autores apontaram que o sistema de raízes finas pode abranger faixas dimensionais variáveis, potencialmente menores ou até maiores, dependendo da espécie vegetal (McCormack et al., 2015; Liu et al., 2016). Logo, o presente trabalho não restringiu o diâmetro das raízes nem as classificou em classes de tamanho. Contudo, o limite superior encontrado, a partir da metodologia aplicada, foi de 5 cm.

## 5 CONCLUSÕES

As áreas de CSS e CAR diferem significativamente em composição florística e em estoques de biomassa total, serrapilheira e biomassa de raízes, com destaque para o maior investimento no estoque subterrâneo superficial nas áreas de Carrasco. Esses resultados reforçam que o Carrasco também representa uma fisionomia distinta, com características estruturais e funcionais próprias, que carece de atenção e de estudos adicionais, ainda incipientes quanto aos seus estoques de biomassa.

A proporção raiz:biomassa lenhosa maior que 1 no Carrasco, em comparação com a proporção menor que 1 no Cerrado, provavelmente se deve à elevada densidade de indivíduos e à sobreposição da malha de raízes, o que sugere investimento em raízes como resposta às limitações hídricas e nutricionais na subsuperfície, típicas de solos arenosos.

## REFERÊNCIAS

Abdala GC, Caldas LS, Haridasan M, Eiten G (1998) Above and belowground organic matter and root: shoot ratio in a cerrado in Central Brazil. **Braz J Ecol** 2:11–23.

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol Z** 22:711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Alvarez F, Marimon-Junior BH, Marimon BS et al (2025) Tree species hyperdominance and rarity in the South American Cerrado. **Commun Biol** 8:695. <https://doi.org/10.1038/s42003-025-07623-w>

Andrade-Lima D (1978) Vegetação. In: Lins RC (ed) **Bacia do Parnaíba: aspectos fisiográficos**. Instituto Joaquim Nabuco de Pesquisas Sociais, Recife, pp 131–135. (Série Estudos e Pesquisas, 9)

Angiosperm Phylogeny Group, Chase MW, Christenhusz MJM, Fay MF, Byng JW, Judd WS et al (2016) An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. **Bot J Linn Soc** 181:1–20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>

Araújo FS, Martins FR (1999) Fisionomia e organização da vegetação do carrasco no planalto da Ibiapaba, estado do Ceará. **Acta Botanica Brasilica** 13:01–13. <https://doi.org/10.1590/S0102-33061999000100002>

Araújo FS, Martins FR, Shepherd GJ (1999) Variações estruturais e florísticas do carrasco no planalto da Ibiapaba, estado do Ceará. **Rev Bras Biol** 59:663–678. <https://doi.org/10.1590/S0034-71081999000400015>

Araujo FS, Sampaio EV, Figueiredo MA, Rodal MJN, Fernandes AG (1998) Composição florística da vegetação de carrasco, Novo Oriente, CE. **Braz J Bot** 21:105–116. <https://doi.org/10.1590/S0100-84041998000200001>

Bustamante MDC, Nardoto GB, Pinto AS, Resende JCF, Takahashi FSC, Vieira LCG (2012) Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems. **Braz J Biol** 72:655–671. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400005>

Colman CB, Guerra A, Almagro A et al. (2024) Modeling the Brazilian Cerrado land use change highlights the need to account for private property sizes for biodiversity conservation. **Sci Rep** 14:4559. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55207-1>

Durigan G, Melo AC, Brewer JS (2012) The root to shoot ratio of trees from open- and closed-canopy cerrado in south-eastern Brazil. **Plant Ecol Divers** 5:333–343. <https://doi.org/10.1080/17550874.2012.691564>

Ellenberg D, Mueller-Dombois D (1974) **Aims and methods of vegetation ecology**. Wiley, New York

FAO (2025) **Global forest resources assessment 2025**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome

Felfili JM, Carvalho FA, Haidar RF (2005) **Manual para o monitoramento de parcelas permanentes nos biomas Cerrado e Pantanal**. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal, Brasília

Felfili JM, Silva Júnior MC (eds) (2001) **Biogeografia do bioma Cerrado: estudo fitofisionômico na Chapada do Espigão Mestre do São Francisco**. Universidade de Brasília, Brasília

Françoso RD, Haidar RF, Machado RB (2016) Tree species of South America central savanna: endemism, marginal areas and the relationship with other biomes. **Acta Bot Bras** 30:78–86. <https://doi.org/10.1590/0102-33062015abb0109>

Gauch HG (1982) **Multivariate analysis in community ecology**. Cambridge University Press, Cambridge

Grace J, José JS, Meir P, Miranda HS, Montes RA (2006) Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. **J Biogeogr** 33:387–400. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01448.x>

Harper JL (1977) **Population biology of plants**. Academic Press, New York, 892 p

Higa RCV et al. (2014) **Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal** (Documentos, 266). Embrapa Florestas, Colombo

Hofmann GS, Weber EJ, Bastazini VAG, Rossatto DR, Franco AC et al. (2025) Climate change in the Brazilian Cerrado: A looming threat to terrestrial biodiversity. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change** 16:e70022. <https://doi.org/10.1002/wcc.70022>

Hutcheson K (1970) A test for comparing diversities based on the Shannon formula. **J Theor Biol** 29:151–154

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019) **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000**. Rio de Janeiro, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 168 p.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (2023) **Normais climatológicas do Brasil: 1991–2020**. Brasília, DF: INMET. Available at: <https://portal.inmet.gov.br/>. Accessed 6 Nov 2025.

IPCC (2006) **Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4: Agriculture, forestry and other land use**. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (eds). Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan

IPCC (2023) **Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Lee H, Romero J (eds). IPCC, Geneva, 184 p. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Klink CA, Machado RB (2005) Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conserv Biol** 19:707–713. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x>

Klink CA, Sato MN, Cordeiro GG, Ramos MIM (2020) The role of vegetation on the dynamics of water and fire in the Cerrado ecosystems: Implications for management and conservation. **Plants** 9:1803. <https://doi.org/10.3390/plants9121803>

Ledru MP, Franco Cassino R, Escobar-Torrez K. et al. (2026) 30,000 years of fire history in the Cerrado. **Sci Rep**. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-38119-0>

Liu B, He J, Zeng F, Lei J, Arndt SK (2016) Life span and structure of ephemeral root modules of different functional groups from a desert system. **New Phytol** 211:103–112. <https://doi.org/10.1111/nph.13880>

Luccas FS (2011) **Estoques de necromassa em um cerrado *sensu stricto* e uma Floresta Ombrófila Densa Montana, no estado de São Paulo**. MSc thesis, Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo

Maas GCB, Sanquetta CR, Marques R, Machado DAS, Sanquetta MNI (2020) Quantification of carbon in forest necromass: State of the art. **Cerne** 26:98-108. <https://doi.org/10.1590/01047760202026012661>

Magnússon RI, Tietema A, Cornelissen JHC, Hefting MM, Kalbitz K (2016) Tamm Review: Sequestration of carbon from coarse woody debris in forest soils. **For Ecol Manag** 377:1–15. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.033>

Magurran AE (1988) **Ecological diversity and its measurement**. Princeton University Press, Princeton, pp 81–99

MapBiomass (2021) **MapBiomass: estatísticas**. <https://mapbiomas.org/estatisticas>. Acesso em: 26 fev. 2026.

Martins FB, Gonzaga G, Santos DF, Reboita MS (2018) Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. **Rev Bras Climatol** 1-28. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>

- May RM (1975) Patterns of species abundance and diversity. In: Cody ML, Diamond JM (eds) **Ecology and evolution of communities**. Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, pp 81–120
- McCormack ML, Dickie IA, Eissenstat DM et al (2015) Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. **New Phytol** 207:505–518. <https://doi.org/10.1111/nph.13363>
- Meyer HA (1952) Structure, growth, and drain in balanced uneven-aged forests. **J For** 50:85–92. <https://doi.org/10.1093/jof/50.2.85>
- Miranda HS, Sato MN (2005) Efeitos do fogo na vegetação lenhosa do Cerrado. In: Scariot A, Felfili JM, Souza Silva JC (eds) **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**, 1st edn. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, pp 95–105
- Miranda SDC, Bustamante M, Palace M, Hagen S, Keller M, Ferreira LG (2014) Regional variations in biomass distribution in Brazilian savanna woodland. **Biotropica** 46:125–138. <https://doi.org/10.1111/btp.12095>
- Mokany K, Raison RJ, Prokushkin AS (2006) Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. **Glob Change Biol** 12:84–96. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x>
- Morais VA, Mello JM, Gomide LR, Scolforo JRS, Araújo EJG, Rufini AL (2014) Influence of diameter measuring height on the adjustment of volume and biomass equations of cerrado in Minas Gerais. **Cienc Agrotec** 38:230–239. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000300002>
- Morandi PS, Marimon BS, Marimon-Junior BH, Ratter JA, Feldpausch TR, Colli GR et al (2020) Tree diversity and above-ground biomass in the South America Cerrado biome and their conservation implications. **Biodivers Conserv** 29:1519–1536. <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1589-8>
- Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Da Fonseca GA, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature** 403:853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Oliveira MEA, Sampaio EVSB, Castro AAJF, Rodal MJN (1997) Flora e fitossociologia de uma área de transição Carrasco Caatinga de areia em Padre Marcos, Piauí. **Naturalia** 22:131-150.
- Oliveras I, Malhi Y (2016) Many shades of green: the dynamic tropical forest–savannah transition zones. **Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci** 371:1-14. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0308>
- Palace M, Keller M, Hurtt G, Frohling S (2012) A Review of Above Ground Necromass in Tropical Forests. In: Sudarshana P, Nageswara-Rao M, Soneji JR (eds) *Tropical Forests*, 1st edn. Rijeka, pp. 215–252
- Pellegrini A, Ahlström A, Hobbie S et al. (2018) Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. **Nature** 553:194–198. <https://doi.org/10.1038/nature24668>
- Pielou EC (1966) The measurement of diversity in different types of biological collections. **J Theor Biol** 13:131–144. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(66\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0022-5193(66)90013-0)
- Pielou EC (1975) **Ecological diversity**. John Wiley & Sons, New York, 165 p
- R Core Team (2025) **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Ribeiro FC, Torres CMME, Vale EMG, Darr D, Scariot A, Sevilha AC, Kerkoff LA (2025) Understanding factors impacting adoption and use of silvopastoral systems with native trees in the Cerrado: evidence from the northern of Minas Gerais, Brazil. **Trees, Forests and People** 101040. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.101040>

Ribeiro JF, Walter BMT (2008) As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: Sano SM, Almeida SP, Ribeiro JF (eds) **Cerrado: ecologia e flora**, vol 1. Embrapa Cerrados, Planaltina, pp 151–212

Ribeiro SC, Fehrmann L, Soares CPB, Jacovine LAG, Kleinn C, de Oliveira Gaspar R (2011) Above- and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. **For Ecol Manag** 262:491–499. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.017>

Righi CA, de Oliveira Risante AP, Packer AP et al. (2023) Biodiversity and biomass relationships in a cerrado stricto sensu in Southeastern Brazil. **Environ Monit Assess** 195:492. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11051-w>

Scolforo JR, Oliveira AD, Acerbi Júnior FW (2008) **Equações de Volume, Peso de Matéria Seca e Carbono para Diferentes Fitofisionomias da Flora Nativa**. Lavras: UFLA. 216p.

SEEG (2021) **Sistema de estimativas de emissões de gases de efeito estufa**. <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 26 fev. 2026.

Serviço Florestal Brasileiro (SFB) (2019) **Manual de campo: procedimentos para coleta de dados biofísicos e socioambientais**. Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, 90 p

Serviço Florestal Brasileiro (SFB) (2021) **Manual de campo: procedimentos para coleta de dados biofísicos e socioambientais**. Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, 94 p

Shapiro SS, Wilk MB (1965) An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika** 52:591–611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>

Silva Junior CA, Teodoro PE, Delgado RC et al. (2020) Persistent fire foci in all biomes undermine the Paris Agreement in Brazil. **Sci Rep** 10:16246. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72571-w>

Silveira P et al. (2008) O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta** 38:185-206. <https://doi.org/10.5380/ufv.v38i1.11038>

Simon MF, Dantas VL (2025) Fire as an evolutionary driver in South America. In: Fidelis A, Pivello VR (eds) **Fire in the South American ecosystems**. Ecological studies, vol 250. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-89372-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-89372-8_2)

Sprugel DG (1983) Correcting for bias in log-transformed allometric equations. **Ecology** 64:209-210. <https://doi.org/10.2307/1937343>

Strassburg BB, Brooks T, Feltran-Barbieri R, Iribarrem A, Crouzeilles R, Loyola R et al (2017) Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nat Ecol Evol** 1:0099. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099>

Taylor D, Kent M, Coker P (1993) Vegetation description and analysis: a practical approach. **Geogr J** 159:237. <https://doi.org/10.2307/3451427>

Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ (1995) **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Departamento de Solos, UFRGS, Porto Alegre, 174 p. (Boletim técnico, 5)

Terra MC, Nunes MH, Souza CR, Ferreira GW, Prado-Junior JA, Rezende VL et al (2023) The inverted forest: Aboveground and notably large belowground carbon stocks and their drivers in Brazilian savannas. **Sci Total Environ** 867:161320. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161320>

Thomas SC, Martin AR (2012) Carbon content of tree tissues: a synthesis. **Forests** 3:332–352. <https://doi.org/10.3390/f3020332>

Torres CMME et al. (2013) Quantificação de biomassa e estocagem de carbono em uma floresta estacional semidecidual, no Parque Tecnológico de Viçosa, MG. **Revista Árvore** 37:647-655. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000400008>

Van Wagner CE (1982) **Practical aspects of the line intersect method**. Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experiment Station, Chalk River, Ontario

Vasconcelos SF, Araújo FS, Lopes AV (2010) Phenology and dispersal modes of wood species in the Carrasco, a tropical deciduous shrubland in the Brazilian semiarid. **Biodiversity and Conservation** 19:2263-2289. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9841-x>

Wilcoxon F (1945) Individual comparisons by ranking methods. **Biom Bull** 1:80-83. <https://doi.org/10.2307/3001968>

Zeng W et al. (2021) Positive tree diversity effect on fine root biomass: via density dependence rather than spatial root partitioning. **Oikos** 130:1-14. <https://doi.org/10.1111/oik.07777>

Zhou Y, Singh J, Butnor JR et al. (2022) Limited increases in savanna carbon stocks over decades of fire suppression. **Nature** 603:445-449. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04438-1>

