

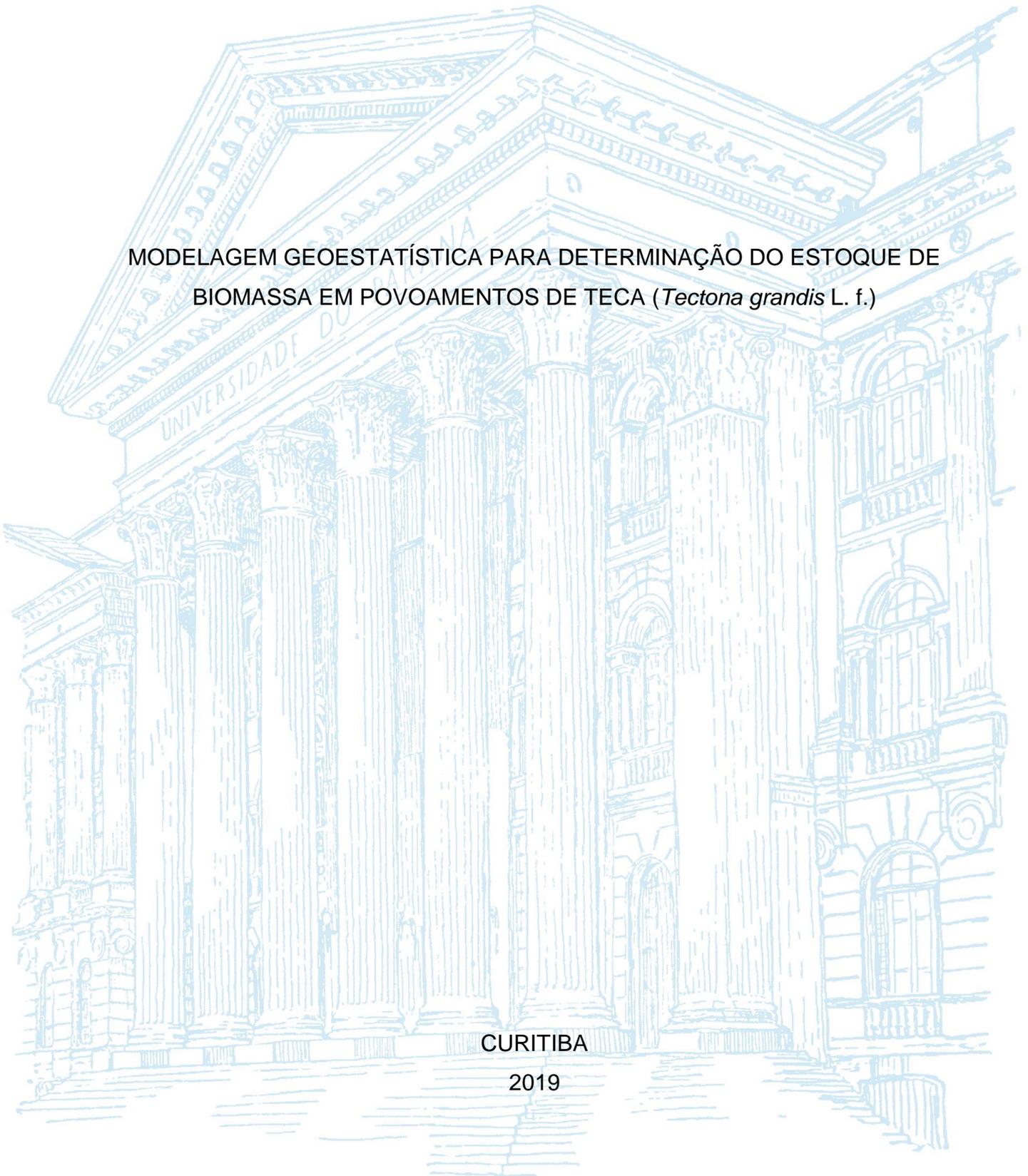
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KAROLINE ZANONA

MODELAGEM GEOESTATÍSTICA PARA DETERMINAÇÃO DO ESTOQUE DE
BIOMASSA EM POVOAMENTOS DE TECA (*Tectona grandis* L. f.)

CURITIBA

2019



KAROLINE ZANONA

MODELAGEM GEOESTATÍSTICA PARA DETERMINAÇÃO DO ESTOQUE DE
BIOMASSA EM POVOAMENTOS DE TECA (*Tectona grandis* L. f.)

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari

CURITIBA

2019

RESUMO

A Teca, ao longo dos anos, vem apresentando considerável desenvolvimento em plantios no Brasil, com um mercado consolidado de madeiras de alto valor econômico. Pela característica do manejo utilizado para conduzir os plantios de Teca, marcado pela ocorrência de muitos desbastes, a biomassa oriunda dos desbastes vem demonstrando destaque nos estudos. A necessidade de estimativas mais precisas das variáveis dendrométricas, como a biomassa, coloca em destaque ferramentas como a geoestatística, que vem sendo amplamente difundida na área florestal. Desta forma, este trabalho objetiva aplicar análises geoestatísticas para estimar e mapear a variabilidade espacial da produção de biomassa em um povoamento de Teca no estado de Mato Grosso. Em uma área de 213 hectares, com 46 parcelas permanentes, foram estimados os estoques de biomassa aérea e radicular dos dois aos doze anos de idade. Prosseguiu-se com a análise exploratória dos dados para posterior modelagem geoestatística, com o cálculo das semivariâncias, e interpolação e espacialização dos estoques de biomassa com a krigagem ordinária pontual. Baseando-se no maior coeficiente de determinação (R^2) e na menor soma dos quadrados dos desvios (SQD), foi selecionado o melhor ajuste. O modelo exponencial foi o mais eficiente para modelar a variabilidade espacial em ambos os estoques, evidenciando que a distribuição espacial dessas variáveis é heterogênea e dinâmica ao longo do tempo. O estoque de biomassa aérea oscilou de $7,96 \text{ t.ha}^{-1}$ no segundo ano a $116,13 \text{ t.ha}^{-1}$ no décimo segundo ano. Por outro lado, a biomassa radicular apresentou média de $1,37 \text{ t.ha}^{-1}$ no segundo ano e $15,48 \text{ t.ha}^{-1}$ no décimo segundo. A análise geoestatística proporcionou mensurar e identificar os diferentes padrões e as dinâmicas espaciais do estoque de biomassa aérea e radicular com precisão estatística.

Palavras-chave: Desbastes. Estatística espacial. Krigagem ordinária pontual. Manejo Florestal.

ABSTRACT

Teak, over the years, has been presenting considerable development in plantations in Brazil, with a consolidated market of timber of high economic value. Due to the characteristic of the management used to conduct Teak plantations, marked by the occurrence of many thinning, the biomass originated from thinning has been showing prominence in the studies. The need for more precise estimates of dendrometric variables, such as biomass, highlights tools as geostatistics, which has been widely diffused in the forest area. In this way, this work aims to apply geostatistical analyzes to estimate and map the spatial variability of biomass production in a Teak settlement in the state of Mato Grosso. In an area of 213 hectares, with 46 permanent plots, the above ground and below ground biomass stocks were estimated from two to twelve years of age. We proceeded with the exploratory analysis of the data for later geostatistical modeling, with the calculation of the semivariance, interpolation and spatialization of the biomass stocks with the ordinary kriging. Based on the highest coefficient of determination (R^2) and the smallest sum of the squares of the deviations (SQD), the best fit was selected. The exponential model was the most efficient to model the spatial variability in both stocks, evidencing that the spatial distribution of these variables is heterogeneous and dynamic over time. The above ground biomass stock ranged from 7.96 t.ha^{-1} in the second year to 116.13 t.ha^{-1} in the twelfth year. On the other hand, below ground biomass presented a mean of 1.37 t.ha^{-1} in the second year and 15.48 t.ha^{-1} in the twelfth year. The geostatistical analysis allowed to measure and to identify the different patterns and the spatial dynamics of the stock of above ground and below ground biomass with statistical precision.

Keywords: Forest Management. Thinning. Ordinary punctual kriging. Spatial statistics.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PRINCIPAIS ESTRUTURAS DO SEMIVARIOGRAMA.....	15
FIGURA 2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.	18
FIGURA 3 – SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA ESTOQUE DE BIOMASSA AÉREA EM POVOAMENTO DE TECA DO 2° AO 12° ANO.	25
FIGURA 4 – SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA ESTOQUE DE BIOMASSA RADICULAR EM POVOAMENTO DE TECA DO 2° AO 12° ANO.	27
FIGURA 5 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ESTOQUE DE BIOMASSA AÉREA EM POVOAMENTO DE TECA DO 2° AO 12° ANO.....	28
FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ESTOQUE DE BIOMASSA RADICULAR EM POVOAMENTO DE TECA DO 2° AO 12° ANO.....	30

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MODELOS TEÓRICOS DOS SEMIVARIOGRAMAS.....	16
TABELA 2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS ESTOQUES DE BIOMASSA AÉREA E RADICULAR.	21
TABELA 3 – PARÂMETROS DOS SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA OS ESTOQUES DE BIOMASSA AÉREA E RADICULAR DO SEGUNDO AO DÉCIMO SEGUNDO ANO DE IDADE.....	23

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 TECA (<i>TECTONA GRANDIS</i> L. F.).....	10
2.2 BIOMASSA FLORESTAL.....	11
2.3 GEOESTATÍSTICA	12
2.3.1 Hipóteses restritivas	13
2.3.2 Semivariograma	14
2.3.3 Krigagem.....	16
3 MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 MANEJO REALIZADO NO POVOAMENTO	19
3.2 COLETA DOS DADOS.....	19
3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1 ESTIMATIVAS DOS ESTOQUES DE BIOMASSA AÉREA E RADICULAR	21
4.2 MODELAGEM GEOESTATÍSTICA DOS ESTOQUES DE BIOMASSA AÉREA E RADICULAR.....	23
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
REFERÊNCIAS.....	34

1 INTRODUÇÃO

A Teca (*Tectona grandis* L. f.) é uma espécie nativa do continente asiático, principalmente das regiões Sul e Sudeste, ocorrendo na Índia, Mianmar, Tailândia, Laos, Burma, Indonésia e Sri Lanka. (KAOSA-ARD, 1989; PANDEY; BROWN, 2000; RONDON, 2006). No Brasil, seus plantios apresentam considerável desenvolvimento, sendo que em 2016 atingiram 87.502 ha (IBÁ, 2017). Além disso, é uma espécie que apresenta um mercado bem consolidado de madeiras com alto valor econômico, utilizadas em móveis de luxo e na construção naval (LAMPRECHT, 1990; FIGUEREDO *et al.*, 2005; PELISSARI, 2012).