## **CAPÍTULO 2**

### **MODELAGEM DA BIOMASSA COM INCLUSÃO DE VARIÁVEIS EDÁFICAS NA SAVANA NEOTROPICAL**

## Resumo

No domínio da Savana Neotropical, existem poucas equações disponíveis para a estimativa de estoques de biomassa em cerrado sentido restrito. A maioria dos estudos concentra-se na biomassa acima do solo, e as equações existentes foram desenvolvidas especialmente por árvore individual. Além disso, alguns modelos requerem densidade da madeira, uma limitação considerável, especialmente em florestas tropicais com elevada riqueza de espécies e ampla variação dessa variável. Inventários florestais foram realizados em unidades amostrais temporárias de 1000 m<sup>2</sup> estabelecidas em áreas de cerrado sentido restrito no Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil, com o objetivo de estimar os estoques totais e por compartimento de biomassa, bem como modelar a biomassa a partir de variáveis estruturais e edáficas. Os componentes da biomassa total (TB) considerados foram: biomassa lenhosa (AGWB), necromassa, serrapilheira e biomassa de raízes (BGB). Os estoques de biomassa lenhosa consideraram árvores com diâmetro basal medido a 0,3 m do solo  $\geq 5$  cm e foram estimados utilizando uma equação já ajustada para a região. As raízes foram amostradas por meio de uma trincheira de 1 m<sup>3</sup> escavada em um único ponto adjacente à unidade amostral. A necromassa foi estimada pelo método da interseção de linha com um transecto de 50 m, considerando detritos com diâmetro  $\geq 3$  cm. A serrapilheira foi amostrada utilizando um gabarito de 0,25 m<sup>2</sup> posicionado no centro de cada unidade amostral. A biomassa foi modelada por unidade de área, de forma hierárquica, considerando biomassa total (TB: acima e abaixo do solo), biomassa total das árvores (TTB: AGWB + BGB) e biomassa lenhosa (AGWB). A produtividade média ( $\pm$  desvio padrão) das áreas de cerrado sentido restrito avaliadas foi de  $45,24 \pm 17,32$  Mg ha<sup>-1</sup> para a TB,  $20,47 \pm 11,26$  Mg ha<sup>-1</sup> para a AGWB,  $5,49 \pm 4,18$  Mg ha<sup>-1</sup> para serrapilheira,  $0,81 \pm 1,62$  Mg ha<sup>-1</sup> para a necromassa e  $18,47 \pm 10,88$  Mg ha<sup>-1</sup> para a BGB. Como variáveis preditoras para a modelagem da biomassa, foram consideradas variáveis físicas e químicas do solo e a área basal da vegetação lenhosa. A seleção dos modelos foi baseada no menor Critério de Informação de Akaike (AIC) e a validação realizada via *bootstrap*. O desempenho dos modelos foi avaliado por meio da correlação de Pearson entre valores observados e preditos ( $r_{\hat{y}}$ ), que apresentou 0,76, 0,72 e 0,94 para TB =  $24,522 + 3,081(G) - 90,831(\text{Mg}) + 21,727(\text{Al})$ , TTB =  $29,083 + 2,781(G) - 86,823(\text{Mg})$  e AGWB =  $1,801 \cdot G^{1,060} \cdot e^{(-1,483 \cdot \text{Mg} + 0,006 \cdot \text{Areia})}$ , respectivamente, e pela raiz do erro quadrático médio (RMSE), com valores de 24,40%, 27,06% e 18,10% para os mesmos níveis. A inclusão de variáveis químicas do solo, como alumínio e magnésio, e variáveis físicas, como teor de areia, melhorou as estimativas de biomassa por unidade de área, evidenciando vantagens importantes, pois reduz custos e tempo operacional, diminui a dependência taxonômica e incorpora aspectos relacionados às adaptações nutricionais da vegetação nativa aos solos característicos do bioma.

**Palavras-chave:** biomassa acima do solo, biomassa baixo do solo, árvores, necromassa, serrapilheira

## Abstract

In the Neotropical Savanna domain, few equations are available for estimating biomass stocks in cerrado sensu stricto. Most studies focus on aboveground biomass, and existing equations were developed primarily for individual trees. Furthermore, some models require wood density, which is a considerable limitation, especially in tropical forests with high species richness and wide variation in this variable. Forest inventories were conducted in temporary sample units of 1000 m<sup>2</sup> established in cerrado sensu stricto areas in the North and Northwest of Minas Gerais State, Brazil, with the aim of estimating total and compartmental biomass stocks, as well as modeling biomass based on structural and edaphic variables. The components of total biomass (TB) considered were: woody biomass (AGWB), deadwood, litter, and root biomass (BGB). Woody biomass stocks considered trees with a basal diameter measured at 0.3 m above ground  $\geq 5$  cm and were estimated using a regionally calibrated equation. Roots were sampled via a 1 m<sup>3</sup> trench excavated at a single point adjacent to the sample unit. Deadwood was estimated using the line-intersect method with a 50 m transect, considering debris with a diameter  $\geq 3$  cm. Litter was sampled using a 0.25 m<sup>2</sup> frame positioned at the center of each sample unit. Biomass was modeled per unit area hierarchically, considering total biomass (TB: above- and belowground), total tree biomass (TTB: AGWB + BGB), and woody biomass (AGWB). The mean productivity ( $\pm$  standard deviation) of the evaluated cerrado sensu stricto areas was  $45.24 \pm 17.32$  Mg ha<sup>-1</sup> for TB,  $20.47 \pm 11.26$  Mg ha<sup>-1</sup> for AGWB,  $5.49 \pm 4.18$  Mg ha<sup>-1</sup> for litter,  $0.81 \pm 1.62$  Mg ha<sup>-1</sup> for deadwood, and  $18.47 \pm 10.88$  Mg ha<sup>-1</sup> for BGB. For biomass modeling, soil physical and chemical variables and the basal area of woody vegetation were considered as predictor variables. Model selection was based on the lowest Akaike Information Criterion (AIC), and validation was performed via bootstrap. Model performance was evaluated using Pearson's correlation between observed and predicted values ( $r_{\hat{y}y}$ ), which were 0.76, 0.72, and 0.94 for  $TB = 24.522 + 3.081(G) - 90.831(Mg) + 21.727(Al)$ ,  $TTB = 29.083 + 2.781(G) - 86.823(Mg)$ , and  $AGWB = 1.801 \cdot G^{1.060} \cdot e^{(-1.483 \cdot Mg + 0.006 \cdot Area)}$ , respectively, and by the root mean square error (RMSE), with values of 24.40%, 27.06%, and 18.10% for the same levels. The inclusion of soil chemical variables, such as aluminum and magnesium, and physical variables, such as sand content, improved biomass estimates per unit area, highlighting important advantages by reducing costs and operational time, decreasing taxonomic dependence, and incorporating aspects related to the nutritional adaptations of native vegetation to the characteristic soils of the biome.

**Keywords:** aboveground biomass, belowground biomass, trees, deadwood, litter

## 1 INTRODUÇÃO

A América do Sul destaca-se por apresentar a maior proporção de florestas (49%) em relação à sua área total e concentra elevada diversidade arbórea (Gatti et al., 2022). Além disso, mais da metade (54%) das florestas do mundo está concentrada em apenas cinco países: Federação Russa, Brasil, Canadá, Estados Unidos da América e China (FAO, 2025). Além de formações florestais, a região nos Neotrópicos também é marcada pela presença de vegetação savânica (Köhler, Romeiro-Brito e Telhe, 2024).

Entre essas vegetações, o Cerrado, a savana neotropical brasileira, é o segundo maior bioma da América do Sul e caracteriza-se por um mosaico de formações vegetais com diferentes estruturas e composições florísticas (Ribeiro e Walter, 2008; Simon et al., 2009; Alvarez et al., 2025). Esse bioma é reconhecido há pelo menos 20 anos como um *hotspot* global de biodiversidade (Myers et al., 2000; Klink et al., 2020), e sua diversidade estrutural resulta em elevada heterogeneidade ambiental (Rezende et al., 2006; Ribeiro e Walter, 2008). Nesse contexto, estudos conduzidos nessas formações vegetacionais representam um desafio, especialmente no que se refere à estimativa dos estoques totais de biomassa.

Um dos modelos mais abrangentes para estimar a biomassa arbórea acima do solo de formações vegetais tropicais, incluindo as formações savânicas, é o modelo pantropical proposto por Chave et al. (2014), que inclui, além do diâmetro à altura do peito e da altura das árvores, a densidade da madeira. A densidade da madeira para espécies lenhosas do Cerrado é uma variável subdocumentada (Vale, Brasil e Leão, 2002; Miranda et al., 2014), o que inviabiliza o uso dessa equação em muitas situações. Portanto, gerar equações de biomassa específicas para as condições do Cerrado é fundamental.

Nesse contexto, alternativas que reduzam a dependência de informações taxonômicas, como a densidade da madeira, tornam-se particularmente relevantes. O ajuste de modelos simples e específicos que incorporem variáveis do solo no processo de modelagem é vantajoso, pois, reduz custos e a dependência de informações taxonômicas, além de integrar variáveis edáficas que refletem as adaptações nutricionais da vegetação nativa aos solos ácidos característicos desse bioma (Haridasan, 2008).

Apesar das equações pantropicais frequentemente apresentem um bom ajuste estatístico, essa aparente precisão pode mascarar uma limitação importante: a agregação de múltiplos biomas em um único conjunto de dados. A literatura indica que essa falta de especificidade

local pode gerar vieses quando aplicada a dados fora da amostra original, além de evidenciar a sub-representação de árvores de grande porte nos conjuntos de calibração (Burt et al., 2020).

Além disso, como as diferenças entre sítios são niveladas na escala global, uma equação alométrica pantropical pode apresentar viés local, mesmo sendo válida em escala global. O fato de que os erros residuais dessas equações não são muito maiores, ou até menores, do que os dos modelos locais sugere que as equações pantropicais ainda não capturam adequadamente a variabilidade da alometria da biomassa em escala global (Ngomanda et al., 2014). Assim, sempre que possível, recomenda-se a utilização de equações específicas para as condições locais (Nam, Van Kuijk e Anten, 2016).

Diante do exposto, a escolha da estrutura dos modelos também é um aspecto importante no processo de modelagem da biomassa. Modelos preditivos simples tendem a ser preferíveis, pois são mais fáceis de testar em ensaios de replicação e validação, exigem menor quantidade de dados para estimar seus parâmetros com segurança, apresentam menor sensibilidade a estatísticas de influência e colinearidade e permitem uma interpretação biologicamente mais significativa de seus parâmetros (Sileshi, 2014).

No que se refere às abordagens de modelagem, como a maioria dos estudos se concentra na biomassa acima do solo e geralmente é conduzida em nível de indivíduo arbóreo, as variáveis edáficas costumam não ser incluídas como preditoras, pois, exigem amostragem de campo e análises laboratoriais. No entanto, a inclusão dessas variáveis poderia melhorar as estimativas de biomassa por unidade de área na Savana Neotropical?

Como alternativa, o presente estudo teve como objetivo ajustar e avaliar modelos de biomassa por unidade de área para a biomassa total (TB), biomassa total das árvores (TTB) e biomassa lenhosa acima do solo (AGWB) em áreas de cerrado sentido restrito, incorporando área basal e variáveis físicas e químicas do solo no Norte e Noroeste do estado de Minas Gerais, Brasil.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

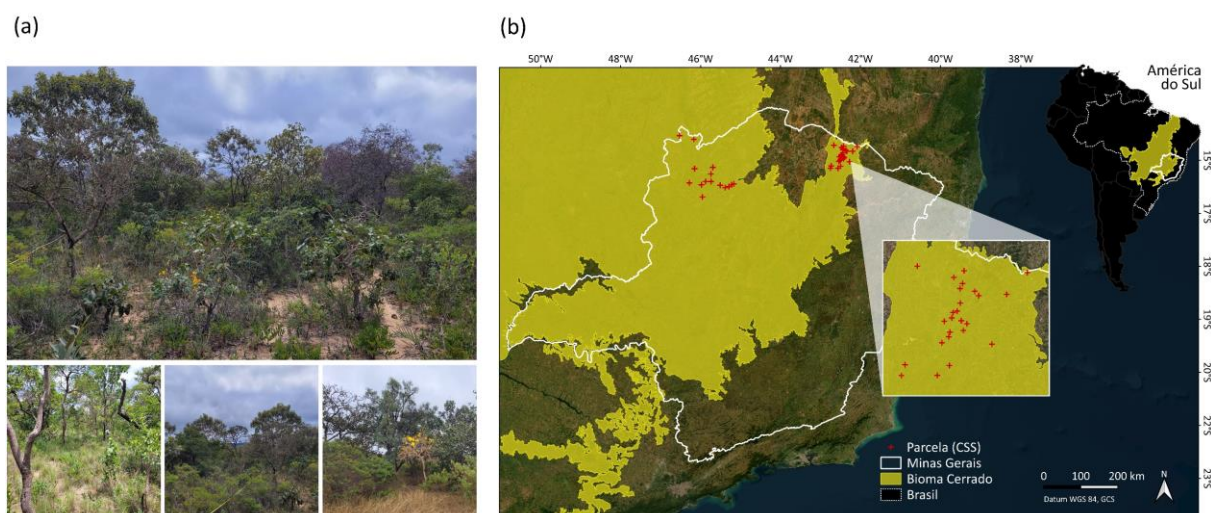
### **2.1 Área de estudo**

O estudo foi realizado em áreas de cerrado sentido restrito (CSS) (Ribeiro e Walter, 2008), na região das bacias hidrográficas do Rio Pardo e do Rio Urucuia, localizadas, respectivamente, ao Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil (Fig. 1).

O Sistema Brasileiro de Cadastro Ambiental Rural (SICAR) foi utilizado para identificar o número e a localização geográfica de propriedades rurais na área das duas bacias hidrográficas. As propriedades estão distribuídas nos municípios de Vargem Grande do Rio Pardo, Montezuma, Indaiabira, Rio Pardo de Minas e São João do Paraíso, na região Norte de Minas Gerais, e Pintópolis, Urucuia, Riachinho, Bonfinópolis de Minas, Uruana de Minas, Arinos e Formoso, na região Noroeste do estado.

A região é caracterizada por um clima tropical quente e úmido de savana (Aw - tropical (A), com estação seca no inverno (w) e temperatura média do mês mais frio  $\geq 18$  °C), de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (Alvares et al., 2013; Martins et al., 2018).

As normais climatológicas das estações do Instituto Nacional de Meteorologia (1991–2020) indicaram precipitação média anual em torno de 1.100 mm e temperatura média anual de 25 °C para a região Noroeste (estação de Arinos-MG) e de 820 mm e 24 °C para a região Norte (estação de Salinas-MG) (INMET, 2023).



**Figura 1.** Visão geral das paisagens (a) e distribuição das unidades amostrais do inventário florestal (b) realizado em áreas de cerrado sentido restrito (CSS), localizadas nas bacias hidrográficas do Rio Pardo e do Rio Urucuia, ao Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.

## 2.2 Coleta de dados

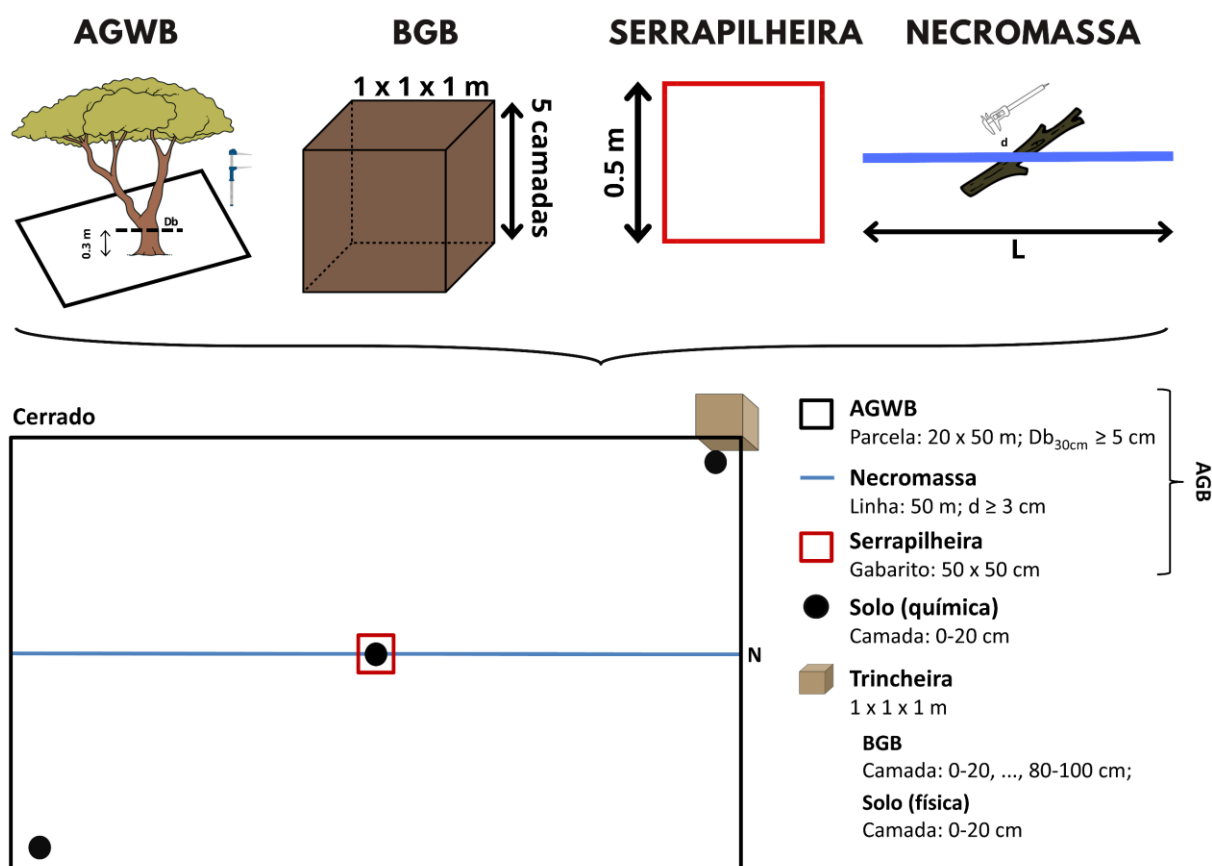
### 2.2.1 Inventário florestal

As unidades amostrais temporárias (Fig. 1b) foram alocadas de maneira aleatória dentro da abrangência de estudo, considerando as propriedades rurais previamente selecionadas utilizando o SICAR. Estudos socioambientais e sobre o uso de sistemas silvipastoris na área de estudo precederam a alocação das unidades amostrais temporárias (Ribeiro et al., 2025).

Um total de 40 unidades amostrais foram alocadas em ambiente de CSS. Foram utilizadas unidades amostrais de 1.000 m<sup>2</sup> (20 × 50 m). Os tamanhos das unidades amostrais (Fig. 2) foram definidos de acordo com o Manual de Parcelas Permanentes dos Biomas Cerrado e Pantanal (Felfili, Carvalho e Haidar, 2005).

Todos os indivíduos lenhosos com diâmetro basal (Db), medido a 30 cm do solo, igual ou superior a 5 cm foram registrados e identificados botanicamente segundo o APG IV (APG, 2016). O Db foi mensurado com auxílio de suta. No caso de indivíduos com múltiplos fustes, foram incluídos no levantamento todos os fustes com  $Db \geq 5$  cm.

Os erros de amostragem absoluto e relativo foram obtidos por meio da análise estatística do inventário florestal, realizada para a variável área basal, considerando-se a amostragem aleatória simples, conforme Péllico Netto e Brena (1997).



**Figura 2.** Esquema geral de amostragem aplicada em áreas de cerrado sentido restrito (CSS). AGB e BGB = biomassa acima e abaixo do solo, respectivamente; AGWB = biomassa lenhosa; Db = diâmetro basal; d = diâmetro; L = comprimento da linha.

## 2.2.2 Estimativa do estoque total de biomassa (TB)

Para a estimativa do estoque total de biomassa (TB) em cada unidade amostral foram considerados os compartimentos de biomassa acima (AGB) e abaixo (BGB) do solo. A AGB incluiu os seguintes componentes: biomassa lenhosa (AGWB), necromassa e serrapilheira, enquanto a BGB inclui as raízes.

### 2.2.2.1 Biomassa lenhosa (AGWB)

A partir dos dados do inventário florestal nas áreas de CSS foram estimados os estoques de AGWB de cada indivíduo arbóreo e arbustivo amostrado, para obtenção da biomassa lenhosa de cada unidade amostral.

A biomassa da parte aérea de cada indivíduo lenhoso de cada formação vegetal foi estimada a partir da equação 1 (Morais et al., 2014), com uma transformação inversa para a escala original utilizando o fator de correção de Sprugel (Sprugel, 1983). A equação considera apenas a biomassa do fuste com casca, determinada até o diâmetro mínimo de 3,0 cm no topo do fuste.

$$AGWB = e^{-10.87846 + 2.84969 \cdot \ln(Db)} \cdot 1.0085 \quad (\text{Eq. 1})$$

em que AGWB = biomassa lenhosa do indivíduo *i* (Mg); Db = diâmetro basal do indivíduo *i*, medido a 30 cm do solo (cm); R<sup>2</sup>adj (coeficiente de determinação ajustado) = 0,94; Syx (erro padrão da estimativa) = 0,1301 (Mg) e 61,74 (%).

O conjunto de dados utilizado por Morais et al. (2014) foi proveniente do Inventário Florestal de Minas Gerais para o cerrado sentido restrito (Scolforo, Oliveira e Acerbi Júnior, 2008). Ao todo, foram cubadas 868 árvores pertencentes a 99 espécies, distribuídas em 70 gêneros e 37 famílias, amostradas em 20 fragmentos florestais localizados em diferentes regiões do estado. O volume individual de cada árvore foi obtido pelo método de Huber, e a biomassa foi obtida pelo produto do volume pela densidade básica da madeira, determinada mediante a retirada de discos em cinco posições ao longo da altura comercial.

### 2.2.2.2 Necromassa

A necromassa foi obtida pelo método da interseção de linha (Van Wagner, 1982). Para isto, uma linha amostral foi alocada no centro de cada unidade amostral de CSS. O comprimento da linha (L) foi igual a 50 m.

Devido às inúmeras terminologias relacionadas à madeira morta (FAO, 2025), a necromassa foi denominada detritos lenhosos, compreendendo galhos, tocos e árvores ou arbustos mortos e caídos no chão, ou seja, a biomassa lenhosa não viva que não é contabilizada como serrapilheira (Maas et al., 2020). Assim, todos os detritos lenhosos com diâmetro  $\geq 3$  cm que interceptaram a linha (L) ou sua projeção vertical, foram incluídos no levantamento. O diâmetro dos detritos foi mensurado com o auxílio de um paquímetro digital. Além disso, os detritos foram classificados quanto ao grau de decomposição em: (1) novo, (2) decomposição inicial e (3) decomposição avançada (SFB, 2019, 2021) (Tabela 1).

**Tabela 1.** Classificação da necromassa segundo os estágios de decomposição.

Classe de decomposição	Característica
1 - Novo	Presença de ramos e textura de madeira intacta.
2 - Decomposição inicial	Resquícios de casca, sem ramos e madeira firme.
3 - Decomposição avançada	Sem casca, sem ramos e madeira em estágio de decomposição médio a avançado, esfarelado.

Serviço Florestal Brasileiro (2019)

A massa madeira morta para cada unidade amostral foi obtida utilizando a equação 2 (Van Wagner, 1982). A necromassa foi dada pelo produto do volume e da densidade básica média ( $\rho$ ) (Tabela 2) dos detritos lenhosos que interceptaram a linha (L) em cada unidade amostral (Equação 2).

$$\text{Necromassa} = \pi \cdot \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{8 \cdot L} \cdot \rho_i \quad (\text{Eq. 2})$$

em que Necromassa = massa de madeira morta ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );  $d_i$  = diâmetro (cm) de cada peça que interceptou L; L = comprimento da linha (m);  $\rho_i$  = densidade básica média dos detritos por parcela ( $\text{g cm}^{-3}$ ), considerando o diâmetro e suas respectivas classes de decomposição.

**Tabela 2.** Densidade básica ( $\rho$ ) ( $\text{g cm}^{-3}$ ) segundo o grau de decomposição e diâmetro do detrito lenhoso.

Classe de diâmetro (cm)	Classe de decomposição		
	1	2	3
$2 < d < 4$	0,52	0,31	0,28
$4 \leq d < 6$	0,63	0,43	0,35
$6 \leq d < 8$	0,75	0,45	0,37
$8 \leq d < 10$	0,78	0,48	0,45
$\geq 10$	0,62	0,44	0,36

Luccas (2011)

### 2.2.2.3 Serrapilheira

No centro de cada unidade amostral implantada para o inventário do CSS foi instalado um gabarito de 50 cm x 50 cm para coleta da serrapilheira, ou seja, detritos finos, não lenhosos (diâmetro < 3 cm). A serrapilheira de cada gabarito foi coletada e pesada para obtenção da massa total úmida. Uma subamostra da serrapilheira de cada gabarito foi retirada, pesada e colocada para secagem em estufa com circulação e renovação de ar a  $70 \pm 2$  °C até a obtenção da massa constante (variação  $\leq 1$  %), a fim de determinar a massa seca e, assim, a biomassa total seca de serrapilheira por unidade de área (Tedesco et al., 1995).

A massa seca de serrapilheira foi obtida pelo método da proporcionalidade (Torres et al., 2013), conforme a equação 3. Após a determinação da massa seca, os valores foram extrapolados para megagramas por hectare.

$$MS = MU \cdot \frac{Ms}{Mu} \quad (\text{Eq. 3})$$

em que MS = massa seca da amostra em campo (g); MU = massa úmida da amostra em campo (g); Ms = massa seca da subamostra (g); Mu = massa umidade da subamostra (g).

### 2.2.2.4 Biomassa de raízes (BGB)

Para a amostragem de raízes nas áreas de CSS, foi escavada uma trincheira de 1 m × 1 m × 1 m (1 m<sup>3</sup>), posicionada adjacente ao perímetro de cada unidade amostral implantada para o inventário da vegetação lenhosa. As raízes foram coletadas em camadas de 20 cm de profundidade, correspondentes a 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. Com auxílio de peneiras, as raízes foram separadas do solo (Fig. 3).

Para cada camada, obteve-se a massa total úmida de raízes de cada amostra. Posteriormente, uma subamostra foi retirada das amostras de cada profundidade, para secagem em estufa com circulação e renovação de ar a  $70 \pm 2$  °C até que atingisse a massa constante (variação  $\leq 1$  %), a fim de determinar a massa seca e, assim, a biomassa total seca de raízes por camada (Tedesco et al., 1995).

A determinação da massa seca de raízes adotou o mesmo procedimento utilizado da determinação da massa seca da serrapilheira.



**Figura 3.** Amostragem (a) e pesagem (b) de raízes, seguidas da coleta da densidade do solo (c), em áreas de cerrado sentido restrito, Sudeste do Brasil.

### 2.2.3 Características química e física do solo

Para a análise da fertilidade e da textura, amostras foram coletadas no interior das unidades amostrais do inventário florestal. Já para a densidade aparente (DA), as amostras foram coletadas na trincheira. A amostra deformada utilizada para a análise de fertilidade foi coletada com trado holandês, formando uma amostra composta da camada de 0–20 cm. Essa amostra composta foi obtida a partir de três amostras simples coletadas ao longo da diagonal da unidade amostral: duas próximas às extremidades e uma no centro (Fig. 2).

As variáveis químicas e físicas do solo incluíram pH, alumínio (Al), matéria orgânica (MO), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), potássio (K), teores de areia, silte e argila, bem como a densidade aparente (DA). As análises químicas foram realizadas em laboratório comercial.

Para o cálculo da densidade aparente do solo, a amostra indeformada foi coletada pelo método do cilindro de volume conhecido, também na camada de 0–20 cm, diretamente no perfil da trincheira. As amostras foram secas em estufa com circulação e renovação de ar, a  $103 \pm 2$  °C, até atingir massa constante (variação  $\leq 1\%$ ), para determinação da massa seca do solo (Blake e Hartge, 1986). Por fim, a densidade aparente foi obtida como a razão entre a massa seca e o volume do cilindro (Fig. 3c).

## 2.3 Análise de dados

### 2.3.1 Florística, diversidade e estrutura da vegetação

A florística do CSS foi avaliada pela riqueza (S) e pela diversidade de espécies. A riqueza considerou o número de famílias, gêneros e espécies registrado na formação vegetal.

A estrutura da vegetação foi avaliada por meio da análise fitossociológica de cada formação vegetal e considerou as variáveis densidade, dominância e frequência das espécies e, conseqüentemente, o correspondente Valor de Importância (VI%). O VI% expressa o nível de relevância ecológica de cada espécie amostrada em cada formação vegetal (Taylor, Kent e Coker, 1993) (Tabela 3) e resulta da soma dos valores relativos das métricas citadas anteriormente.

Além disso, as dez principais espécies em termos de estoque de biomassa lenhosa foram classificadas segundo a tolerância ao alumínio, de acordo com informações da literatura (Haridasan, 1982; Haridasan et al., 1986; Haridasan e Araújo, 1988; Haridasan, 2008; Oliveira et al., 2019).

**Tabela 3.** Fórmulas utilizadas na análise da fitossociologia da vegetação lenhosa do cerrado sentido restrito (CSS).

Variável	Unidade	Fórmula
Área basal da espécie i ( $G_i$ )	$m^2 ha^{-1}$	$G_i = \sum_{i=1}^n \frac{\pi \cdot Db_i^2}{40.000}$
Densidade absoluta da espécie i ( $DA_i$ )	indivíduos $ha^{-1}$	$DA_i = \frac{n_i}{A}$
Densidade relativa da espécie i ( $DR_i$ )	%	$DR_i = \frac{DA_i}{\sum_{i=1}^n DA_i} \cdot 100$
Dominância absoluta da espécie i ( $DoA_i$ )	$m^2 ha^{-1}$	$DoA_i = \frac{G_i}{A}$
Dominância relativa da espécie i ( $DoR_i$ )	%	$DoR_i = \frac{DoA_i}{\sum_{i=1}^n DoA_i} \cdot 100$
Frequência absoluta da espécie i ( $FA_i$ )	%	$FA_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \cdot 100$
Frequência relativa da espécie i ( $FR_i$ )	%	$FR_i = \frac{FA_i}{\sum_{i=1}^n FA_i} \cdot 100$
Valor de importância da espécie i ( $VI_i$ )	%	$IV_i = \frac{DR_i + DoR_i + FR}{3}$

$Db_i$  = diâmetro basal, medido a 30 cm do solo do indivíduo i (cm);  $P_i$  = Número de unidades amostrais com ocorrência da espécie i;  $n_i$  = Número de indivíduos amostrados da espécie i.

### 2.3.2 Modelagem da biomassa por unidade de área

Os modelos foram desenvolvidos em três níveis hierárquicos: (a) biomassa total (TB), definida como a soma da biomassa lenhosa (AGWB), serrapilheira, necromassa e biomassa de raízes (BGB); (b) biomassa total das árvores (TTB), que inclui a AGWB e BGB; e (c) biomassa lenhosa (AGWB).