Pela característica do manejo utilizado para conduzir os plantios de Teca, marcado pela ocorrência de muitos desbastes, a biomassa oriunda dos desbastes vem demonstrando grande destaque nos estudos, uma vez que tem sido um dos principais destinos dessa madeira, especialmente os primeiros desbastes (GONZÁLEZ, 2004; PELISSARI *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2015).

A biomassa vegetal proveniente das florestas plantadas possui um importante papel, uma vez que serve como fonte energética racional e ainda acumula poluentes nocivos em sua estrutura carbônica, o que a torna potencial no mercado de sequestro de carbono. Os plantios florestais no Brasil possuem grande representatividade na mitigação das alterações climáticas, sendo uma alternativa para diminuir os efeitos das mudanças do clima e da degradação do ambiente (SANQUETTA *et al.*, 2018). Também se destacam no setor energético, seja nos segmentos de carvão vegetal, lenha e cavaco, tornando-se ainda fonte de renda secundária para os empreendimentos (SANQUETTA *et al.*, 2002). A modelagem geoestatística tem sido amplamente utilizada no setor florestal, especialmente nas áreas de inventário, manejo florestal e avaliação dos atributos do solo. Apresenta-se com uma importante ferramenta para melhorar a precisão das estimativas, redução de custos e determinação da variabilidade espacial de variáveis dendrométricas e edáficas (MELLO, 2004; ORTIZ, 2006; RUFINO *et al.*, 2006; BOGNOLA *et al.*, 2011; GUEDES *et al.*, 2012; LEAL *et al.*, 2014; PELISSARI *et al.*, 2014; CARVALHO *et al.*, 2015; REIS *et al.*, 2016).

Com a possibilidade de comercializar produtos de alto valor agregado e também secundários, como a biomassa, que incrementam a renda dos plantios de Teca, além da possibilidade de participação no mercado de sequestro de carbono,

faz-se necessário obter informações sobre a quantidade e o armazenamento de biomassa, servindo de subsídio ao manejo florestal da espécie, principalmente para práticas silviculturais direcionadas no espaço.

Com base no exposto acima, o estudo objetiva aplicar análises geoestatísticas para estimar e mapear a variabilidade espacial da produção de biomassa em um povoamento de Teca no estado do Mato Grosso.

Como objetivos específicos: 1) Quantificar as biomassas aérea e radicular do povoamento por meio de equações de regressão; e 2) Aplicar a geoestatística para avaliar a dinâmica dos padrões espaciais dos estoques de biomassa ao longo do período de condução do povoamento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 TECA (*Tectona grandis* L. f.)

Tectona grandis é uma espécie conhecida pela sua madeira de alta qualidade, por sua resistência, dureza e coloração muito apreciada em móveis de luxo e no mercado de construção naval. É considerada uma madeira nobre podendo substituir espécies como o Mogno (*Swietenia macrophylla* King) e outras de alto valor agregado (PANDEY; BROWN, 2000; GARCIA, 2006; PELISSARI, 2015).

Nativa do continente asiático, a Teca teve seus plantios difundidos pela África e Américas Central e Sul, onde se consolidou no mercado de madeiras tropicais. Seu cultivo tem maior crescimento e produção na região dos trópicos, uma vez que a precipitação, temperatura e umidade relativa do ar podem ser determinantes para altas taxas de crescimento (PANDEY; BROWN, 2000; PELISSARI, 2015).

Precipitações anuais de 1.250 a 3.750 mm, temperaturas mínimas de 13° a 17°C e máximas de 39° a 43°C são condições ideais para o melhor crescimento da espécie (KAOSA-ARD, 1998; PANDEY; BROWN, 2000). No Brasil, a Teca é cultivada em locais com precipitações anuais altas e com alguns meses de período seco. Dessa forma, seu maior cultivo concentra-se no estado do Mato Grosso, em regiões onde a precipitação anual vai de 1.500 a 2.750 mm e temperaturas máximas de 35° a 40°C (BEHLING, 2009; PELISSARI, 2015).

A espécie apresenta tratamentos silviculturais indispensáveis para maiores produtividades, como desramas e desbastes, sendo que a aplicação desses tratamentos logo nos estágios iniciais proporciona melhor desenvolvimento na forma do tronco, obtenção de diâmetros e alturas desejadas e fustes livres de nós (GARCIA, 2006; PELISSARI, 2015; BASSO, 2016). A desrama é necessária logo no segundo ano do plantio, sendo recomendado que, a partir do terceiro ano, ela seja executada cinco vezes ao longo do ciclo, com intervalos de dois ou três anos (FIGUEIREDO *et al.*, 2005).

A densidade inicial dos povoamentos geralmente é de 1.000 a 2.000 mudas por hectare, sendo o primeiro desbaste comum na intensidade de 40 a 60%, obtendo ao final do ciclo 200 a 300 árvores por hectare (PANDEY; BROWN, 2000). No Brasil, com um ciclo de 20 a 25 anos, planta-se geralmente 1.667 árvores por hectare e realizam-se desbastes nas idades de 5, 10, 15 e 20 anos. Resultando em um número

próximo de 250 árvores por hectare ao final do ciclo e uma produtividade média em sítios bons de $15 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ (GARCIA, 2006; BEZERRA, 2009).

2.2 BIOMASSA FLORESTAL

Entende-se por biomassa toda massa de origem biológica, vegetal ou animal, viva ou morta, ao passo que a biomassa florestal refere-se à massa vegetal presente nas florestas ou ainda na porção arbórea (SANQUETTA *et al.*, 2002). A biomassa florestal tem sido estudada com diferentes propósitos: para fins energéticos, avaliação da ciclagem de nutrientes e do crescimento das florestas, além do importante papel que as florestas exercem com relação ao sequestro de carbono (SANQUETTA *et al.*, 2014a).

O estudo da biomassa florestal é imprescindível na tomada de decisão no manejo dos recursos florestais (PÁSCOA¹ *et al.*, 2004 citado por RATCHNE *et al.*, 2016). Brown (1997) afirma que a quantificação da biomassa é relevante, dado que é consequência direta de fatores bióticos e abióticos em um ecossistema florestal.

A biomassa é determinada por métodos diretos e indiretos. De forma direta com a derrubada de uma ou mais árvores e com a compartimentação do tronco, galhos, folhas e raízes, é quantificada a relação entre a massa verde e seca (SILVEIRA *et al.*, 2008). Esse método torna-se inviável para aplicação em extensas áreas, devido ao custo e tempo despendido na execução (MARTINS *et al.*, 2017).

Os métodos indiretos normalmente ocorrem com a aplicação de equações com a entrada de variáveis como diâmetro, altura e volume (SOMOGYI² *et al.*, 2006 citado por SILVEIRA *et al.*, 2008). Os métodos indiretos são os mais usuais, uma vez que são mais fáceis e rápidos, porém existe uma grande necessidade em obter uma estimativa acurada e válida da biomassa florestal para total entendimento das interações e relações dessa variável com a floresta (SANQUETTA *et al.*, 2014b).

Com relação à biomassa de Teca, alguns estudos apontam que a espécie apresenta madeira potencial para queima, principalmente oriunda de desbastes,

¹ PÁSCOA F, MARTINS F, GONZÁLES RS, JOÃO C. Estabelecimento simultâneo de equações de biomassa para o pinheiro bravo. In: **Anais** do 2º Simpósio Iberoamericano de Gestión y Economía Forestal; 2004; Barcelona. Barcelona: Centre Tecnològic Forestal de Catalunya; 2004.

² SOMOGYI, Z. *et al.* Indirect methods of large forest biomass estimation. **Europe Journal Forest Research**, [S.l.], 2006.

podendo ser utilizada como fonte de energia (OLIVEIRA; PACHECO; VITAL, 2013; SILVA *et al.*, 2015). Além disso, pode ser destinada ao mercado de sequestro de carbono.

2.3 GEOESTATÍSTICA

Foram os estudos do sul-africano Daniel Krige em uma mina na África do Sul, na década de 1950, que possibilitaram a utilização da geoestatística como instrumento avaliativo de jazidas minerais. Em suas conclusões, Krige considerou que as distâncias dos pontos amostrais em campo ajudariam na interpretação das variações espaciais de suas variáveis (ANDRIOTTI, 2003; PELISSARI, 2015). Com base nos estudos de Krige, François Paul Marie Matheron desenvolveu a Teoria das Variáveis Regionalizadas, introduzindo o termo geoestatística e a função de semivariograma (ANDRIOTTI, 2003).

A presença de dependência espacial requer a utilização da geoestatística, que tem como principal objetivo a caracterização espacial de uma variável de interesse a partir da análise da sua distribuição e variabilidade espaciais, com determinação das incertezas associadas (VIEIRA, 2000; ANDRIOTTI, 2003; YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Ela trata as variáveis como regionalizadas, sendo considerada uma prática da Teoria das Variáveis Regionalizadas (ANDRIOTTI, 2003).

Essa Teoria é definida como uma função espacial numérica no espaço e baseia-se em variáveis aleatórias considerando os aspectos espaciais, ou seja, sua estrutura no espaço (CARVALHO; VIEIRA, 2001; ANDRIOTTI, 2003; PELISSARI, 2015). Andriotti (2003) afirma que a definição de uma variável regionalizada é descritiva, não envolvendo interpretações probabilísticas e também pode ser caracterizada por qualquer variável dependente do espaço que tenha caráter aleatório e estrutural.

As principais vantagens da geoestatística são: estudo da variabilidade espacial; determinação da anisotropia, com a análise do comportamento da variabilidade em diferentes direções; predição de valores em locais não amostrados com a krigagem; e a determinação das incertezas associadas à predição (VIEIRA, 2000; ANDRIOTTI, 2003; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Com base em uma amostragem dos valores do fenômeno espacial, é possível fazer inferência sobre a continuidade da dependência espacial, em que a estimativa

das características do fenômeno espacial baseado nos pontos amostrados é denominada de interpolação, podendo ser executada por diferentes metodologias, como pela krigagem ordinária (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

2.3.1 Hipóteses restritivas

Toda a fundamentação da geoestatística é baseada em funções e variáveis aleatórias, em que um conjunto infinito de variáveis aleatórias forma uma função aleatória. Uma variável aleatória pode assumir uma quantidade de valores medidos $[z(x_i), i = 1, n]$, onde cada $[z(x_i)]$ é associado a uma probabilidade e x_i representa as coordenadas $(x_i$ e $y_i)$ (VIEIRA, 2000; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Como a função aleatória é contínua, espera-se que com pontos discretos em uma única amostragem as hipóteses sejam satisfeitas. Porém, considerando que a função aleatória é obtida por apenas uma amostragem, é necessário restringir a variável regionalizada como estacionária para se estimar valores em locais não amostrados (VIEIRA, 2000; PELISSARI, 2015).