A seleção de modelos em todos os níveis foi inicialmente realizada por meio de regressão linear múltipla (RLM), sendo retidos apenas os dois melhores modelos identificados por procedimentos *stepwise* baseados no menor Critério de Informação de Akaike (AIC) (Equação 4) (Akaike, 1973), calculado com o pacote *mass* (Ripley et al., 2013), e posteriormente comparados com o modelo simples baseado apenas na área basal (G).

$$\text{AIC} = -2 \cdot \log(\mathcal{L}) + 2 \cdot p \quad (\text{Eq. 4})$$

em que AIC = Critério de Informação de Akaike;  $\mathcal{L}$  = valor máximo da função de verossimilhança do modelo;  $p$  = número de parâmetros do modelo ajustado.

O Fator de Inflação da Variância (VIF, Equação 5) foi utilizado para avaliar a presença de multicolinearidade entre as variáveis independentes (James et al., 2021), sendo calculados com o pacote *car* (Fox e Weisberg, 2018). VIF fornece uma avaliação mais robusta da colinearidade, representando a razão entre a variância de  $\hat{\beta}_j$  no modelo completo e a variância de  $\hat{\beta}_j$  caso fosse ajustado isoladamente. O valor mínimo possível do VIF é 1, indicando ausência de colinearidade. Valores acima de 5 ou 10 são considerados indicativos de colinearidade problemática (Jones, Harden e Crawley 2023).

$$\text{VIF}(\hat{\beta}_j) = \frac{1}{1 - R_{X_j | X_{-j}}^2} \quad (\text{Eq. 5})$$

em que  $\text{VIF}(\hat{\beta}_j)$  = Fator de Inflação da Variância;  $R_{X_j | X_{-j}}^2$  = coeficiente de determinação da regressão de  $X_j$  em relação a todas as demais variáveis preditoras. Quando  $R_{X_j | X_{-j}}^2$  é próximo de 1, há colinearidade, e o VIF assume valores elevados.

As diferenças de AIC ( $\Delta_i$ , Equação 6) foram calculadas para verificar se os modelos alternativos diferiam do melhor modelo por apenas um parâmetro. Modelos com  $\Delta_i > 10$  são considerados essencialmente sem suporte (Burnham e Anderson, 2002). Quando a diferença de

AIC ( $\Delta_i$ ) é inferior a 2, o modelo com menor número de parâmetros deve ser selecionado (Cavanaugh e Neath, 2019; Resende e Alves, 2020).

$$\Delta_i = AIC_i - AIC_{\min} \quad (\text{Eq. 6})$$

em que  $\Delta_i$  = diferença de AIC;  $AIC_i$  = valor de AIC do modelo  $i$ ;  $AIC_{\min}$  = valor mínimo de AIC.

O modelo estimado como o melhor apresenta  $\Delta_i \equiv 0$ . Para os modelos selecionados, a acurácia foi avaliada por meio da raiz do erro quadrático médio (RMSE, Equação 7) e do erro relativo (RMSE%, Equação 8) (Chai e Draxler, 2014), bem como pela correlação de Pearson entre os valores preditos e observados ( $r_{\hat{y}y}$ ). A significância dos modelos foi avaliada pelo teste  $F$ , e a estatística  $t$  foi utilizada para testar a significância dos coeficientes. A análise dos resíduos foi realizada por meio do teste de Shapiro–Wilk (Shapiro e Wilk, 1965), para verificar a suposição de distribuição gaussiana. A autocorrelação dos resíduos foi avaliada pelo teste de Box–Ljung (Ljung e Box, 1978), e a heterocedasticidade foi avaliada por meio da análise gráfica dos resíduos padronizados.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (\text{Eq. 7})$$

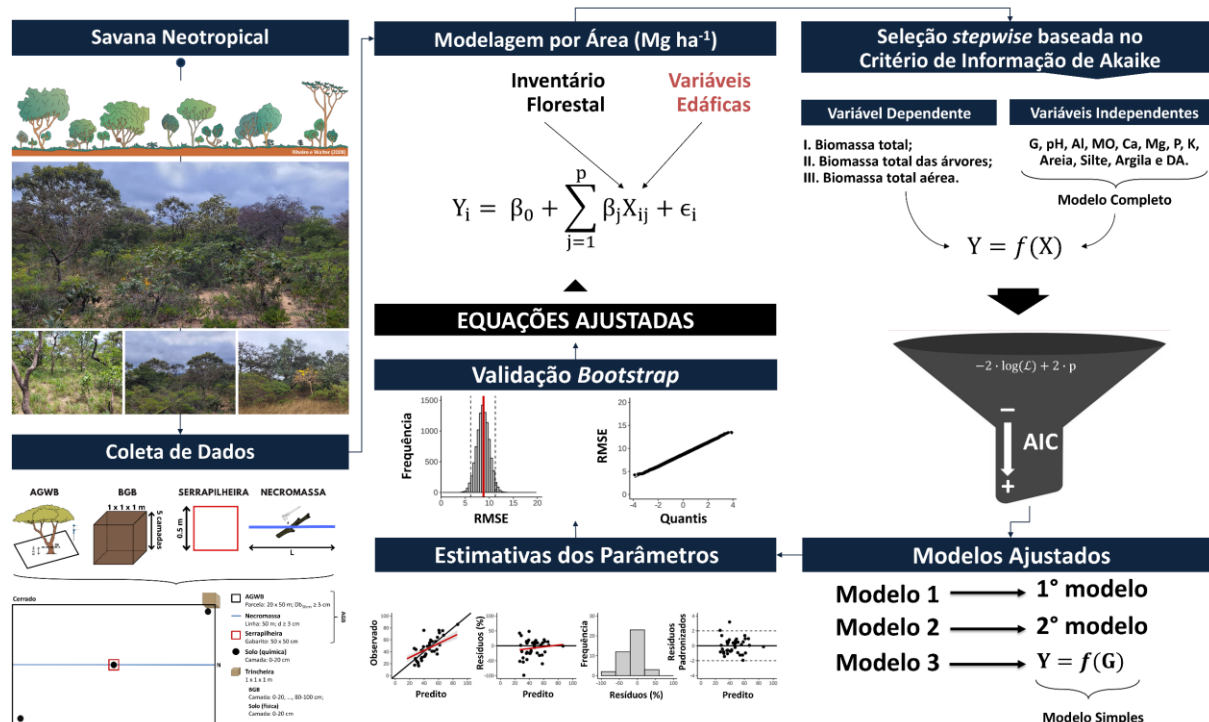
$$\text{RMSE\%} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 8})$$

em que RMSE e RMSE% = raiz do erro quadrático médio (Mg ha<sup>-1</sup> e %);  $n$  = número de observações;  $\hat{y}$  = valor predito pelo modelo ajustado;  $y$  = valor observado;  $\bar{y}$  = média dos valores observados.

A validação dos modelos utilizou 10.000 réplicas de *bootstrap* (Efron, 1987; Efron e Tibshirani, 1993; Hastie, Tibshirani e Friedman, 2009), e foi analisada pelo pacote *boot* (Canty e Ripley, 2017). A amostra *bootstrap* consiste em um conjunto de valores extraídos ao acaso, com reposição, da amostra original (James et al. 2021).

Todas as análises estatísticas e gráficas foram realizadas no software R (R Core Team, 2025).

## 2.4 RESUMO GRÁFICO



## 3 RESULTADOS

### 3.1 Estoques de biomassa e relação solo-vegetação

A produtividade média ( $\pm$  desvio padrão) nas áreas de CSS foi de  $45,24 \pm 17,32 \text{ Mg ha}^{-1}$  para biomassa total;  $20,47 \pm 11,26 \text{ Mg ha}^{-1}$  para biomassa lenhosa;  $5,49 \pm 4,18 \text{ Mg ha}^{-1}$  para serrapilheira;  $0,81 \pm 1,62 \text{ Mg ha}^{-1}$  para necromassa e  $18,47 \pm 10,88 \text{ Mg ha}^{-1}$  para biomassa de raízes. Para a biomassa radicular, o diâmetro máximo de raízes observado pelo método da trincheira aplicado foi de 5 cm.

Esses estoques corresponderam a uma densidade arbórea de  $920 \text{ ind. ha}^{-1}$  e a uma área basal de  $8,07 \pm 4,07 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , com erro amostral absoluto de  $1,30 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  e erro amostral relativo de 16,12%, excluindo indivíduos mortos, em solos distróficos ( $V < 50\%$ ) com cerca de 70% de teor médio de areia (Tabela 4).

**Tabela 4.** Estatísticas descritivas da biomassa total e de seus compartimentos, bem como dos atributos físico-químicos do solo, para áreas de cerrado sentido restrito (n = 40) na região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.

Variável	Unidade	Média	Mínimo	Máximo	Variância	SD	CV%
TB	Mg ha <sup>-1</sup>	45,24	16,30	85,78	300,04	17,32	38,29
TTB	Mg ha <sup>-1</sup>	38,94	12,52	66,65	233,13	15,27	39,21
AGWB	Mg ha <sup>-1</sup>	20,47	3,03	45,56	126,70	11,26	54,98
BGB	Mg ha <sup>-1</sup>	18,47	2,94	57,07	118,32	10,88	58,88
Serrapilheira	Mg ha <sup>-1</sup>	5,49	0,40	16,61	17,43	4,18	76,06
Necromassa	Mg ha <sup>-1</sup>	0,81	0,00	8,89	2,63	1,62	201,39
G	m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	8,07	1,75	15,62	16,55	4,07	50,39
pH	-	4,21	3,80	4,60	0,03	0,18	4,30
P	mg dm <sup>-3</sup>	1,69	0,80	10,00	2,38	1,54	91,47
Ca	cmolc dm <sup>-3</sup>	0,37	0,20	1,90	0,08	0,28	77,88
Mg	cmolc dm <sup>-3</sup>	0,15	0,10	0,40	0,01	0,07	49,26
K	cmolc dm <sup>-3</sup>	0,10	0,04	0,56	0,01	0,09	90,30
Al	cmolc dm <sup>-3</sup>	0,42	0,10	1,60	0,07	0,27	64,23
MO	%	1,28	0,40	3,50	0,31	0,56	43,97
Areia	%	68,90	32,00	89,00	246,04	15,69	22,77
Argila	%	25,20	10,00	55,00	175,96	13,26	52,64
Silte	%	5,90	1,00	13,00	7,12	2,67	45,22
DA	g cm <sup>-3</sup>	1,33	1,01	1,60	0,02	0,14	10,63
H+Al	cmolc dm <sup>-3</sup>	2,87	1,50	6,40	1,21	1,10	38,28
SB	cmolc dm <sup>-3</sup>	0,61	0,34	2,50	0,14	0,37	61,27
CTC efetiva	cmolc dm <sup>-3</sup>	1,03	0,65	2,70	0,16	0,40	39,35
CTC pH 7	cmolc dm <sup>-3</sup>	3,48	2,15	6,85	1,43	1,19	34,32
m	%	40,83	7,41	73,77	301,46	17,36	42,52
V	%	18,06	6,60	39,05	58,16	7,63	42,23

TB = biomassa total; TTB = biomassa total das árvores (AGWB+BGB); AGWB = biomassa lenhosa; BGB = biomassa abaixo do solo (raízes); SD = desvio padrão; CV% = coeficiente de variação; G = área basal; pH = potencial hidrogeniônico (CaCl<sub>2</sub>); P = fósforo (Mehlich I); MO = matéria orgânica; Mg = magnésio; K = potássio; Al = alumínio; DA = densidade aparente do solo; H+Al = acidez potencial; SB = soma de bases = Ca + Mg + K; CTC efetiva = capacidade de troca catiônica efetiva = SB + Al; CTC pH 7 = capacidade de troca catiônica a pH 7 = SB + (H + Al); m = saturação por alumínio =  $\frac{Al}{CTC\ efetiva} \cdot 100$ ; V = saturação por bases =  $\frac{SB}{CTC\ pH\ 7} \cdot 100$

As famílias com maior número de indivíduos na comunidade foram Vochysiaceae (201 ind. ha<sup>-1</sup>), Fabaceae (182 ind. ha<sup>-1</sup>) e Myrtaceae (152 ind. ha<sup>-1</sup>). Em termos de riqueza de espécies, Fabaceae foi a família mais rica (32 espécies), seguida por Vochysiaceae (11 espécies) e Myrtaceae (9 espécies). Entre as 150 espécies registradas na comunidade, apenas as dez espécies com maiores estoques de biomassa foram responsáveis por 62,9% da biomassa lenhosa. Dentre essas dez espécies, sete são tolerantes ao alumínio em solos ácidos, incluindo quatro espécies acumuladoras de alumínio (*Qualea parviflora*, *Qualea grandiflora*, *Callisthene fasciculata* e *Vochysia thyrsoidea*), três espécies excludentes de alumínio (*Caryocar*

*brasiliense*, *Hymenaea stigonocarpa* e *Tachigali subvelutina*) e três espécies para as quais não foram encontradas informações sólidas disponíveis sobre tolerância ao alumínio (*Eugenia dysenterica*, *Terminalia fagifolia* e *Machaerium opacum*).

Essas espécies tolerantes ao alumínio representaram 24,8% do valor de importância (VI%) total (16,1% e 8,7% para acumuladoras e excludentes, respectivamente) e 41,4% da biomassa lenhosa (20,1% e 21,3% para acumuladoras e excludentes, respectivamente) (Tabela 5).

**Tabela 5.** Biomassa lenhosa e valor de importância das dez espécies com maiores estoques de biomassa no cerrado sentido restrito na região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.

Espécie	Autor	Família	Al-tolerante	FA	FR	DA	DR	DoA	DoR	VI	AGWB
<i>Caryocar brasiliense</i>	Cambess.	Caryocaraceae	Excl. [5]	37,5	2,1	15,3	1,7	0,6526	8,1	4,0	2,8627
<i>Eugenia dysenterica</i>	(Mart.) DC.	Myrtaceae	NA	72,5	4,1	145,0	15,8	1,1070	13,7	11,2	2,2883
<i>Qualea parviflora</i>	Mart.	Vochysiaceae	Acum. [1,2]	65,0	3,7	77,3	8,4	0,6522	8,1	6,7	1,7397
<i>Terminalia fagifolia</i>	Mart.	Combretaceae	NA	35,0	2,0	32,0	3,5	0,4339	5,4	3,6	1,5090
<i>Hymenaea stigonocarpa</i>	Mart. ex Hayne	Fabaceae	Excl. [5]	47,5	2,7	21,0	2,3	0,2953	3,7	2,9	0,8875
<i>Qualea grandiflora</i>	Mart.	Vochysiaceae	Acum. [1,2]	57,5	3,3	40,0	4,3	0,3580	4,4	4,0	0,8339
<i>Callisthene fasciculata</i>	Mart.	Vochysiaceae	Acum. [3,4]	12,5	0,7	52,3	5,7	0,3820	4,7	3,7	0,7877
<i>Vochysia thyrsoidea</i>	Pohl	Vochysiaceae	Acum. [3,4]	17,5	1,0	11,3	1,2	0,2211	2,7	1,7	0,7556
<i>Tachigali subvelutina</i>	(Benth.) Oliveira-Filho	Fabaceae	Excl. [5]	25,0	1,4	12,8	1,4	0,2108	2,6	1,8	0,6141
<i>Machaerium opacum</i>	Vogel	Fabaceae	NA	47,5	2,7	18,0	2,0	0,2253	2,8	2,5	0,5942
Total de espécies acumuladoras de Al			4	152,5	8,7	180,8	19,7	1,6133	20,0	16,1	4,1169
Total de espécies excludentes de Al			3	110,0	6,3	49,0	5,3	1,1588	14,4	8,7	4,3643
Total de espécies Al-tolerante (Acum.+Excl.)			7	262,5	15,0	229,8	25,0	2,7721	34,3	24,8	8,4812
Total (10 espécies com maior biomassa)			10	417,5	23,8	424,8	46,2	4,5383	56,2	42,1	12,8728
Total (todas as espécies)			150	1752,5	100	919,8	100	8,0744	100	100	20,4711

AGWB = biomassa lenhosa (Mg ha<sup>-1</sup>); FA = frequência absoluta (%); FR = frequência relativa (%); DA = densidade absoluta (árvores ha<sup>-1</sup>); DR = densidade relativa (%); DoA = dominância absoluta (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>); DoR = dominância relativa (%); VI = valor de importância (%); Acum. = acumuladora de Al; Excl. = excludente de Al; NA = informações consistentes não disponíveis; Haridasan, 1982 [1]; Haridasan et al., 1986 [2]; Haridasan e Araújo (1988) [3]; Haridasan (2008) [4]; Oliveira et al. (2019) [5].