A função aleatória pode ser definida como a função que a lei de distribuição de probabilidades é invariante por translação, isto é, os fatores controladores da função não se alteram, agem da mesma forma em toda a área estudada (ANDRIOTTI, 2003). Vieira (2000) reitera que a variável regionalizada é estacionária se os momentos estatísticos da variável aleatória $Z(x_i+h)$ forem iguais para qualquer vetor de distância h , dependendo do número de momentos estatísticos (k) que são constantes a variável é chamada de estacionária de ordem k . Na geoestatística, a estacionariedade de 2° ordem é a requerida e, assim, a função aleatória será estacionária de 2° ordem quando:

$$m = E[Z(x)] \quad \text{Média} \quad (1)$$

$$\sigma^2[Z(x)] = E\{[Z(x) - m]^2\} = C(0) \quad \text{Variância} \quad (2)$$

$$C(h) = E\{[Z(x+h) - m][Z(x) - m]\} \quad \text{Covariância} \quad (3)$$

$$C(0) - C(h) = \gamma(h) = \frac{1}{2}E\{Z(x+h) - Z(x)\}^2 \quad \text{Função semivariograma} \quad (4)$$

A hipótese de estacionariedade de 2° ordem define que a correlação entre duas variáveis aleatórias depende somente da distância espacial h sendo independente da sua localização. A covariância $C(h)$ expressa a relação entre valores

da mesma variável distantes por uma distância h em uma determinada direção (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Caso a covariância não exista e a variável tenha capacidade infinita de dispersão a hipótese de estacionariedade de 2° ordem é substituída pela hipótese intrínseca. Nessa hipótese, para todo vetor h , o acréscimo de $[Z(x+h) - Z(x)]$ resulta em variância finita e dependente de h (ANDRIOTTI, 2003). Assim, as seguintes relações são geradas:

$$m = E[Z(x) - Z(x+h)] \quad \text{Média} \quad (5)$$

$$\sigma^2[Z(x+h) - Z(x)] = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \quad \text{Variância} \quad (6)$$

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \quad \text{Função variograma} \quad (7)$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \quad \text{Função semivariograma} \quad (8)$$

Os semivariogramas de funções aleatórias de 2° ordem têm alcance finito e limitado a certa distância h (modelos esféricos, gaussiano, exponencial, entre outros); enquanto os semivariogramas da hipótese intrínseca são não limitados (modelos de De Wijis e lineares) (ANDRIOTTI, 2003; PELISSARI, 2015).

2.3.2 Semivariograma

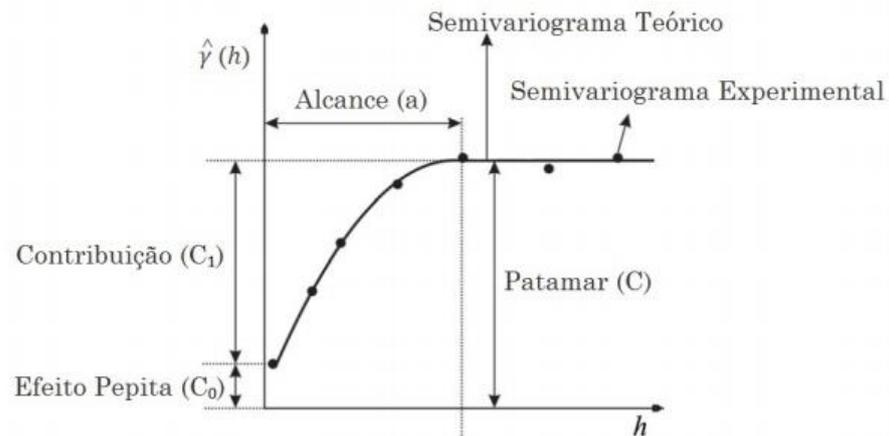
Na literatura, ainda há certa confusão quanto à diferenciação entre o termo semivariograma e variograma. Muitos autores utilizam ambos os termos como sinônimos, mas são distintos uma vez que o variograma $[2\gamma(h)]$ é o dobro do semivariograma $[\gamma(h)]$ (ANDRIOTTI, 2003; YAMAMOTO; LANDIM, 2013; PELISSARI, 2015). O semivariograma expressa a estrutura do fenômeno em análise, a partir da covariância entre as amostras espaçadas em sucessivos valores de h (ANDRIOTTI, 2003). É utilizado na análise da estrutura espacial do fenômeno, com a construção de semivariogramas experimentais (9) e a modelagem da estrutura espacial com o ajuste de semivariogramas teóricos:

$$\gamma(h) = \left[\frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} \{[Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2\} \right] \quad (9)$$

Em que: $\gamma(h)$ = semivariância da variável $Z(x_i)$; h = distância; e $N(h)$ = número de pares de pontos medidos $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$, separados por uma distância h .

Os principais componentes de um semivariograma teórico são (Figura 1): alcance (A), que representa a distância onde o semivariograma atinge o patamar, podendo ser entendido também como o grau de homogeneização entre as amostras, de forma que quanto maior seu valor mais homogêneo é o fenômeno analisado; patamar ($C_0 + C$), correspondente ao valor da variância *a priori* dos dados, sendo o ponto onde se estabiliza o semivariograma; variância espacial ou contribuição (C), representada pela diferença entre o patamar e o efeito pepita (C_0); e efeito pepita, expresso pelo valor da semivariância para distância zero, que indica a descontinuidade do semivariograma em distâncias menores do que a menor distância amostrada e sem correlação espacial (VIEIRA, 2000; ANDRIOTTI, 2003; WEBSTER; OLIVER, 2007; YAMAMOTO; LANDIM, 2013; PELISSARI, 2015).

FIGURA 1 – PRINCIPAIS ESTRUTURAS DO SEMIVARIOGRAMA.



FONTE: TEIXEIRA; SCALON (2013).

Os principais modelos dos semivariogramas teóricos são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 – MODELOS TEÓRICOS DOS SEMIVARIOGRAMAS.

Modelo	Equação
Esférico	$y(h) = C_0 + C \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } h < a$ $y(h) = C_0 + C \text{ para } h \geq a$
Exponencial	$y(h) = C_0 + C \left[1 - \text{EXP} \left(-\frac{h}{a} \right) \right]$
Gaussiano	$y(h) = C_0 + C \left[1 - \text{EXP} \left(-\frac{h}{a} \right)^2 \right]$
Cúbico	$y(h) = C_0 + C \left[7 \left(\frac{h}{a} \right)^2 - \frac{35}{4} \left(\frac{h}{a} \right)^3 + \frac{7}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^5 - \frac{3}{4} \left(\frac{h}{a} \right)^7 \right] \text{ para } h < a$ $y(h) = C_0 + C \text{ para } h \geq a$
Pentaesférico	$y(h) = C_0 + C \left[\frac{15}{8} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{5}{4} \left(\frac{h}{a} \right)^3 + \frac{3}{8} \left(\frac{h}{a} \right)^5 \right] \text{ para } h < a$ $y(h) = C_0 + C \text{ para } h \geq a$
Efeito furo	$y(h) = C_0 + C \left[1 - \frac{\left(\text{sen } \pi \left(\frac{h}{a} \right) \right)}{\pi \left(\frac{h}{a} \right)} \right]$

FONTE: Adaptado de Yamamoto e Landim (2013).

Sempre que possível, é importante calcular os semivariogramas experimentais em várias direções. Geralmente, se calcula em quatro: 0°, 45°, 90° e 135°, o que possibilita identificar anisotropias (ANDRIOTTI, 2003). Um fenômeno espacial apresenta anisotropia quando a função semivariograma muda com a direção. Quando isso não ocorre diz-se que o fenômeno é isotrópico (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

2.3.3 Krigagem

A partir do semivariograma, e havendo dependência espacial entre as amostras, parte-se para o método de interpolação, também chamado de krigagem, que pode ser definido como um processo geoestatístico que estima valores de variáveis distribuídas no espaço ou no tempo, baseando-se em valores secundários e interdependentes, por meio de médias ponderadas ou móveis (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). A krigagem considera o número de amostras utilizadas e a posição delas, as distâncias entre elas e a zona a ser estimada, além da continuidade espacial da variável estudada. A principal característica do método é gerar estimativas não

tendenciosas e com mínima variância em relação ao valor estimado (ANDRIOTTI, 2003; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Entre os métodos mais utilizados, a krigagem ordinária é a mais usual, pois não exige conhecimento da média de uma determinada área, podendo ser estimada em qualquer lugar, salvo em locais que se dispõem de observações de campo, em que a krigagem reproduz o valor medido (ANDRIOTTI, 2003; YAMAMOTO; LANDIM, 2013; PELISSARI, 2015).