### 3.2 Modelagem da biomassa por unidade de área

Para a modelagem da biomassa total (TB), três modelos foram ajustados: dois selecionados pelo procedimento *stepwise*, com menor AIC, e um modelo simples, apenas em função da área basal (G) (Tabela 6). Já para a modelagem da biomassa total das árvores (TTB), apenas dois modelos foram mantidos, uma vez que o segundo melhor modelo obtido pelo procedimento *stepwise* coincidiu com o modelo simples baseado em G. Para a biomassa lenhosa (AGWB), embora a seleção de modelos também tenha sido conduzida por RLM, os modelos selecionados

foram ajustados por regressão não linear, devido à falta de significância do intercepto nas formulações lineares.

**Tabela 6.** Modelos de biomassa por unidade de área ajustados para áreas de cerrado sentido restrito na região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.

Modelo	Nº
$Y = \beta_0 + \beta_1 G + \beta_2 pH + \beta_3 Al + \beta_4 MO + \beta_5 P + \beta_6 K + \beta_7 Ca + \beta_8 Mg + \beta_9 Areia + \beta_{10} Silte + \beta_{11} Argila + \beta_{12} DA + \varepsilon$	Full
<b>(a) Modelagem da biomassa total – TB</b>	
$Y = \beta_0 + \beta_1 G + \beta_2 Mg + \beta_3 Al + \varepsilon$	M1*
$Y = \beta_0 + \beta_1 G + \beta_2 Mg + \varepsilon$	M2*
$Y = \beta_0 + \beta_1 G + \varepsilon$	M3#
<b>(b) Modelagem da biomassa total das árvores – TTB</b>	
$Y = \beta_0 + \beta_1 G + \beta_2 Mg + \varepsilon$	M4*
$Y = \beta_0 + \beta_1 G + \varepsilon$	M5#
<b>(c) Modelagem da biomassa lenhosa – AGWB</b>	
$Y = \beta_0 \cdot G^{\beta_1} \cdot e^{(\beta_2 \cdot Mg + \beta_3 \cdot Areia)} + \varepsilon$	M6*
$Y = \beta_0 \cdot G^{\beta_1} \cdot e^{(\beta_2 \cdot Mg)} + \varepsilon$	M7*
$Y = \beta_0 \cdot G^{\beta_1} + \varepsilon$	M8#

Y = biomassa (Mg ha<sup>-1</sup>); \* variáveis selecionadas pelo método *stepwise*, com base no menor Critério de Informação de Akaike (AIC); # modelo simples.  $\beta_i$  = parâmetros; G = área basal (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>); pH<sub>CaCl2</sub> = (adimensional); Al = alumínio (cmolc dm<sup>-3</sup>); MO = matéria orgânica (%); P<sub>Mehlich I</sub> = fósforo (mg dm<sup>-3</sup>); K = potássio (cmolc dm<sup>-3</sup>); Ca = cálcio (cmolc dm<sup>-3</sup>); Mg = magnésio (cmolc dm<sup>-3</sup>); Areia (%); Silte (%); Argila (%); DA = densidade aparente do solo (g cm<sup>-3</sup>);  $\varepsilon$  = erro.

Para os modelos de estimativa da TB, ao comparar o  $\Delta_i$  do melhor modelo (M1) com o do modelo simples (M3), que utiliza apenas G como variável preditora, observou-se uma diferença superior a 10 (16,36). Assim, o modelo simples foi considerado essencialmente sem suporte empírico (Burnham e Anderson, 2002; Cavanaugh e Neath, 2019), indicando que não foi competitivo e que o modelo M1, que inclui variáveis do solo, foi de fato a melhor opção considerando o conjunto de dados. Ambos os modelos (M2 e M3) apresentaram  $\Delta_i > 2$  (Tabela 7).

O modelo M1 melhorou as estimativas da TB, reduzindo o RMSE% para 24,40% e aumentando a correlação entre os valores preditos e observados ( $r_{\hat{y}y} = 0,76$ ), em comparação com 31,47% e 0,55 para o modelo M3, respectivamente para RMSE% e  $r_{\hat{y}y}$ .

O modelo intermediário M2 apresentou  $\Delta_i$  superior a 4 (7,10) e foi classificado como tendo suporte empírico consideravelmente menor em relação ao melhor modelo (Burnham e Anderson, 2002). Seu RMSE% foi de 27,34% e a correlação entre valores preditos e observados foi  $r_{\hat{y}y} = 0,69$ .

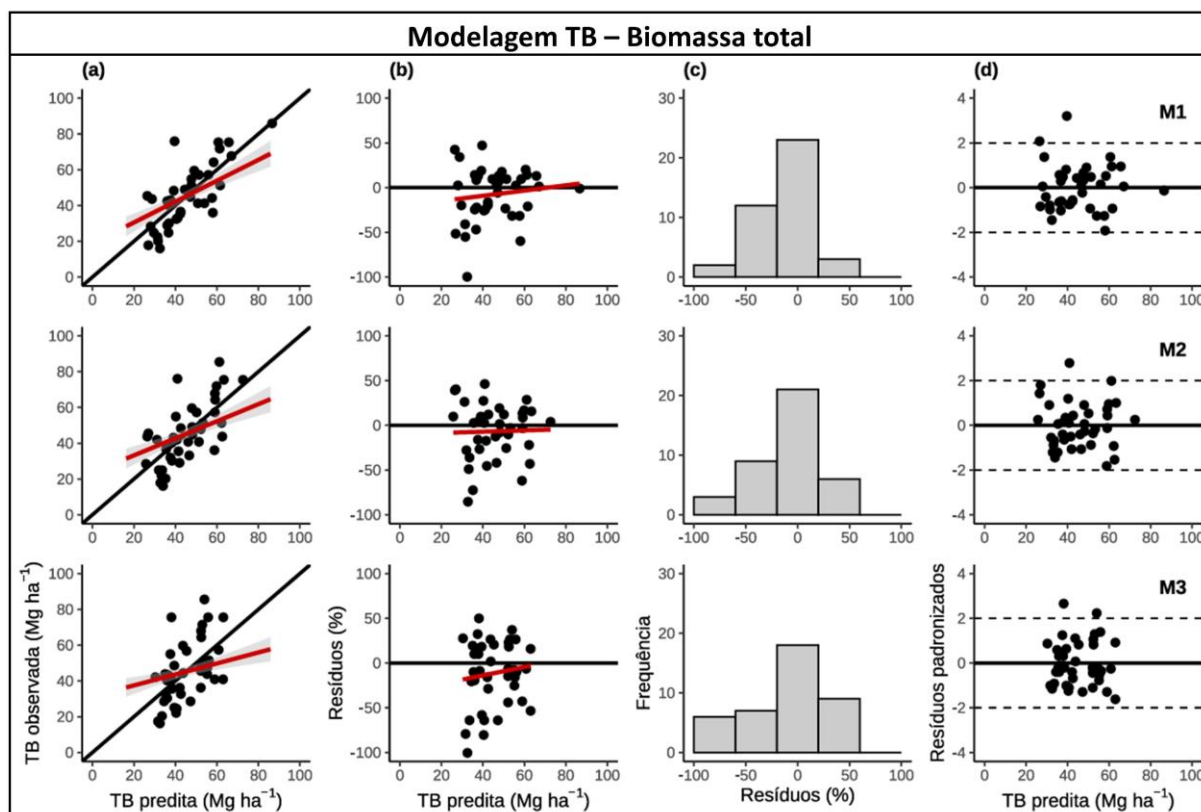
A análise gráfica dos resíduos (Fig. 4) mostrou que os três modelos tendem a superestimar os estoques totais de biomassa. Além da variável G, a regressão linear múltipla realizada pelo

método *stepwise* identificou o magnésio (Mg) e o alumínio (Al) como as variáveis do solo que mais influenciaram a estimativa da biomassa total.

**Tabela 7.** Estimativas dos parâmetros dos modelos de biomassa por unidade de área ajustados para cerrado sentido restrito no Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.

Modelo	Coefficiente	SD	Variável	$P_{S-W}$	$P_{B-L}$	$r_{\hat{y}y}$	RMSE	RMSE%	AIC	$\Delta_i$
<b>Modelagem TB – Biomassa total</b>										
M1	$\beta_0 = 24,522$	6,325	**	0,14	0,15	0,76	11,04	24,40	200,11	0
	$\beta_1 = 3,081$	0,487	G**							
	$\beta_2 = -90,831$	28,152	Mg*							
	$\beta_3 = 21,727$	7,166	Al**							
M2	$\beta_0 = 36,526$	5,451	**	0,64	0,12	0,69	12,37	27,34	207,21	7,10
	$\beta_1 = 2,986$	0,537	G**							
	$\beta_2 = -106,160$	30,606	Mg**							
M3	$\beta_0 = 26,190$	5,185	**	0,07	0,03	0,55	14,24	31,47	216,47	16,36
	$\beta_1 = 2,360$	0,575	G**							
<b>Modelagem TTB – Biomassa total das árvores</b>										
M4	$\beta_0 = 29,083$	4,643	**	0,12	0,14	0,72	10,54	27,06	194,38	0
	$\beta_1 = 2,781$	0,458	G**							
	$\beta_2 = -86,823$	26,073	Mg**							
M5	$\beta_0 = 20,630$	4,374	**	0,09	0,04	0,61	12,01	30,85	202,87	8,49
	$\beta_1 = 2,267$	0,485	G**							
<b>Modelagem AGWB – Biomassa lenhosa</b>										
M6	$\beta_0 = 1,801$	0,438	**	0,94	0,60	0,94	3,71	18,10	228,30	0
	$\beta_1 = 1,060$	0,079	G**							
	$\beta_2 = -1,483$	0,380	Mg**							
	$\beta_3 = 0,006$	0,002	Areia**							
M7	$\beta_0 = 2,806$	0,573	**	0,63	0,14	0,93	4,18	20,44	235,99	7,69
	$\beta_1 = 1,047$	0,087	G**							
	$\beta_2 = -1,333$	0,413	Mg**							
M8	$\beta_0 = 2,740$	0,619	**	0,24	0,22	0,90	4,81	23,48	245,09	16,79
	$\beta_1 = 0,966$	0,094	G**							

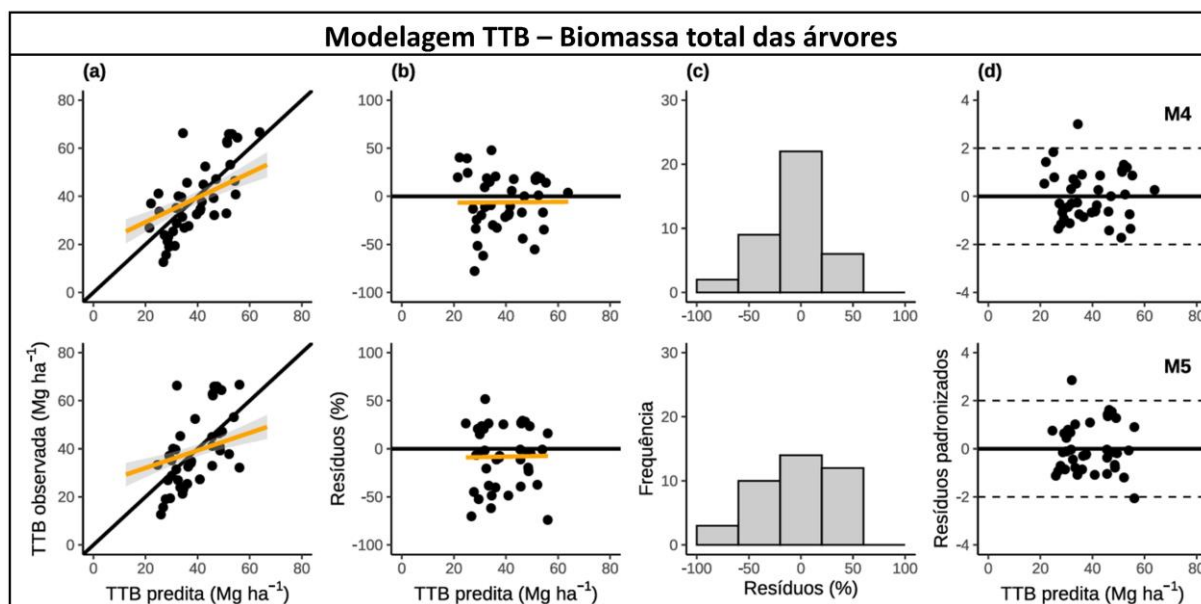
SD = desvio padrão dos coeficientes;  $P_{S-W}$  = p-valor do teste de normalidade de Shapiro–Wilk dos resíduos;  $P_{B-L}$  = p-valor do teste de Box–Ljung para autocorrelação dos resíduos;  $r_{\hat{y}y}$  = coeficiente de correlação de Pearson entre valores observados e preditos; RMSE e RMSE% = raiz do erro quadrático médio (Mg ha<sup>-1</sup> e %); AIC = Critério de Informação de Akaike;  $\Delta_i$  = diferenças de AIC; G = área basal (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>); Mg = magnésio (cmolc dm<sup>-3</sup>); Al = alumínio (cmolc dm<sup>-3</sup>); Areia (%). Códigos: teste *t* significativo aos níveis de confiança de 99% (\*\*) e 95% (\*).



**Figura 4.** Valores observados *versus* preditos (a), resíduos *versus* valores preditos (b), histograma das classes de resíduos (c) e resíduos padronizados *versus* valores preditos (d) para os modelos de biomassa total (TB) M1, M2 e M3 (Tabela 7), por unidade de área, no cerrado sentido restrito, na região Norte e Noroeste de Minas Gerais, Brasil. A linha vermelha representa a linha de tendência.

Para a modelagem da TTB, o segundo melhor modelo selecionado pelo método *stepwise* correspondeu ao modelo simples, de modo que apenas dois modelos foram avaliados (M4 e M5) (Fig. 5). A diferença  $\Delta_i$  entre o melhor modelo (M4) e o modelo simples (M5) foi bem superior a 2 ( $\Delta_i = 8,49$ ), indicando que o modelo simples não é competitivo e apresenta suporte empírico essencialmente baixo, considerando o conjunto de dados utilizado (Tabela 7).

Mais uma vez, as estimativas foram aprimoradas, com redução do RMSE% de 30,85% (M5) para 27,06% (M4) e aumento da correlação de Pearson entre valores preditos e observados ( $r_{\hat{y}y}$ ) de 0,61 para 0,72 para os modelos M4 e M5, respectivamente. Além da variável G, a regressão linear múltipla conduzida pelo método *stepwise* identificou o magnésio (Mg) como o principal preditor adicional na estimativa da biomassa total das árvores.



**Figura 5.** Valores observados *versus* preditos (a), resíduos *versus* valores preditos (b), histograma das classes de resíduos (c) e resíduos padronizados *versus* valores preditos (d) para os modelos de biomassa total das árvores (TTB) M4 e M5 (Tabela 7), por unidade de área, no cerrado sentido restrito, na região Norte e Noroeste de Minas Gerais, Brasil. A linha amarela representa a linha de tendência.

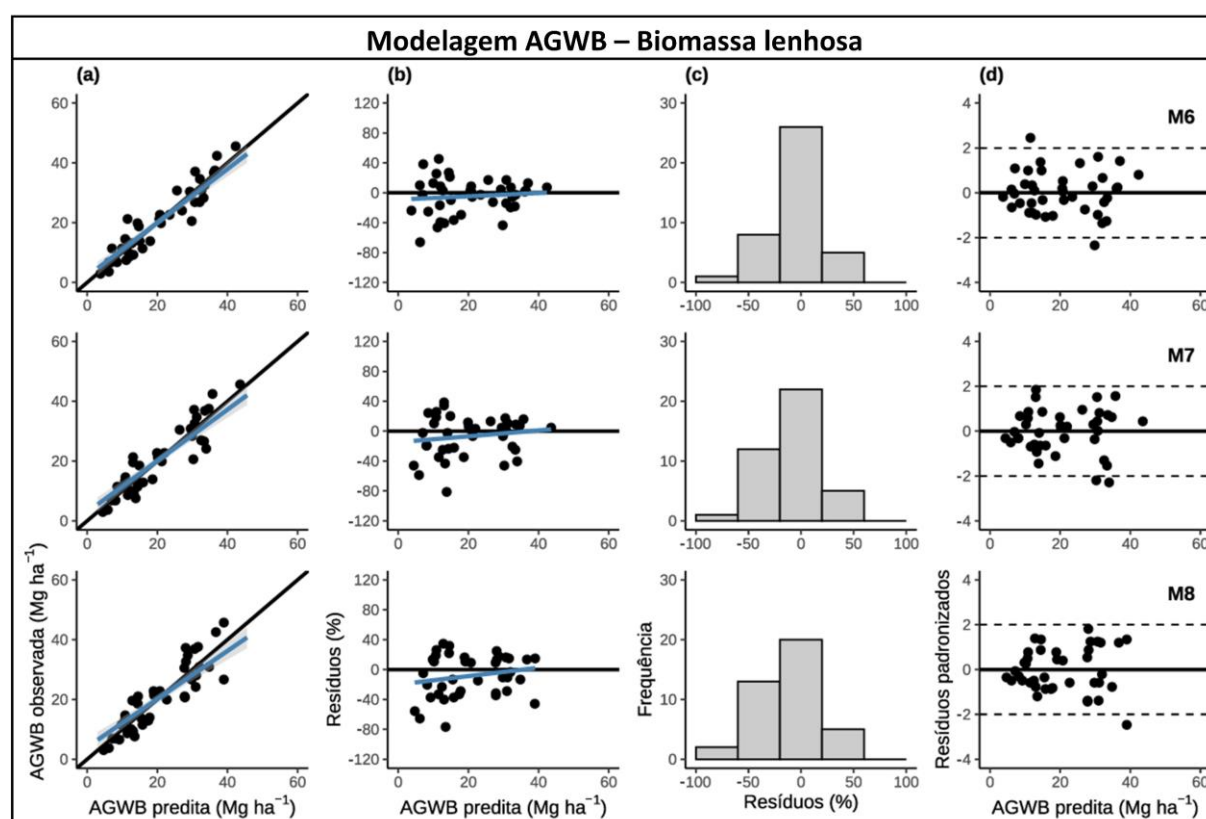
Para a modelagem da AGBW, a diferença  $\Delta_i$  entre o melhor modelo (M6), que apresentou o menor AIC, e o modelo simples (M8) foi de 16,79, portanto superior a 10, o que indica uma diferença não atribuível apenas à inclusão de variáveis adicionais. O modelo simples (M8) foi considerado essencialmente sem suporte empírico.

As estimativas foram aprimoradas, com redução do RMSE% para 18,21% e correlação entre valores preditos e observados ( $r_{\hat{y}y}$ ) de 0,94 para o modelo M6, em comparação com 23,48% e 0,90 para o modelo M8, respectivamente (Tabela 7). A acurácia em termos de valores preditos e observados foi semelhante, todas acima de 90%, apesar de uma leve melhora com a inclusão de variáveis do solo (Fig. 6).

O modelo intermediário (M7) apresentou  $\Delta_i$  superior a 2 (7,69). Segundo Burnham e Anderson (2002), isso indica que o modelo M6 possui suporte empírico substancial e difere do modelo M7 não apenas pela presença de um parâmetro adicional (areia). Se a diferença de AIC fosse inferior a 2, o modelo com menor número de parâmetros deveria ser selecionado (Cavanaugh e Neath, 2019; Resende e Alves, 2020), o que não ocorreu. O desempenho do modelo M7 também foi apenas ligeiramente superior ao do modelo simples, com pequena redução do erro relativo.

Além da variável G, a regressão linear múltipla conduzida pelo método *stepwise* identificou o magnésio (Mg) e a areia como as principais variáveis do solo associadas à estimativa da biomassa lenhosa para as áreas de Cerrado estudadas.

Assim, para a estimativa dos estoques da TB, o melhor modelo foi o M1. Para os estoques da TTB, o melhor modelo selecionado foi o M4. E, para os estoques da AGWB, o modelo mais adequado foi o M6. Esses modelos apresentaram correlações entre valores preditos e observados de 76%, 72% e 94%, e erros relativos (RMSE%) de 24,40%, 27,06% e 18,10%, respectivamente.



**Figura 6.** Valores observados *versus* preditos (a), resíduos *versus* valores preditos (b), histograma das classes de resíduos (c) e resíduos padronizados *versus* valores preditos (d) para os modelos de biomassa lenhosa (AGWB) M6, M7 e M8 (Tabela 7), ajustados por unidade de área, no cerrado sentido restrito, na região Norte e Noroeste de Minas Gerais, Brasil. A linha azul representa a linha de tendência.

Neste estudo, todos os fatores de inflação de variância (VIFs) apresentaram valores próximos de 1 para a modelagem da biomassa total e da biomassa total das árvores, enquanto que, para a biomassa lenhosa, os valores foram próximos de 5. No entanto, esses valores ainda se encontram dentro de limites práticos aceitáveis ( $< 10$ ) (James et al., 2021; Jones, Harden e Crawley, 2023), indicando que não há evidências de que a colinearidade tenha sido um

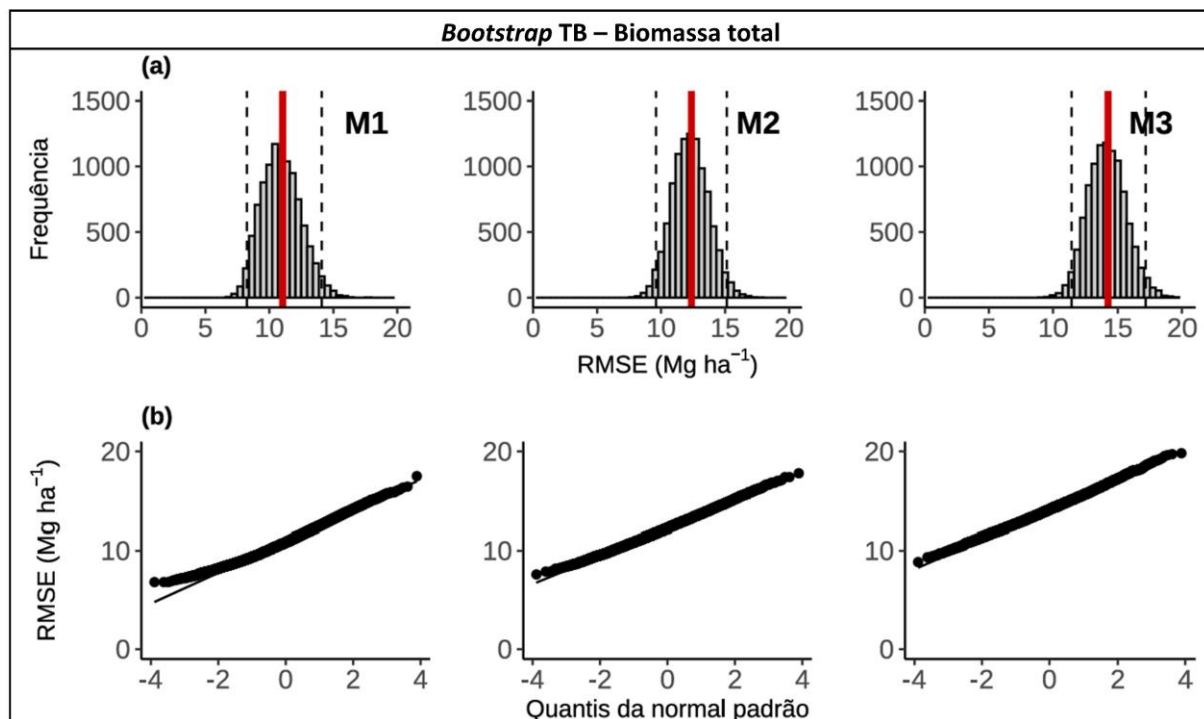
problema (Tabela 7). Todos os modelos selecionados para a estimativa de biomassa apresentaram valores de  $F$  significativos ( $P < 0,01$ ).

Quanto à validação, a análise do RMSE mostrou que o estimador *bootstrap* apresentou viés negativo para todos os modelos e níveis de modelagem (Tabela 8), e todos os valores de erro estimados permaneceram dentro dos intervalos de confiança construídos pelo método percentil (Figs. 7a–9a). Na validação dos modelos, todos apresentaram resíduos com distribuição normal, de acordo com o teste de Shapiro–Wilk ( $P > 0,05$ ) (Figs. 7b–9b).

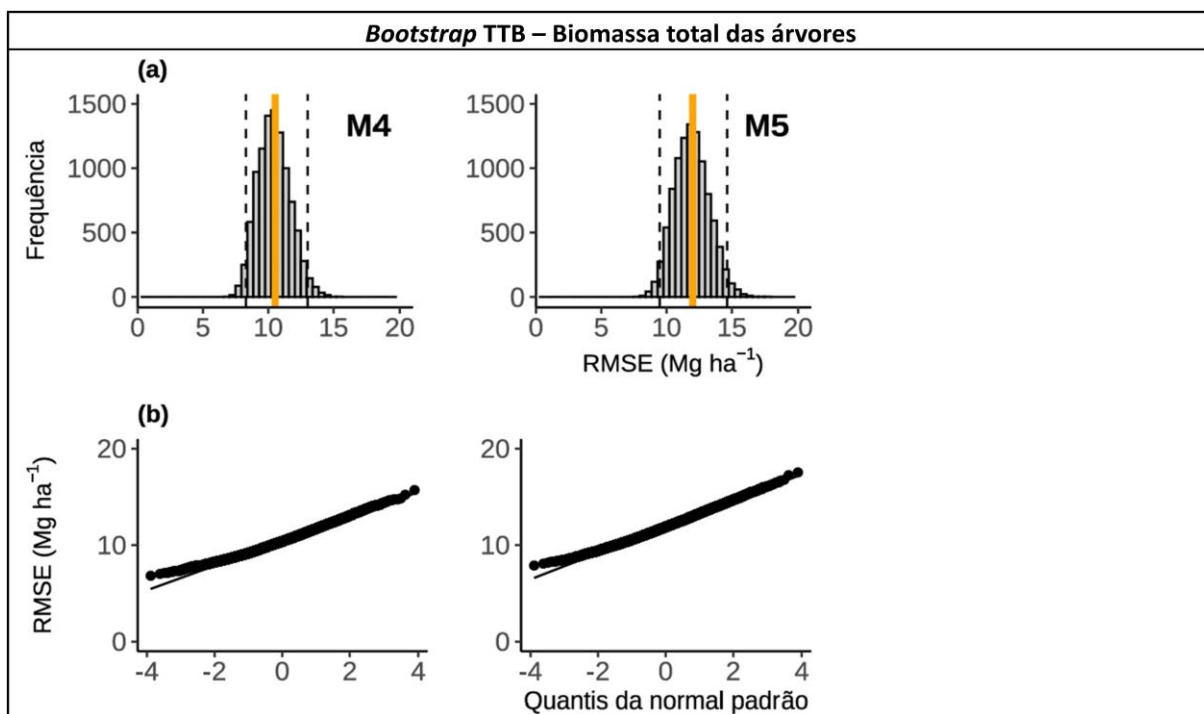
**Tabela 8.** Validação dos modelos de biomassa por unidade de área ajustados para o cerrado sentido restrito na região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.