O estimador da krigagem ordinária é representado por (10):

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (10)$$

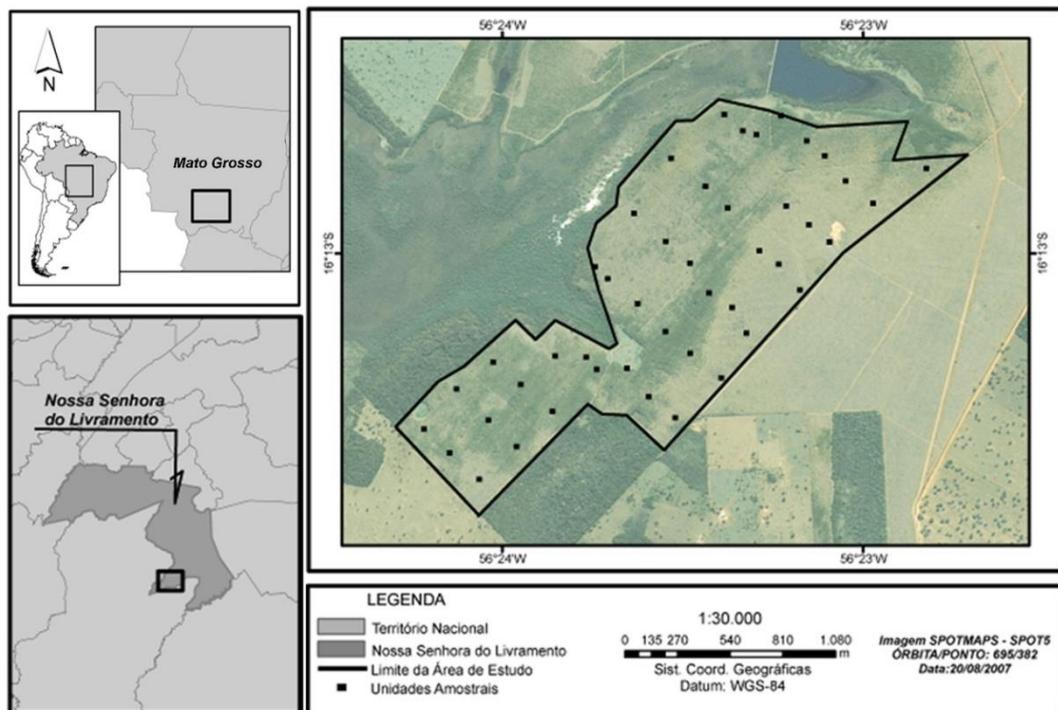
Em que: $Z(x_0)$ = valor estimado para local não amostrado; n = número de valores medidos; λ_i = peso associado ao valor medido na posição; e $Z(x_i)$ = valor obtido por amostragem no campo.

O processo que intercede a krigagem é a validação cruzada. Esse processo, a partir do semivariograma ajustado, estima o valor de cada unidade amostrada e relaciona os valores observados com os estimados, obtendo-se uma equação de reta. Essa técnica possibilita avaliar as incertezas por meio do erro e checar as suposições sobre o modelo utilizado na krigagem (ANDRIOTTI, 2003; PELISSARI, 2015). O ajuste ideal é aquele em que o coeficiente linear da reta é igual a zero, o coeficiente angular é igual a um e o coeficiente de determinação é, também, igual a um (VIEIRA, 2000; PELISSARI, 2015).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em um povoamento de Teca localizado na Fazenda Campina, sendo a empresa Teca do Brasil Ltda. detentora dos plantios localizados no município de Nossa Senhora do Livramento, no estado do Mato Grosso, a 73 km ao Sudoeste da capital Cuiabá, sob as coordenadas 16°12'19" S e 56°23'00" W. Os dados foram obtidos em um povoamento equiâneo e homogêneo com 213 ha implantados no ano de 1999.

FIGURA 2 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.



FONTE: PELISSARI (2012).

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é Aw, caracterizado pelo inverno seco, temperaturas médias de 24°C a 26°C e precipitações médias de 1.300 a 1.600 mm. ano⁻¹ (ALVARES *et al.*, 2013). O relevo é suavemente ondulado e o solo é classificado como Planossolo Háplico Eutrófico (SANTOS *et al.*, 2018).

3.1 MANEJO REALIZADO NO POVOAMENTO

O espaçamento utilizado no povoamento foi de 3 m x 3 m. Para o plantio, o terreno foi preparado com subsolador e não houve adubação de arranque, apenas aplicação de calcário na quantidade de 0,8 a 3,7 t.ha⁻¹, 60 kg. t.ha⁻¹ de fosfato e 100 a 150 kg. t.ha⁻¹ de cloreto de potássio aos nove anos do povoamento.

As desramas ocorreram a partir do segundo ano, com a intensidade de 1/3 da altura total. No terceiro ano, a intensidade foi de 1/2, e no quarto ano, de 2/3. Nas idades posteriores, a manutenção da desrama aconteceu com a remoção de galhos até 7 m de altura. Os desbastes foram realizados nas idades de 5, 8 e 11 anos, com intensidades respectivamente de 40%, 33% e 33% do número de árvores por hectare (PELISSARI, 2012).

3.2 COLETA DOS DADOS

Para a coleta dos dados nos inventários contínuos, foram alocadas 46 parcelas permanentes com 450 m² (15 m x 30 m), com intensidade inicial de 50 árvores por parcela e intensidade de amostragem de uma parcela a cada quatro hectares. A variável coletada foi o diâmetro à altura do peito (DAP) a 1,3 m do solo do 2° ao 12° ano de idade (PELISSARI, 2012).

3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Primeiramente, estimou-se os estoques de biomassa aérea e radicular dos povoamentos de Teca com a utilização das equações (11) e (12) desenvolvidas por Kraenzel *et al.* (2001). Esse estudo foi realizado no Panamá e foram empregadas essas equações devido à ausência de modelos desenvolvidos para a espécie no Brasil.

$$\text{Log (Biomassa aérea)} = 2,575 * (\text{Log DAP}) - 1,042 \quad (11)$$

$$\text{Log (Biomassa raiz)} = 2,399 * (\text{Log DAP}) - 1,671 \quad (12)$$

Em que: Log = logaritmo na base 10; e DAP = diâmetro à altura do peito (cm).

Em seguida, fez-se a análise exploratória dos dados, por meio da análise estatística descritiva, determinando valores médios, mínimos e máximos, desvio padrão e coeficiente de variação. Também foi aplicado o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, ao nível de 5% de probabilidade.

Após a descrição dos dados, efetuou-se a modelagem geoestatística, com a utilização do *software* GS+ v.5.1.1, o qual possibilitou a realização das análises de semivariogramas e da krigagem, além da obtenção de mapas temáticos.

A modelagem geoestatística foi realizada com o cálculo das semivariâncias, avaliando a dispersão espacial em função das distâncias com a construção dos semivariogramas teóricos (exponencial, esférico, gaussiano e linear). O melhor ajuste foi determinado com relação ao maior coeficiente de determinação (R^2), desejando-se que fosse mais próximo de um, e no menor valor das somas dos quadrados dos desvios (SQD). A anisotropia foi avaliada com o cálculo dos semivariogramas nas direções 0° , 45° , 90° e 135° .

Com base nos parâmetros dos semivariogramas ajustados (efeito pepita, patamar e alcance), foi realizada a interpolação e a espacialização dos estoques de biomassa de Teca em cada ano com o método da krigagem ordinária.. Por fim, obtiveram-se mapas temáticos com quatro classes de estoque de biomassa de Teca em $t.ha^{-1}$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTIMATIVAS DOS ESTOQUES DE BIOMASSA AÉREA E RADICULAR

Na Tabela 2, constam os valores mínimos, médios e máximos dos estoques de biomassa aérea e radicular em t.ha⁻¹, bem como o desvio padrão, o coeficiente de variação e o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, ao nível de 5% de probabilidade.

TABELA 2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS ESTOQUES DE BIOMASSA AÉREA E RADICULAR.

Idade (ano)	Mínimo (t/ha)	Média (t/ha)	Máximo (t/ha)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)	Kolmogorov-Smirnov
Biomassa aérea						
2	2,55	7,96	14,93	3,15	39,59	0,0846 ^{NS}
3	17,73	32,98	47,43	8,03	24,33	0,1110 ^{NS}
4	36,55	63,03	84,36	12,68	20,12	0,1514 ^{NS}
5	44,70	90,02	116,60	17,70	19,67	0,1540 ^{NS}
Desbaste*	12,10	30,46	55,42	8,62	28,29	0,0698 ^{NS}
6	38,45	80,52	109,40	16,85	20,93	0,1408 ^{NS}
7	50,10	105,26	142,90	20,23	19,22	0,1487 ^{NS}
8	61,82	118,97	163,56	23,05	19,38	0,1154 ^{NS}
Desbaste*	11,23	27,89	50,65	9,48	34,00	0,1191 ^{NS}
9	46,48	104,49	137,76	20,70	19,81	0,0850 ^{NS}
10	54,98	119,11	160,52	23,31	19,57	0,1126 ^{NS}
11	59,93	135,50	184,36	26,96	19,90	0,1437 ^{NS}
Desbaste*	9,07	32,70	61,16	11,92	36,44	0,0690 ^{NS}
12	41,19	116,13	158,70	23,96	20,63	0,1132 ^{NS}
Biomassa radicular						
2	0,47	1,37	2,49	0,51	37,41	0,0767 ^{NS}
3	2,88	5,17	7,28	1,19	23,00	0,1017 ^{NS}
4	5,67	9,46	12,47	1,80	19,03	0,1521 ^{NS}
5	6,67	13,17	16,86	2,46	18,68	0,1434 ^{NS}
Desbaste*	1,75	4,49	8,11	1,24	27,53	0,0727 ^{NS}
6	5,61	11,53	15,59	2,32	20,14	0,1327 ^{NS}
7	7,19	14,79	19,99	2,74	18,54	0,1444 ^{NS}
8	8,77	16,57	22,66	3,09	18,68	0,1154 ^{NS}
Desbaste*	1,63	3,94	7,04	1,30	32,96	0,1174 ^{NS}
9	6,56	14,36	18,82	2,75	19,14	0,0851 ^{NS}
10	7,68	16,20	21,70	3,06	18,90	0,0907 ^{NS}
11	8,32	18,26	24,76	3,50	19,18	0,1257 ^{NS}
Desbaste*	1,29	4,43	8,29	1,56	35,19	0,0635 ^{NS}
12	5,54	15,48	21,07	3,09	19,95	0,1221 ^{NS}

Em que: NS = não significativo (há distribuição normal).

*Estoques de biomassa aérea e radicular removidos nos desbastes.

FONTE: O autor (2019).

O estoque de biomassa apresentou aumento à medida que a idade avançou. É perceptível que ocorreu diminuição nos anos de desbaste, reduzindo os estoques de biomassa radicular e aérea no ano subsequente à intervenção. O coeficiente de variação em ambos os estoques aéreo e radicular apresentou diminuição ao longo dos anos, salvo nos momentos de desbastes. Nessas ocasiões, houve aumento no coeficiente de variação, comprovando que a intervenção modifica a estrutura do povoamento (FINGER; SHNEIDER, 1999; GARCIA, 2006; ALVES, 2015). Todos os valores apresentaram distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, ao nível de 5% de probabilidade.

Percebe-se que os valores médios de estoque de biomassa aérea oscilaram de 7,96 t.ha⁻¹ no segundo ano a 116,13 t.ha⁻¹ no décimo segundo ano (Tabela 2). A biomassa radicular apresentou média de 1,37 t.ha⁻¹ no segundo ano a 15,48 t.ha⁻¹ no décimo segundo. Assim, conforme avançaram os anos, o incremento do estoque de biomassa tornou-se mais constante e lento, sendo acelerado após os momentos onde houve desbaste.