Modelo	RMSE		Viés	SD	IC	
	Ajustado	<i>Bootstrap</i>			LI	LS
<b>Biomassa total (TB)</b>						
M1	11,0385	10,9245	-0,1140	1,5179	8,2473	14,0909
M2	12,3677	12,2754	-0,0924	1,4056	9,5967	15,1398
M3	14,2372	14,1496	-0,0876	1,4802	11,3825	17,1726
<b>Biomassa total das árvores (TTB)</b>						
M4	10,5356	10,4518	-0,0838	1,2307	8,2904	13,0132
M5	12,0111	11,9270	-0,0842	1,3304	9,4736	14,6358
<b>Biomassa lenhosa (AGWB)</b>						
M6	3,7055	3,6767	-0,0288	0,4224	2,8692	4,5069
M7	4,1831	4,1486	-0,0345	0,4530	3,3491	5,0302
M8	4,8054	4,7768	-0,0286	0,4521	3,9138	5,7009

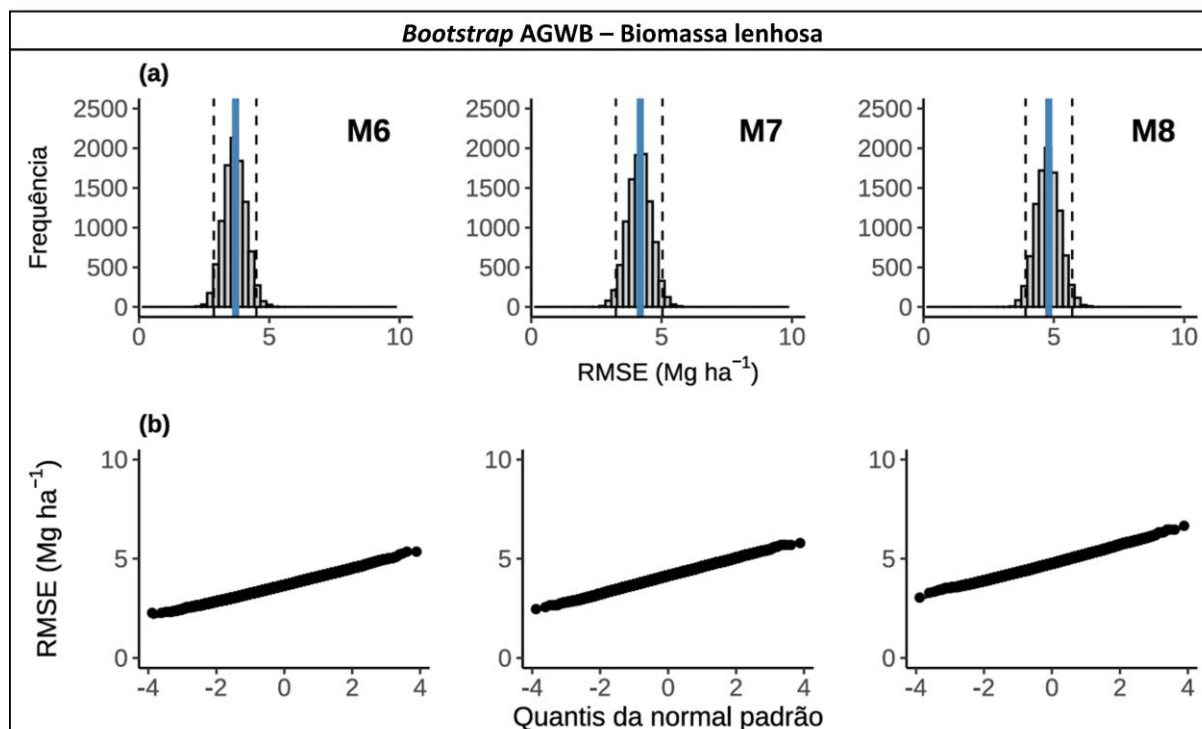
RMSE = raiz do erro quadrático médio ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); SD = desvio padrão obtido pelo método *bootstrap* ( $n = 10.000$ ); Viés = diferença entre o RMSE obtido pelo *bootstrap* e o RMSE ajustado; IC = intervalo de confiança estimado pelo método percentil; LI = limite inferior; LS = limite superior.



**Figura 7.** Validação dos modelos de biomassa total (TB) com 10.000 replicações *bootstrap* no cerrado sentido restrito, na região Norte e Noroeste de Minas Gerais, Brasil: histograma dos resíduos (a) e gráfico QQ do RMSE *versus* quantis da distribuição normal (b) para os modelos M1, M2 e M3 (Tabela 7). A linha vermelha representa o RMSE ajustado.



**Figura 8.** Validação dos modelos de biomassa total das árvores (TTB) com 10.000 replicações *bootstrap* no cerrado sentido restrito, na região Norte e Noroeste de Minas Gerais, Brasil: histograma dos resíduos (a) e gráfico QQ do RMSE *versus* quantis da distribuição normal (b) para os modelos M4 e M5 (Tabela 7). A linha amarela representa o RMSE ajustado.



**Figura 9.** Validação dos modelos de biomassa lenhosa (AGWB) com 10.000 replicações *bootstrap* no cerrado sentido restrito, na região Norte e Noroeste de Minas Gerais, Brasil: histograma dos resíduos (a) e gráfico QQ do RMSE *versus* quantis da distribuição normal (b) para os modelos M6, M7 e M8 (Tabela 7). A linha azul representa o RMSE ajustado.

As equações ajustadas no presente estudo são apresentadas a seguir (Tabela 9).

**Tabela 9.** Equações de melhor ajuste para estimar a biomassa em cerrado sentido restrito obtidas para a região Norte e Noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil.

Estado	Equação	Parâmetro (Y)
	$Y = 24,522 + 3,081(G) - 90,831(Mg) + 21,727(Al)$	TB (Mg ha <sup>-1</sup> )
MG	$Y = 29,083 + 2,781(G) - 86,823(Mg)$	TTB (Mg ha <sup>-1</sup> )
	$Y = 1,801 \cdot G^{1,060} \cdot e^{(-1,483 \cdot Mg + 0,006 \cdot Areia)}$	AGWB (Mg ha <sup>-1</sup> )

TB = biomassa total; TTB = biomassa total das árvores (AGWB+BGB); AGWB = biomassa lenhosa; BGB = biomassa abaixo do solo (raízes); Db = diâmetro basal (cm), medido a 0,3 m do solo; G = área basal (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>); Mg = magnésio (cmolc dm<sup>-3</sup>); Al = alumínio (cmolc dm<sup>-3</sup>); Areia (%).

## 4 DISCUSSÕES

### 4.1 Estoques de biomassa

No Brasil Central, a soma das frações aérea e subterrânea, amostradas até 2 m de profundidade, variou de 21,8 Mg ha<sup>-1</sup> em campo sujo a 77,8 Mg ha<sup>-1</sup> em cerrado denso (Bustamante et al., 2012). Os valores obtidos no presente estudo (aproximadamente 45 Mg ha<sup>-1</sup>)

estão dentro dessa faixa e correspondem a uma área basal de  $8,07 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  e densidade de  $920 \text{ ind. ha}^{-1}$ , excluindo indivíduos mortos.

A diversidade estrutural dos tipos de vegetação na Savana Neotropical resulta em ampla variação nos estoques de biomassa. Além dos métodos para estimativa de biomassa serem diversos, e poucos estudos quantificaram esses estoques considerando diferentes compartimentos (Oliveira et al., 2019).

Em Minas Gerais, em áreas de cerrado sentido restrito, Ribeiro et al. (2011) relataram estoques de biomassa de  $62,96 \text{ Mg ha}^{-1}$  e  $37,51 \text{ Mg ha}^{-1}$  para árvores e raízes, respectivamente, valores superiores aos observados neste estudo. Essa diferença está associada à maior densidade de árvores ( $2086 \text{ ind. ha}^{-1}$ ), maior área basal ( $14,90 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ) e às diferenças metodológicas na medição de árvores e raízes, que consideraram o diâmetro à altura do peito (DAP), diferentemente do presente estudo, que utilizou o diâmetro medido a 30 cm do solo (Db). Esse fator ainda carece de padronização, uma vez que a arquitetura das árvores e, consequentemente, a posição de medição do diâmetro influenciam o ajuste e a aplicação dos modelos (Moraes et al., 2014).

Para comparações de estoques de biomassa, persistem divergências metodológicas, especialmente na quantificação da biomassa arbórea acima do solo, que é o componente mais reportado nos estudos (Sanquetta et al., 2015). Essas dificuldades vão desde a padronização dos critérios do diâmetro de inclusão, seja à altura do peito (DAP, 1,3 m) ou na base (Db, 0,3 m), com variações menos comuns, como as adotadas por Abdala et al. (1998) e Ruggiero et al. (2002), que utilizaram  $\text{Db} \geq 2$  e  $3 \text{ cm}$ , respectivamente, até a escassez de equações, uma vez que a estimativa da biomassa total é um processo caro e demorado.

Situação semelhante ocorre para as raízes (Miranda et al., 2014), que apresentam limitações metodológicas evidentes, incluindo a definição do método destrutivo a ser empregado, assim como para a necromassa (Magnússon et al., 2016), especialmente quanto ao limite de diâmetro usado para distinguir esse componente da serrapilheira (Palace et al., 2012).

## **4.2 Equações de biomassa**

Até onde se sabe, poucos estudos desenvolveram equações de biomassa para o cerrado sentido restrito, e grande parte foi desenvolvida em nível de árvore individual, sem a inclusão de variáveis edáficas. Esse padrão evidencia uma limitação, especialmente quanto à integração de atributos do solo nos modelos de estimativa de biomassa.

Os resultados indicam a inclusão de variáveis edáficas como uma alternativa para reduzir custos e dependência taxonômica, ampliando o leque de aplicação dos modelos em estudos ecológicos (Galidaki et al., 2017; Yang et al., 2022). Este estudo propôs um caminho alternativo para estimar a biomassa por unidade de área, incorporando variáveis do solo, em contraste com as equações mais utilizadas, que se restringem ao nível de árvore individual e, no caso da equação mais abrangente, depende da densidade da madeira.

Nesse contexto, Ribeiro et al. (2011) testaram cinco modelos-padrão combinando diâmetro à altura do peito (DAP), altura (H) e densidade da madeira (WD), concluindo que o modelo baseado em DAP e densidade da madeira apresentou o melhor desempenho. Conseqüentemente, estudos que estimam biomassa na fisionomia mais comum da Savana Neotropical, o cerrado sentido restrito (Ribeiro e Walter, 2008), frequentemente precisam recorrer a bancos de dados genéricos de densidade da madeira ou a dados obtidos em formações vegetais fora da savana. No entanto, a literatura sobre densidade da madeira para espécies da Savana Neotropical ainda é limitada (Vale, Brasil e Leão, 2002; Miranda et al., 2014).

Nesse contexto, o diâmetro das árvores se mantém como o principal preditor em modelos de estimativa de volume, biomassa e estoques de carbono, devido à sua forte correlação com esses atributos (Rezende et al., 2006; Miranda et al., 2014). No presente estudo, o diâmetro não foi utilizado diretamente como variável preditora, mas foi incorporado no cálculo da área basal (G), que foi incluída como variável explicativa e esteve presente em todos os modelos.

Além do diâmetro, o modelo pantropical exige a altura, que, embora melhore os modelos de biomassa, é uma variável de difícil obtenção e apresenta elevados erros associados (Sullivan et al., 2018). O modelo proposto por Chave et al. (2014), embora amplamente utilizado, emprega o DAP como variável explicativa, diferindo da recomendação para a Savana Neotropical, que indica o uso do diâmetro medido a 30 cm do solo em áreas de savana devido à arquitetura das árvores (Felfili, Carvalho e Haidar, 2005), abordagem adotada no presente estudo. Morais et al. (2014), ao ajustar modelos com base em 868 árvores rigorosamente cubadas em áreas de cerrado sentido restrito e campo cerrado em Minas Gerais, concluíram que a altura em que o diâmetro é medido (0,3 ou 1,3 m) influenciou o ajuste das equações de volume e biomassa, uma vez que as árvores são naturalmente mais espessas próximo à base.

Na ausência de modelos locais robustos para o bioma, modelos genéricos com os pantropicais ainda podem ser úteis (Roitman et al., 2018), embora esforços contínuos sejam realizados para preencher essas lacunas e aprimorar as estimativas locais de biomassa.

Quanto as equações ajustadas no presente trabalho, considerando a heterogeneidade dos dados, caracterizada pela alta riqueza de espécies e pelo mosaico de tipos de vegetação, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios. No nível da biomassa total, que inclui múltiplos compartimentos e, conseqüentemente, maior variabilidade, os resultados foram comparáveis aos de estudos conduzidos em nível de árvore individual. Esses valores são consistentes com a alta variabilidade estrutural e morfológica inerente às espécies lenhosas do cerrado sentido restrito (Ribeiro e Walter, 2008; Roitman et al., 2018).

Os melhores modelos incluíram área basal e variáveis edáficas e apresentaram erros (RMSE) entre 18 e 30%, bem como correlações entre valores observados e preditos ( $r_{yy}$ ) superiores a 0,72. Rezende et al. (2006), ao desenvolver equações de árvore individual para volume, biomassa lenhosa verde, biomassa lenhosa seca e estoques de carbono no Distrito Federal, encontraram erros padrão das estimativas em torno de 30%.

Embora este estudo não inclua uma análise econômica, é evidente que o uso de equações baseadas no diâmetro e variáveis do solo é vantajoso, pois dispensa a necessidade de identificação das espécies, especialmente em florestas tropicais com alta riqueza de espécies e ampla variação de densidade da madeira (Sullivan et al., 2025). Além disso, a amostragem e a análise do solo são operacionalmente mais simples do que a amostragem direta das raízes, independentemente da metodologia utilizada, tornando os inventários mais rápidos e baratos.

Este parágrafo e os seguintes são dedicados às limitações do presente estudo, que, como qualquer outro, estão presentes. Para os resultados obtidos, existem erros de inventário associados à amostragem, os quais foram expressos por meio da análise do inventário florestal considerando a área basal. Existem também erros relacionados à equação utilizada para estimar a biomassa lenhosa, considerados elevados.

No entanto, é importante destacar a ausência de equações específicas para a região estudada, bem como a necessidade de recorrer a bancos de dados de densidade da madeira em nível de espécie, dada a elevada riqueza florística observada, a fim de aplicar equações desenvolvidas para regiões adjacentes ou contextos pantropicais. Além disso, a obtenção de autorizações junto aos órgãos ambientais competentes para amostragem destrutiva das árvores representa um desafio político e operacional.

Ademais, existe erro associado à modelagem por unidade de área, conforme expresso nas tabelas de ajuste dos modelos. No que se refere aos compartimentos da biomassa, a amostragem de raízes por meio de trincheiras em um único ponto por parcela também pode introduzir viés. Ainda assim, a dificuldade inerente à amostragem da porção subterrânea da vegetação é

amplamente reconhecida (Pardi et al., 2025). A faixa de diâmetro das raízes observada foi claramente especificada, além de estar em processo de transição quanto aos critérios que definem raízes finas ou grossas (McCormack et al., 2015), e as limitações não são apenas metodológicas, mas também financeiras.

Além disso, os estoques de serrapilheira e necromassa são fortemente influenciados pela sazonalidade. Essas considerações evidenciam a complexidade envolvida na estimativa e modelagem da biomassa, especialmente das raízes e, sobretudo, dos estoques de biomassa total.

### 4.3 Relação solo–vegetação

Além da área basal (G), obtida a partir do inventário florestal, os melhores modelos incluem apenas as seguintes variáveis edáficas: alumínio (Al,  $\text{cmolc dm}^{-3}$ ), magnésio (Mg,  $\text{cmolc dm}^{-3}$ ) e teor de areia (Areia, %). Em relação aos níveis de magnésio, as parcelas com maiores estoques de biomassa foram aquelas que apresentaram menores concentrações desse nutriente. As áreas estudadas também exibiram altos teores de areia, característica observada visualmente nas parcelas (Fig. 1a) e confirmada pelo elevado teor médio de areia obtido.

Com base nos coeficientes das equações, este trabalho obteve correlação positiva entre a biomassa e alumínio. Em escala regional, Lopes (1975) e Goodland e Ferri (1979) relataram correlação negativa entre biomassa e níveis de saturação por Al. Entretanto, em escala local, Ribeiro et al. (1982) observaram correlação positiva, como no presente estudo, evidenciando as adaptações nutricionais das espécies nativas da Savana Neotropical a solos ácidos.

Ao considerar um subconjunto das dez espécies mais importantes, prática comum dado que concentram a maior parte da biomassa, observou-se que, embora o número de espécies acumuladoras de Al seja baixo, sua importância fitossociológica foi maior do que a das espécies excludentes. Esse padrão sugere que a capacidade de acumular alumínio confere vantagens adaptativas às espécies sob as condições edáficas prevalentes (Haridasan e Araújo, 1988).