Mwangi (2015), na Tanzânia em um plantio de Teca, encontrou um estoque de biomassa total de 3,8 t.ha⁻¹ aos 2 anos e de 113,14.t.ha⁻¹ aos 5 anos, percebe-se que o estoque de biomassa de Teca encontrado no presente estudo é superior no 2º ano 9,33 t.ha⁻¹ e próximo no 5º ano 103,19 t.ha⁻¹. Karmacharya e Singh (1991), em um plantio na Índia, determinaram a biomassa aérea em 25 t.ha⁻¹ aos 4 anos, 39,9 t.ha⁻¹ aos 14 anos e 77 t.ha⁻¹ aos 30 anos, cuja diferença, quando comparado com o presente trabalho, ocorreu possivelmente pela diferença entre as capacidades produtivas dos sítios.

Valores próximos aos do presente estudo foram encontrados por Behling (2018) em plantios localizados em Tangará da Serra, estado do Mato Grosso, aos 7,5 anos de idade, em que o autor encontrou 100,28 t.ha⁻¹ para biomassa aérea e 22,06 t.ha⁻¹ de biomassa radicular. Isso demonstra que há semelhança na produtividade dos sítios entre os locais de estudo.

Basso (2016), em um estudo no Mato Grosso, determinou o estoque de biomassa aérea de Teca igual a 2,32 t.ha⁻¹ em um povoamento com 2 anos e 3 meses, cujo valor foi inferior ao encontrado no presente estudo. Isso pode ser explicado pela diferença na densidade (árvores/ha) do povoamento, uma vez que se trata de um sistema silvipastoril. Ademais, valor inferior também foi encontrado no estudo desenvolvido por Rondon (2006), o qual obteve estoque de biomassa aérea de 54,45 t.ha⁻¹ em um

experimento aos sete anos e no espaçamento 3 m x 3 m, cujo resultado está relacionado com as diferenças no manejo do povoamento, como a ausência de desbaste.

4.2 MODELAGEM GEOESTATÍSTICA DOS ESTOQUES DE BIOMASSA AÉREA E RADICULAR

Os ajustes dos semivariogramas e seus respectivos parâmetros são apresentados na Tabela 3. Assim, foi possível verificar a presença de dependência espacial em todos os anos de avaliação, permitindo a aplicação da modelagem geoestatística.

TABELA 3 – PARÂMETROS DOS SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA OS ESTOQUES DE BIOMASSA AÉREA E RADICULAR DO SEGUNDO AO DÉCIMO SEGUNDO ANO DE IDADE.

Idade (ano)	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A (m)	GD (%)	R ²	SQD
Biomassa aérea							
2	Esférico	4,48	12,45	1.365	64,00	0,928	3,4
3	Esférico	30,60	65,59	383	53,30	0,638	119,0
4	Exponencial	39,00	172,40	675	77,40	0,939	276,0
5	Exponencial	97,20	343,40	972	71,70	0,916	2.006,0
6	Exponencial	10,90	301,20	747	96,40	0,903	3.005,0
7	Exponencial	2,00	456,20	963	99,60	0,910	7.120,0
8	Exponencial	1,00	604,40	1.116	99,80	0,934	11.219,0
9	Exponencial	1,00	469,90	750	99,80	0,918	6.120,0
10	Exponencial	13,00	602,90	843	97,80	0,930	9.394,0
11	Exponencial	1,00	817,10	855	99,90	0,908	26.074,0
12	Exponencial	1,00	606,10	716	99,80	0,951	4.846,0
Biomassa radicular							
2	Esférico	0,11	0,31	1.202	63,90	0,902	4,04×10 ⁻³
3	Esférico	0,70	1,45	300	51,70	0,694	0,064
4	Exponencial	0,73	3,45	630	78,80	0,938	0,107
5	Exponencial	1,93	6,61	939	70,80	0,905	0,812
6	Exponencial	0,51	5,72	792	91,10	0,898	1,180
7	Exponencial	0,01	7,93	837	99,90	0,919	1,750
8	Exponencial	1,37	12,21	1.695	88,80	0,917	6,530
9	Exponencial	2,30	8,70	1.095	73,60	0,910	1,800
10	Exponencial	0,93	10,92	1.014	91,50	0,936	2,480
11	Exponencial	2,29	13,25	804	82,70	0,938	2,700
12	Exponencial	0,50	10,00	687	99,90	0,944	1,430

Em que: C₀ = efeito pepita; C₀+C = patamar; A = alcance (m); GD = grau de dependência espacial; R² = coeficiente de determinação; e SQD = soma dos quadros dos desvios.

FONTE: O autor (2019).

O modelo com maior prevalência entre os selecionados foi o exponencial, salvo no segundo e no terceiro ano, que apresentaram o modelo esférico como o de melhor ajuste. Estudos como de Mello (2004); Mello *et al.* (2006); Souza *et al.* (2008); Leal (2014); Pelissari *et al.* (2014); também obtiveram nas análises geoestatísticas com variáveis dendrométricas, melhores ajustes com os modelos esférico e exponencial.

O efeito pepita (C_0) indica a variância ocasionada em menor escala. Dessa forma, para o estoque de biomassa aérea, observou-se aumento do efeito pepita nas idades iniciais, até o quinto ano, com posterior redução dos valores de C_0 após a aplicação do primeiro desbaste. Isso corrobora a influência dos desbastes na alteração da estrutura dos povoamentos (SHNEIDER; FINGER, 1993; FINGER; SHNEIDER, 1999; ALVES, 2015). Enquanto para o estoque de biomassa radicular, esse efeito foi menos perceptível, indicando menor influência dos tratamentos silviculturais.

O alcance (A) apresentou variação de 383 a 1.365 m na biomassa aérea e de 300 a 1.695 m para biomassa radicular, indicando alta heterogeneidade espacial. Além disso, observou-se também redução dos valores de alcance nos anos subsequentes aos desbastes executados ao 5º, 8º e 11º anos. Essa tendência indica que os desbastes reduzem a correlação espacial entre as unidades amostrais, podendo ser uma informação importante para o planejamento de amostragens em inventários florestais, uma vez que se consegue otimizar o número de parcelas, dependendo da situação diminuindo ou aumentando, e sua alocação no terreno de forma a obter melhores resultados estatísticos.

Foram encontrados valores elevados de dependência espacial (GD%) em ambos os estoques de biomassa. No 12º ano, o estoque de biomassa radicular apresentou 99,9% de dependência, ao passo que no terceiro ano, tanto no estoque aéreo como nas raízes, foram encontrados valores mais baixos de dependência espacial. Contudo, ressalta-se que esses valores são fortemente afetados pelo tipo de modelo selecionado, em que os valores de GD% são maiores para o modelo exponencial e menores para o modelo esférico, seguido do gaussiano, para uma mesma base de dados.

Os valores do coeficiente de determinação (R^2) dos semivariogramas foram satisfatórios ao apresentar valores superiores a 0,9, com destaque no décimo segundo ano com 0,944 e 0,951, respectivamente para os estoques de biomassa radicular e aérea. A soma dos quadrados dos desvios (SQD) apresentou forte

aumento nas idades iniciais, uma vez que a SQD está em valores absolutos, ela segue a magnitude da variável biomassa em toneladas por hectare. Além disso, verificou-se redução após a aplicação dos desbastes nas idades de 8 e 11 anos, especialmente para o estoque de biomassa aérea.

Foram obtidos ajustes estatísticos apropriados dos semivariogramas para estimativa da biomassa aérea e radicular. Com os semivariogramas selecionados, foi analisada a dispersão dos valores em relação à linha média estimada, com as características desejáveis, como o efeito crescente e posteriormente estabilizador das curvas, que resultaram em ajustes satisfatórios dos estoques de biomassa aérea e radicular de Teca no segundo ao décimo segundo ano (Figuras 3 e 4).

FIGURA 3 – SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA ESTOQUE DE BIOMASSA AÉREA EM POVOAMENTO DE TECA DO 2º AO 12º ANO.

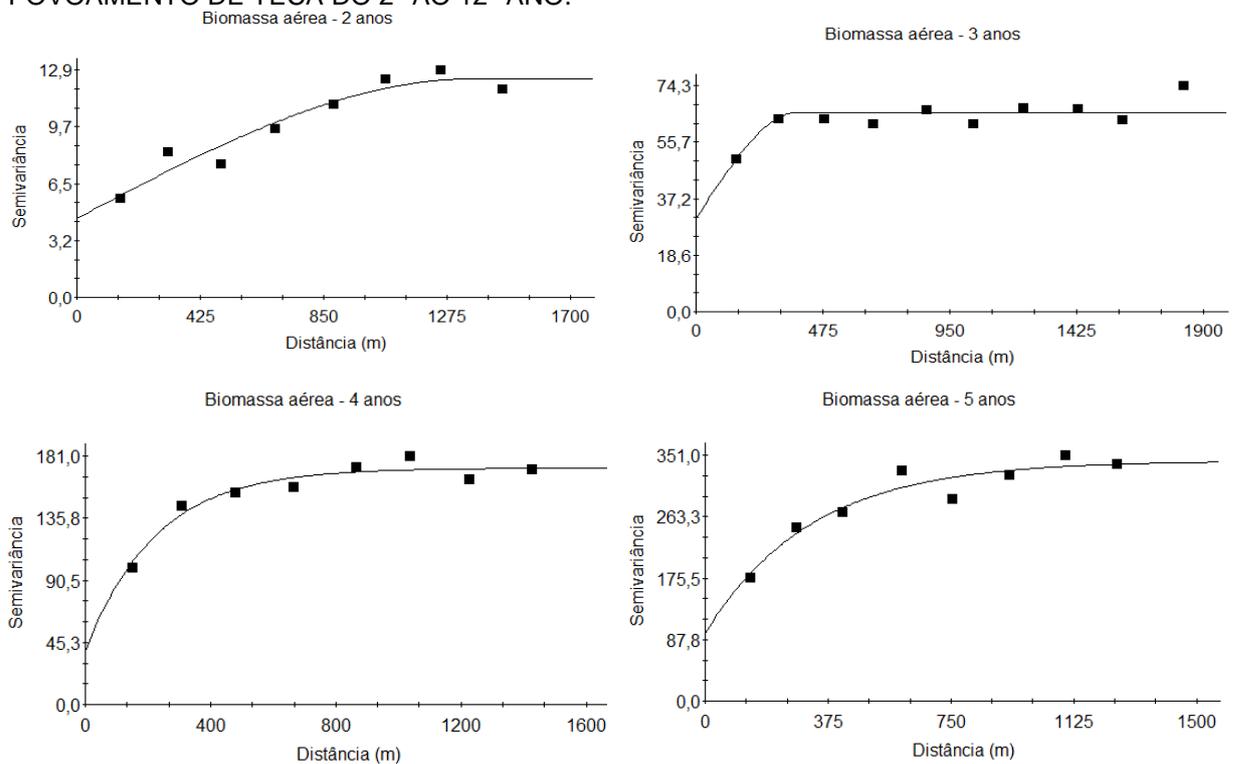
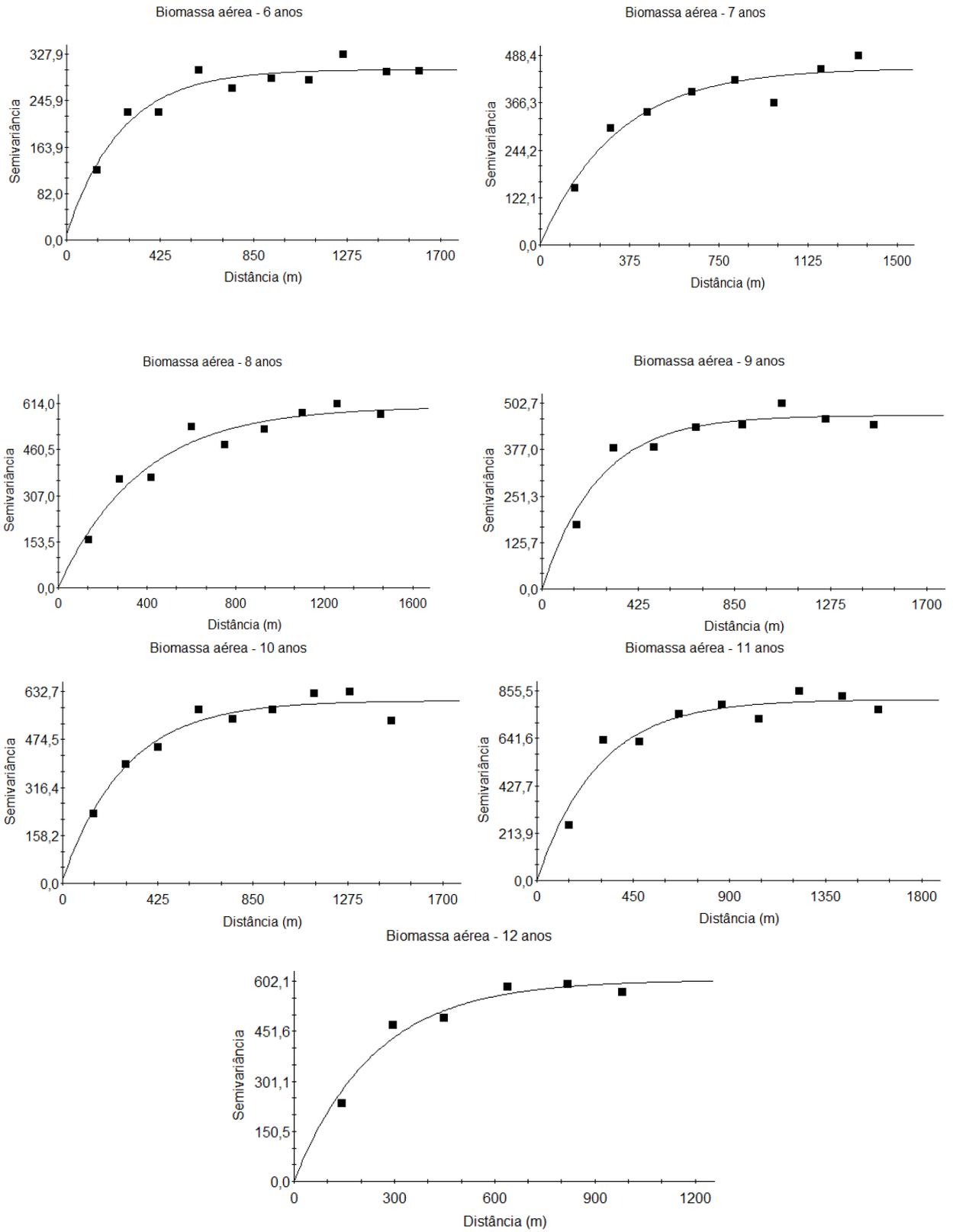


FIGURA 3 – Continuação...



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 4 – SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA ESTOQUE DE BIOMASSA RADICULAR EM POVOAMENTO DE TECA DO 2º AO 12º ANO.

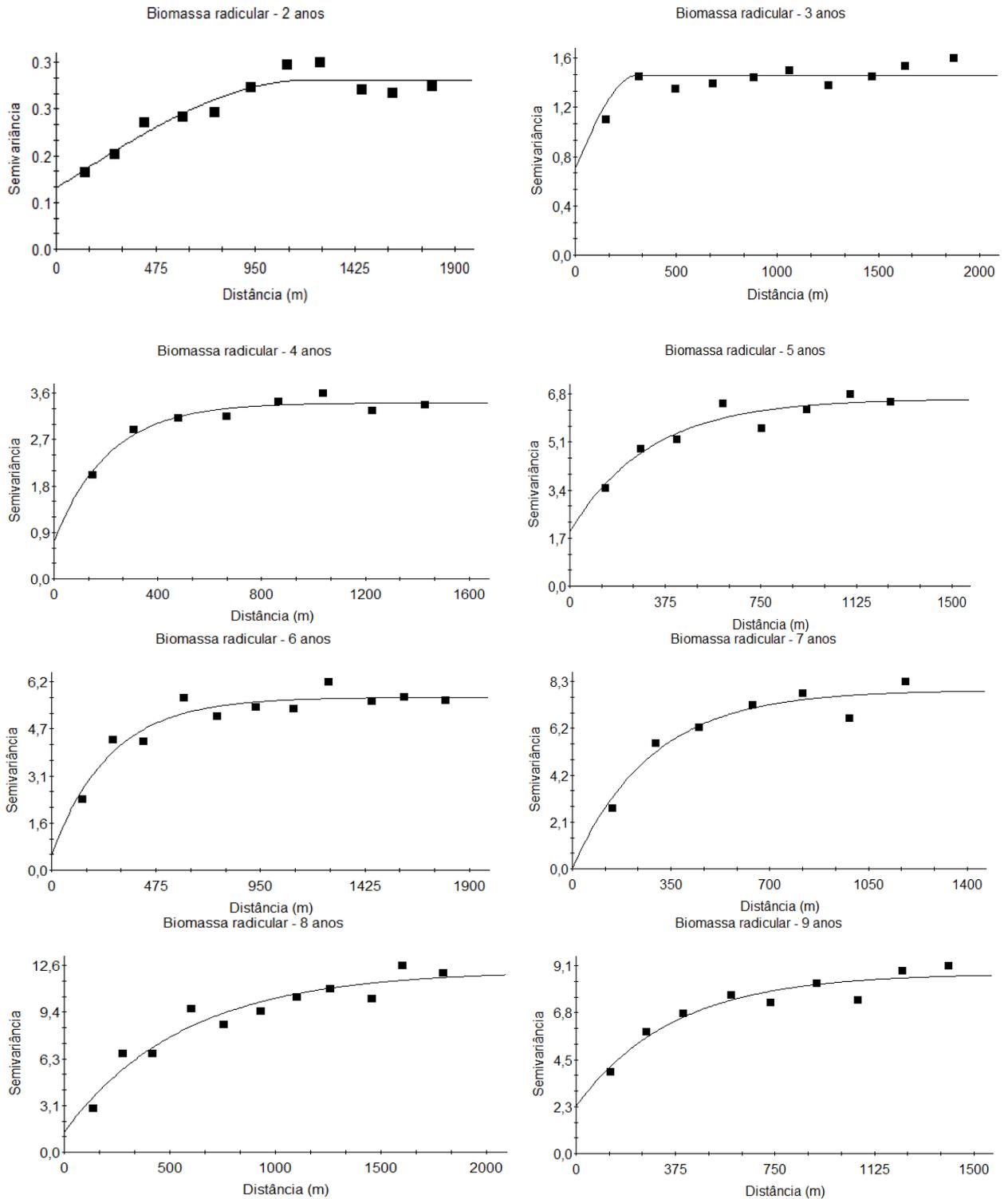
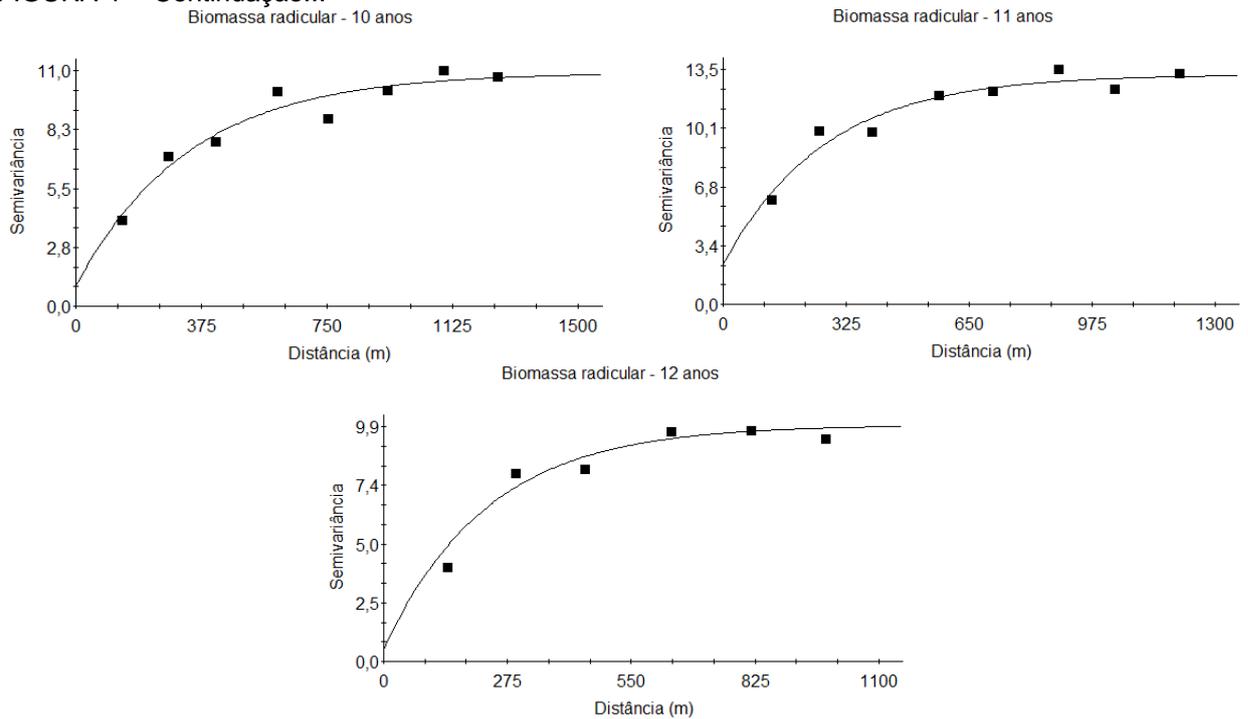


FIGURA 4 – Continuação...