As espécies tolerantes ao alumínio incluem tanto aquelas que o excluem por meio de mecanismos que impedem sua absorção quanto as acumuladoras, definidas como plantas com concentrações foliares de Al superiores a  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  (Haridasan, 1982).

Várias espécies comuns da Savana Neotropical, em vez de excluírem o alumínio, absorvem-no e transportam-no para folhas e sementes. Outras espécies não se desenvolvem na ausência de alumínio em soluções nutritivas, como ocorre com *Vochysia thyrsoidea* Mart. (Vochysiaceae) (Machado, 1985; Haridasan, 1988), que integrou o grupo das dez espécies com maiores estoques de biomassa lenhosa nas áreas estudadas (Tabela 6).

Quanto as famílias identificadas neste estudo, aquelas com maior riqueza de espécies foram consideradas hiperdominantes dentro do bioma, notadamente Vochysiaceae, Fabaceae e Myrtaceae (Alvarez et al., 2025). O gênero *Qualea*, que inclui *Q. parviflora* e *Q. grandiflora*, ambas abundantes na área estudada, é reconhecido como o gênero mais dominante da Savana Neotropical (Alvarez et al., 2025). Essas espécies apresentam ampla distribuição em todo o bioma (Françoso, Haidar e Machado, 2016) e são caracterizadas como acumuladoras de alumínio (Haridasan, 1982; Haridasan et al., 1986; Haridasan, 2008), evidenciando a ligação entre dominância ecológica, tolerância ao Al e estoques de biomassa.

Espécies da família Vochysiaceae, conhecidas como hiperacumuladoras de alumínio no Cerrado brasileiro, são capazes de armazenar Al nos cloroplastos sem danos aparentes (Andrade et al., 2011). Embora nenhum papel metabólico específico do alumínio tenha sido plenamente estabelecido (Haridasan, 2008; Oliveira et al., 2019), as espécies mais abundantes e as famílias mais ricas da Savana Neotropical apresentam tolerância a este elemento. Esse padrão reforça ainda mais a contribuição das variáveis do solo para o estabelecimento e distribuição dos tipos de vegetação e, conseqüentemente, para os estoques de biomassa dentro do bioma.

## 5 CONCLUSÕES

A inclusão de variáveis edáficas aumentou a precisão das estimativas na modelagem de biomassa por unidade de área no cerrado sentido restrito, na Savana Neotropical. Essa abordagem reduz a dependência taxonômica e a necessidade de bancos de dados de densidade da madeira, que frequentemente não contemplam toda a riqueza de espécies, especialmente em florestas tropicais, onde essa variável apresenta ampla variação.

Além disso, o uso de variáveis edáficas obtidas por meio de amostragem de solo relativamente simples e de análises laboratoriais torna as operações mais rápidas e econômicas. Isso é particularmente relevante quando se considera a biomassa subterrânea e o fato de não ser necessária uma análise de solos com todas as suas informações. Ao mesmo tempo, essas variáveis permitem capturar aspectos relacionados às adaptações nutricionais da vegetação nativa aos solos característicos do bioma.

Os resultados evidenciam que a inclusão de variáveis edáficas na modelagem da biomassa constitui uma alternativa vantajosa. Nesse sentido, estudos futuros serão fortalecidos se considerarem três principais grupos de informações provenientes das análises de solo: (i) acidez e toxidez, (ii) teor de nutrientes e matéria orgânica e (iii) textura.

## REFERÊNCIAS

- Abdala GC et al. (1998) Above and belowground organic matter and root:shoot ratio in a Cerrado in Central Brazil. **Braz J Ecol** 2:11–23.
- Akaike H (1973) Maximum likelihood identification of Gaussian autoregressive moving average models. **Biometrika** 60:255–265. <https://doi.org/10.1093/biomet/60.2.255>
- Alvares CA et al. (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol Z** 22:711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Alvarez F, Marimon-Junior BH, Marimon BS et al (2025) Tree species hyperdominance and rarity in the South American Cerrado. **Commun Biol** 8:695. <https://doi.org/10.1038/s42003-025-07623-w>
- Andrade LMR et al. (2011) Al-hyperaccumulator Vochysiaceae from the Brazilian Cerrado store aluminum in their chloroplasts without apparent damage. **Environ. Exp. Bot.** 70:37–42. [doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.013](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.013)
- Angiosperm Phylogeny Group et al. (2016) An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. **Bot J Linn Soc** 181:1–20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>
- Blake GR, Hartge KH (1986) Bulk density. In: Klute A (ed) *Methods of soil analysis: part 1*. ASA-SSSA, Madison, pp 363–375.
- Burnham KP, Anderson DR (2002) **Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach**. Springer, New York.
- Burt A, Calders K, Cuni-Sanchez A, Gómez-Dans J, Lewis P, Lewis SL, Malhi Y, Phillips OL, Disney, M (2020) Assessment of bias in pan-tropical biomass predictions. **Frontiers in Forests and Global Change** 3:1-12. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00012>
- Bustamante MDC et al. (2012) Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems. **Braz J Biol** 72:655–671. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400005>
- Canty A, Ripley B (2017) **Package 'boot'**. CRAN R Project.
- Cavanaugh JE, Neath AA (2019) The Akaike information criterion: background, derivation, properties, application, interpretation, and refinements. **Comput Stat** 11:2–11. <https://doi.org/10.1002/wics.1460>
- Chai T, Draxler RR (2014) Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? **Geosci Model Dev** 7:1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chave J et al. (2014) Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biol** 20:3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Efron B (1987) Better bootstrap confidence intervals. **J Am Stat Assoc** 82:171–185. <https://doi.org/10.1080/01621459.1987.10478410>
- Efron B, Tibshirani RJ (1993) **An introduction to the bootstrap**. Chapman & Hall, New York.
- FAO (2025) **Global forest resources assessment 2025**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Felfili JM, Carvalho FA, Haidar RF (2005) **Manual para o monitoramento de parcelas permanentes nos biomas Cerrado e Pantanal**. Universidade de Brasília, Brasília.
- Fox J, Weisberg S (2018) **An R companion to applied regression**. Sage, New York.

- Françoso RD, Haidar RF, Machado RB (2016) Tree species of South America central savanna: endemism, marginal areas and the relationship with other biomes. **Acta Bot Bras** 30:78–86. <https://doi.org/10.1590/0102-33062015abb0244>
- Galidaki G et al. (2017) Vegetation biomass estimation with remote sensing: focus on forest and other wooded land over the Mediterranean ecosystem. **Int J Remote Sens** 38:1940–1966. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1266113>
- Gatti RC et al. (2022) The number of tree species on Earth. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** 119:e2115329119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2115329119>
- Goodland RA, Ferri MG (1979) **Ecologia do Cerrado**. Itatiaia, Belo Horizonte.
- Haridasan M (1982) Aluminium accumulation by some Cerrado native species of central Brazil. **Plant Soil** 65:265–273. <https://doi.org/10.1007/BF02374657>
- Haridasan M (2008) Nutritional adaptations of native plants of the Cerrado biome in acid soils. **Braz J Plant Physiol** 20:183–195. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202008000300003>
- Haridasan M, Araújo GM (1988) Aluminium-accumulating species in two forest communities in the cerrado region of central Brazil. **For Ecol Manag** 24:15–26. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(88\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-1127(88)90021-7)
- Haridasan M, Paviani TI, Schiavini I (1986) Localization of aluminum in the leaves of some aluminum-accumulating species. **Plant Soil** 94:435–437. <https://doi.org/10.1007/BF02374336>
- Hastie T, Tibshirani R, Friedman J (2009) **The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction**, 2<sup>nd</sup> edn. Springer, New York.
- Higa RCV et al. (2014) **Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal** (Documentos, 266). Embrapa Florestas, Colombo.
- INMET (2023) **Normais climatológicas do Brasil: 1991–2020**. INMET, Brasília.
- James G et al. (2021) **An introduction to statistical learning: with applications in R**, 2<sup>nd</sup> edn. Springer, New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1418-1>
- Jones E, Harden S, Crawley MJ (2023) **The R book**. Wiley, New York.
- Klink CA et al. (2020) The role of vegetation on the dynamics of water and fire in the Cerrado ecosystems: Implications for management and conservation. **Plants** 9:1803. <https://doi.org/10.3390/plants9121803>
- Köhler M, Romeiro-Brito M, Telhe M (2024) The Cerrado through cacti. **Journal of Biogeography** 51:1827–1841. <https://doi.org/10.1111/jbi.14846>
- Ljung GM, Box GEP (1978) On a measure of lack of fit in time series models. **Biometrika** 65:297–303. <https://doi.org/10.1093/biomet/65.2.297>
- Lopes AS (1975) **A survey of the fertility status of soils under Cerrado vegetation in Brazil**. MSc Thesis, North Carolina State University, Raleigh.
- Luccas FS (2011) **Estoques de necromassa em um Cerrado stricto sensu e uma Floresta Ombrófila Densa Montana**. MSc thesis, Instituto de Botânica, São Paulo.
- Martins FB, Gonzaga G, Santos DF, Reboita MS (2018) Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. **Rev Bras Climatol** 1-28. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>

- McCormack ML, Dickie IA, Eissenstat DM et al (2015) Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. **New Phytol** 207:505–518. <https://doi.org/10.1111/nph.13363>
- Miranda SDC et al. (2014) Regional variations in biomass distribution in Brazilian savanna woodland. **Biotropica** 46:125–138. <https://doi.org/10.1111/btp.12095>
- Morais VA et al. (2014) Influence of diameter measuring height on the adjustment of volume and biomass equations of Cerrado in Minas Gerais. **Cienc Agrotec** 38:230–239. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000300002>
- Myers N et al. (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature** 403:853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Nam VT, Van Kuijk M, Anten NP (2016) Allometric equations for aboveground and belowground biomass estimations in an evergreen forest in Vietnam. **PloS one** 11:e0156827. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156827>
- Ngomanda A, Obiang NLE, Lebamba J et al. (2014) Site-specific versus pantropical allometric equations: which option to estimate the biomass of a moist central African forest? **Forest Ecology and Management** 312:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.10.029>
- Oliveira AP et al. (2019) **Avaliação de espécies do Cerrado quanto à tolerância ao alumínio**. Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, Brasília.
- Oliveira CP et al. (2019) Estimation of the aboveground biomass and carbon stocks in open Brazilian Savannah developed on sandy soils. **Carbon Balance Manag** 14:5. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0121-0>
- Palace M, Keller M, Hurtt G, Frohling S (2012) A Review of Above Ground Necromass in Tropical Forests. In: Sudarshana P, Nageswara-Rao M, Soneji JR (eds) **Tropical Forests**, 1st edn. Rijeka, pp. 215–252
- Pardi R, Gargano ML, Lasorella C et al. (2025) Optimizing soil core fine root collection and characterization: significant time reduction with a sub-sampling approach. **Plant and Soil** 508:347–360. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06805-5>
- Péllico Netto S, Brena DA (1997) **Inventário florestal**. Editado pelos autores, Curitiba.
- R Core Team (2025) **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Resende MDV, Alves RS (2020) Linear, generalized, hierarchical, Bayesian and random regression mixed models in genetics/genomics in plant breeding. **Funct Plant Breed J** 2:1–32. <http://159.89.122.252/fpbj/index.php/fpbj/article/view/76>
- Rezende AV et al. (2006) Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado *stricto sensu* em Brasília, DF. **Sci For** 71:65–76.
- Ribeiro FC, Torres CMME, Vale EMG, Darr D, Scariot A, Sevilha AC, Kerkoff LA (2025) Understanding factors impacting adoption and use of silvopastoral systems with native trees in the Cerrado: evidence from the northern of Minas Gerais, Brazil. **Trees, Forests and People** 101040. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.101040>
- Ribeiro JF, Silva JCS, Azevedo LG (1982) Estrutura e composição florística em tipos fisionômicos dos Cerrados e sua interação com alguns parâmetros do solo. In: **Congresso Nacional de Botânica**, 32, Teresina. Anais. Sociedade Botânica do Brasil, Teresina, pp 141–156.

Ribeiro JF, Walter BMT (2008) As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: Sano SM, Almeida SP, Ribeiro JF (eds) **Cerrado: ecologia e flora**, vol 1. Embrapa Cerrados, Planaltina, pp 151–212.

Ribeiro SC et al. (2011) Above- and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. **For Ecol Manag** 262:491–499. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.017>

Ripley B et al. (2013) **Package ‘mass’**. CRAN R, 538:113–120.

Roitman I et al. (2018) Optimizing biomass estimates of savanna woodland at different spatial scales in the Brazilian Cerrado: Re-evaluating allometric equations and environmental influences. **PLoS One** 13:e0196742. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196742>

Ruggiero PGC, Batalha MA, Pivello VR et al. (2002) Soil-vegetation relationships in cerrado (Brazilian savanna) and semideciduous forest, Southeastern Brazil. **Plant Ecology** 160:1–16. <https://doi.org/10.1023/A:1015819219386>

Sanquetta CR et al. (2015) Simultaneous estimation as alternative to independent modeling of tree biomass. **Ann For Sci** 72:1099–1112. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0497-2>

Scolforo JR, Oliveira AD, Acerbi Júnior FW (2008) **Equações de Volume, Peso de Matéria Seca e Carbono para Diferentes Fitofisionomias da Flora Nativa**. Lavras: UFLA. 216p.

Serviço Florestal Brasileiro (SFB) (2019) **Manual de campo: procedimentos para coleta de dados biofísicos e socioambientais**. SFB, Brasília.

Serviço Florestal Brasileiro (SFB) (2021) **Manual de campo: procedimentos para coleta de dados biofísicos e socioambientais**. SFB, Brasília.

Shapiro SS, Wilk MB (1965) An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika** 52:591–611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>

Sileshi GW (2014) A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. **Forest Ecology and Management** 329:237-254. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.026>

Simon MF et al. (2009) Recent assembly of the cerrado, a neotropical plant diversity hotspot, by in situ evolution of adaptations to fire. **Proc Natl Acad Sci USA** 106:20359–20364. <https://doi.org/10.1073/pnas.0903410106>

Sprugel DG (1983) Correcting for bias in log-transformed allometric equations. **Ecology** 64:209-210. <https://doi.org/10.2307/1937343>

Sullivan MJ, Lewis SL, Hubau W et al. (2018) Field methods for sampling tree height for tropical forest biomass estimation. **Methods in ecology and evolution** 9:1179-1189. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12962>

Sullivan MJP, Phillips OL, Galbraith D. et al. (2025) Variation in wood density across South American tropical forests. **Nat Commun** 16:2351. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56175-4>

Taylor D, Kent M, Coker P (1993) Vegetation description and analysis: a practical approach. **Geogr J** 159:237. <https://doi.org/10.2307/3451427>

Tedesco MJ et al. (1995) **Análise de solo, plantas e outros materiais**. UFRGS, Porto Alegre (Boletim técnico 5).

Torres CMME et al. (2013) Quantificação de biomassa e estocagem de carbono em uma floresta estacional semidecidual. **Rev Árvore** 37:647–655. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000400008>

Vale AT, Brasil MAM, Leão AL (2002) Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal** 12:71–80. <https://doi.org/10.5902/198050981702>

Van Wagner CE (1982) **Practical aspects of the line intersect method**. Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experiment Station, Chalk River, Ontario

Yang M et al. (2022) A review of general methods for quantifying and estimating urban trees and biomass. **Forests** 13:616. <https://doi.org/10.3390/f13040616>