FONTE: O autor (2019).

Após a constatação de dependência espacial entre as amostras pelos semivariogramas, realizou-se a interpolação espacial por meio da krigagem ordinária pontual. Assim, como resultados, as Figuras 5 e 6 exemplificam a distribuição espacial dos estoques de biomassa aérea e radicular do segundo ao décimo segundo ano em mapas temáticos.

FIGURA 5 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ESTOQUE DE BIOMASSA AÉREA EM POVOAMENTO DE TECA DO 2º AO 12º ANO.

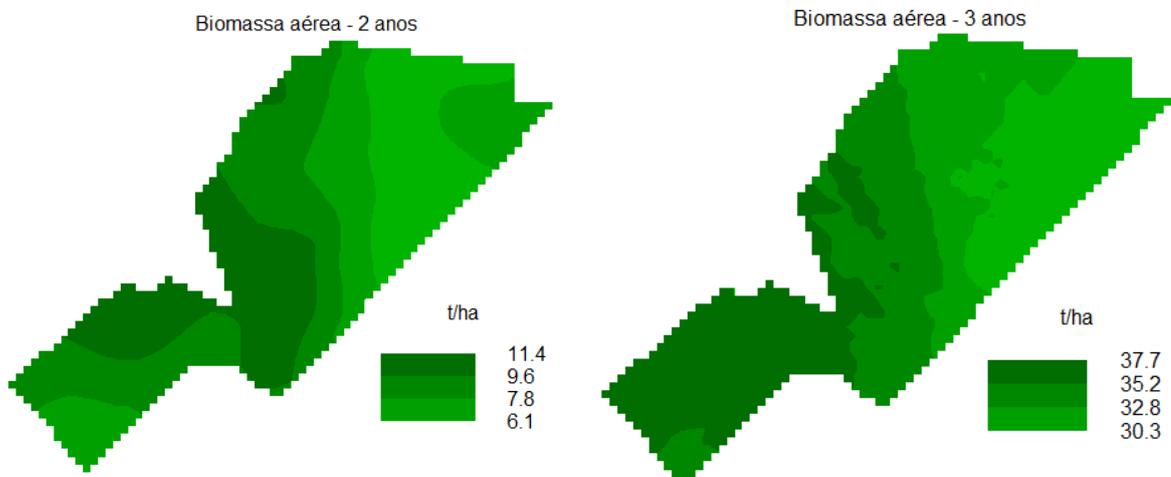


FIGURA 5 – Continuação...

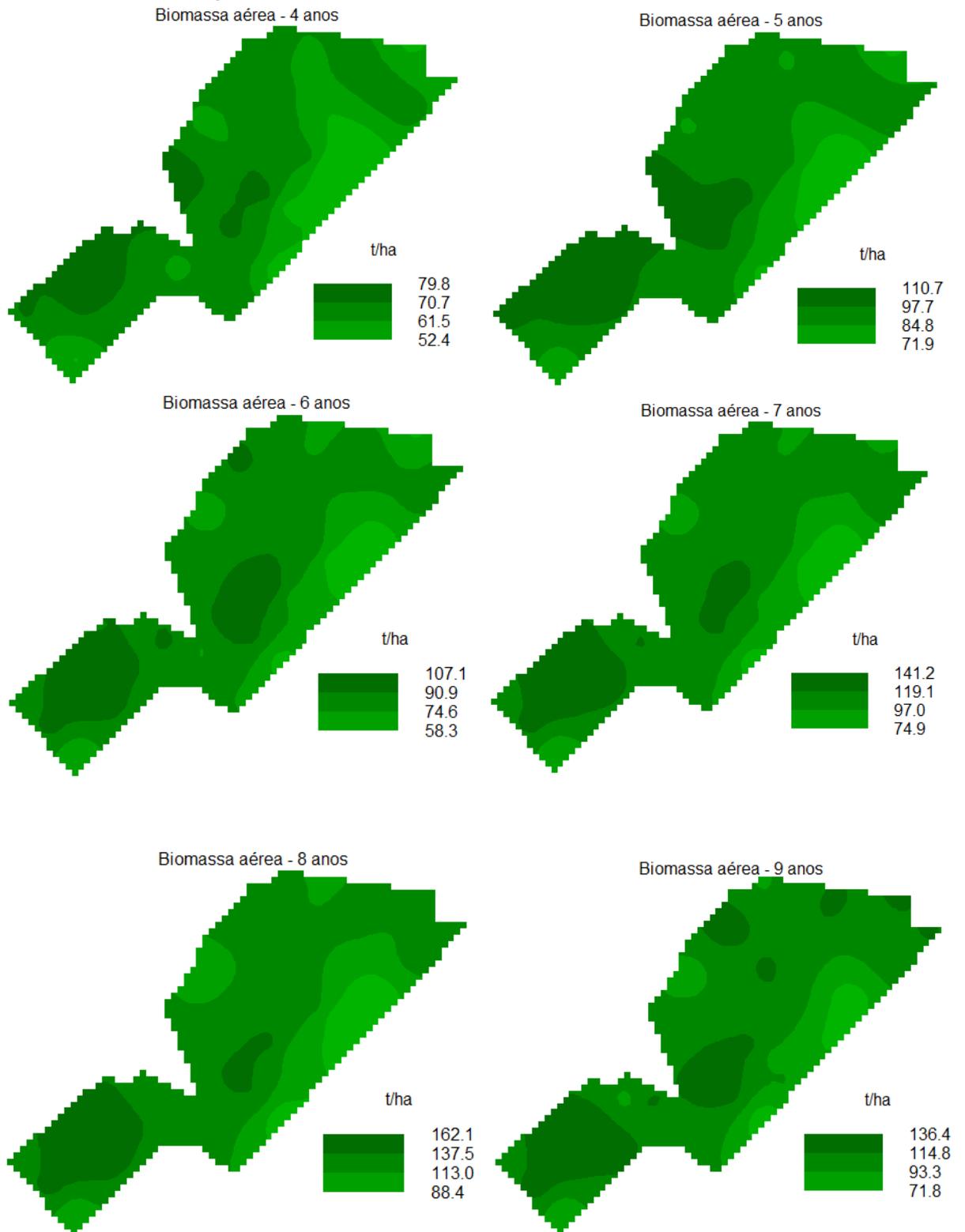
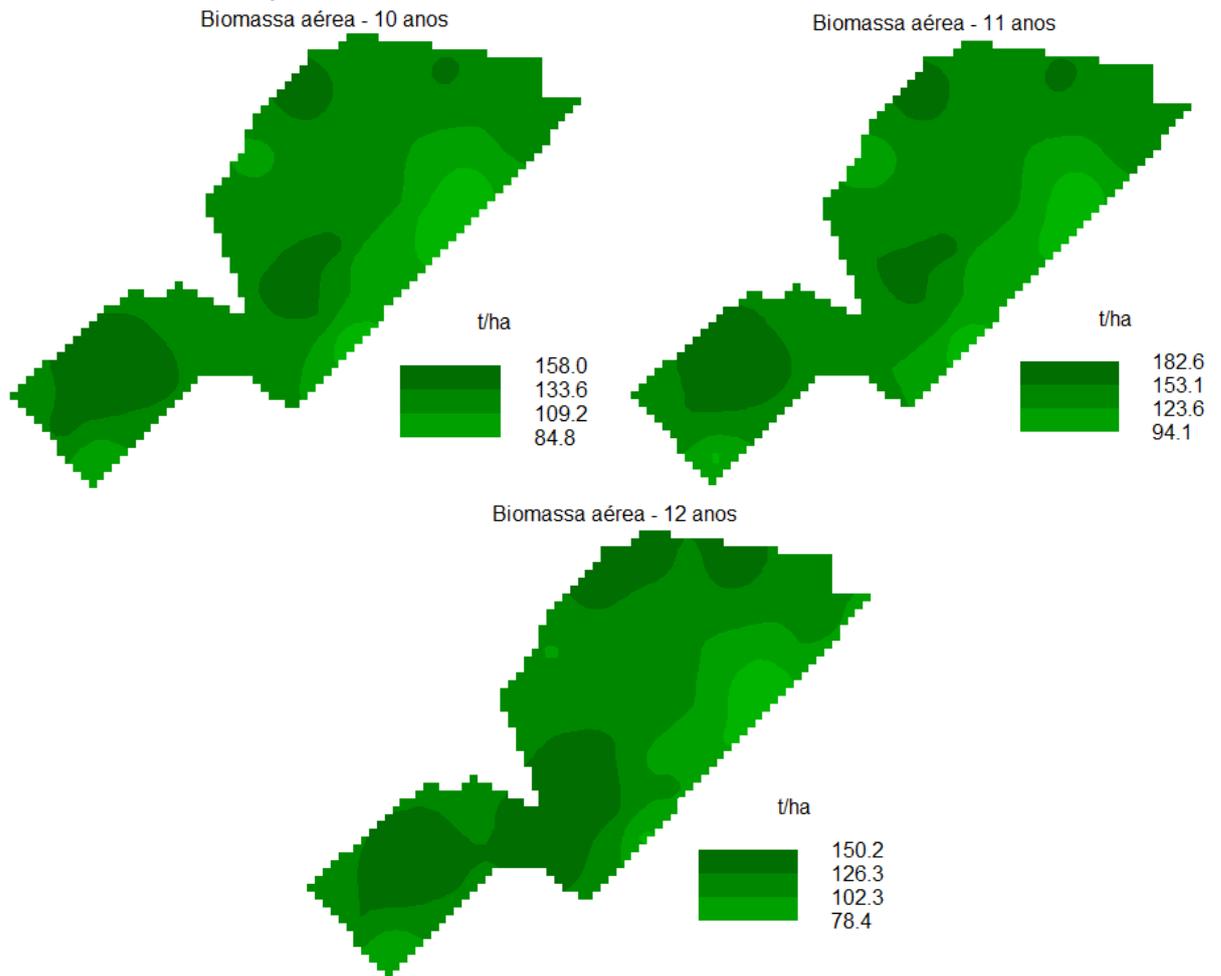


FIGURA 5 – Continuação...



Fonte: O autor (2019).

FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ESTOQUE DE BIOMASSA RADICULAR EM POVOAMENTO DE TECA DO 2º AO 12º ANO.

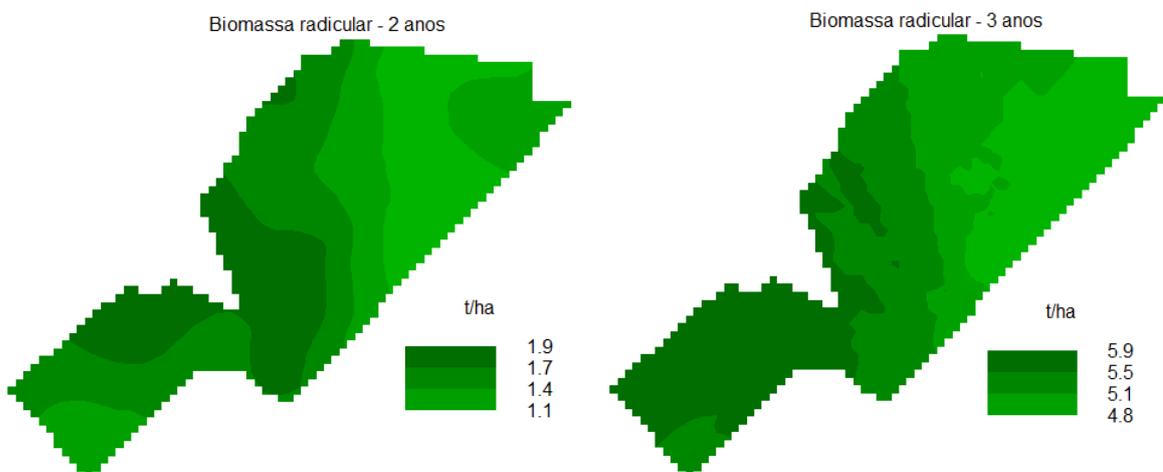


FIGURA 6 – Continuação...

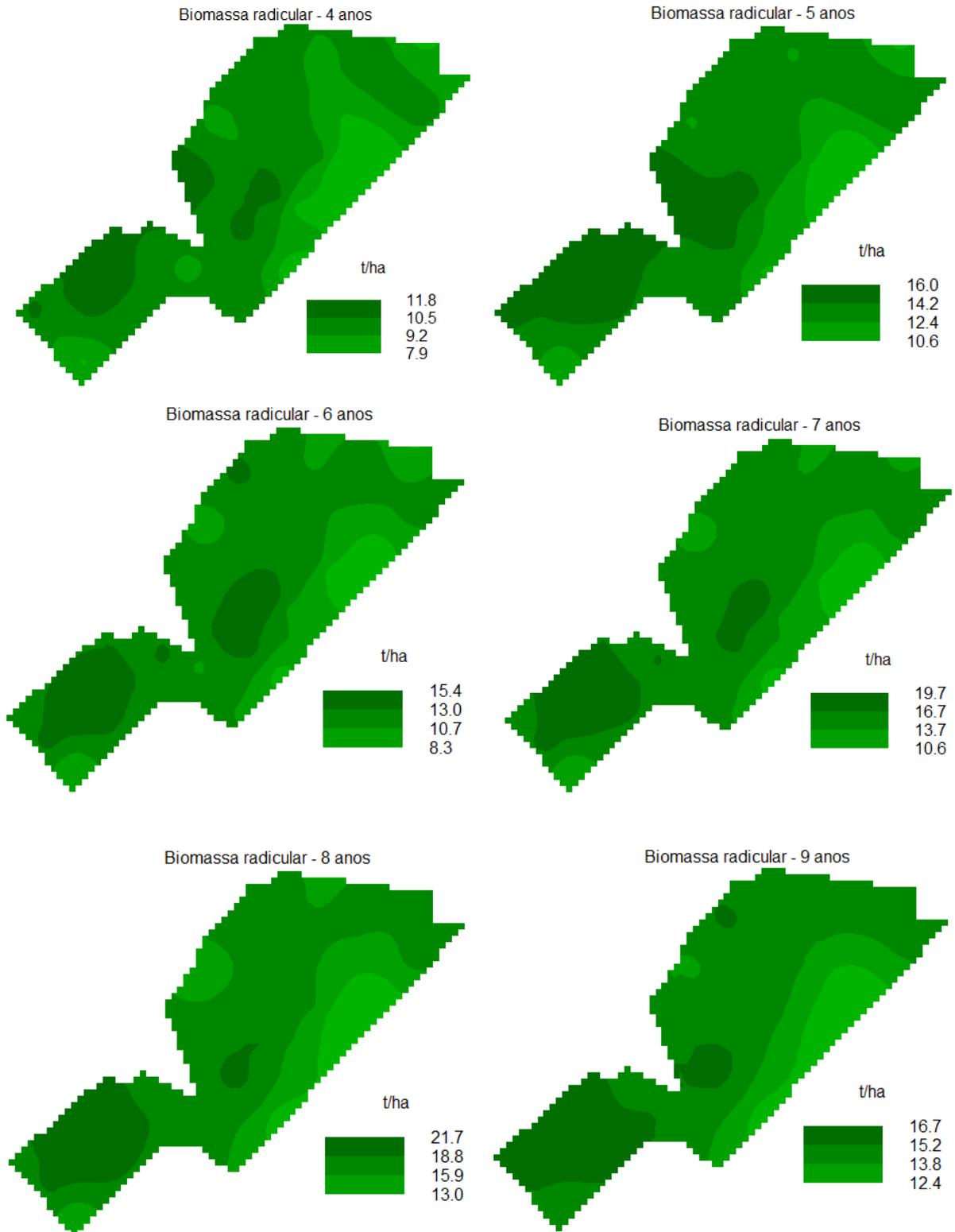
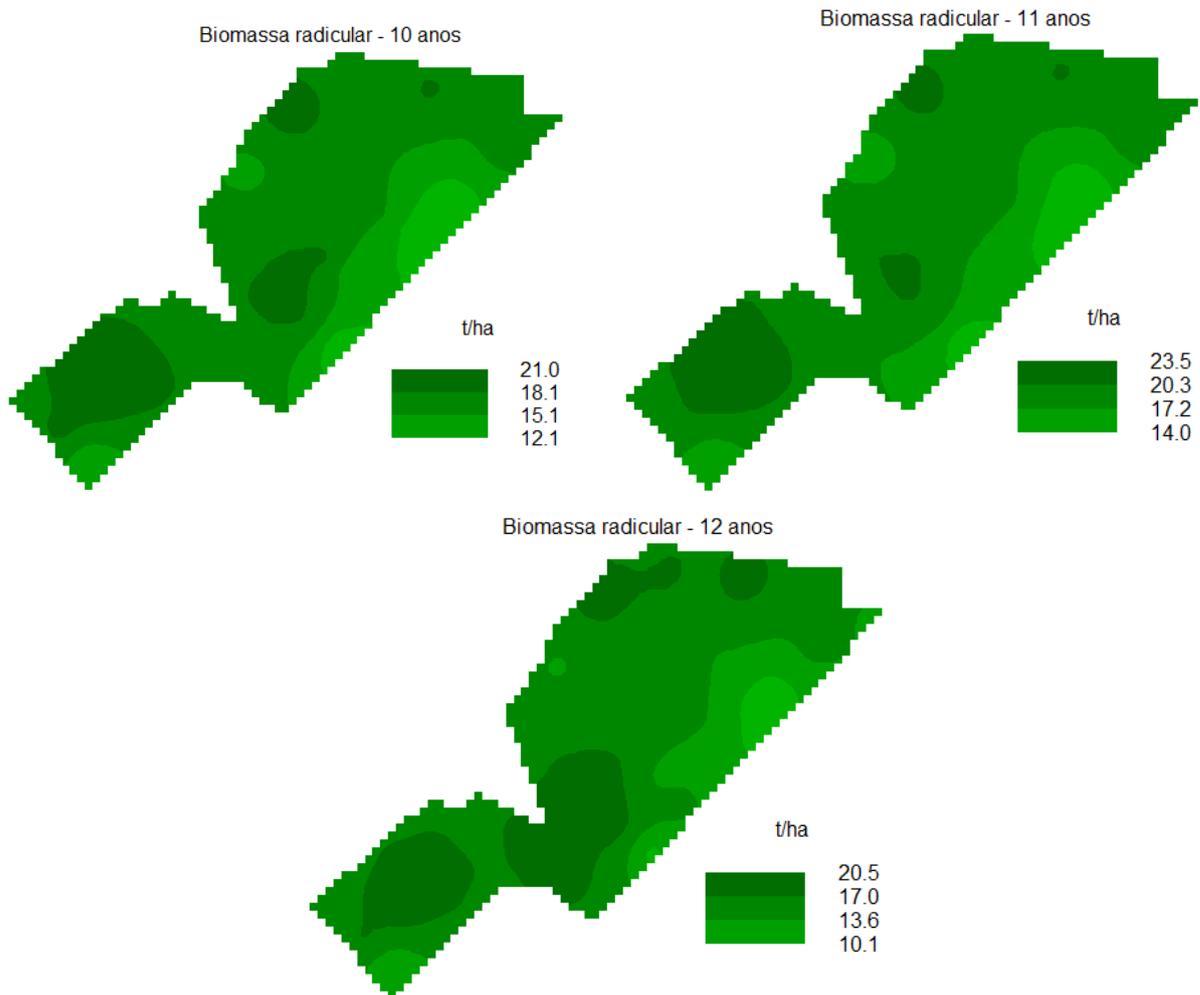


FIGURA 6 – Continuação...



Fonte: O autor (2019).

Os mapas temáticos ilustram a heterogeneidade espacial dos estoques de biomassa aérea e radicular e, dessa forma, consegue-se determinar o zoneamento da produção da biomassa no local. Observa-se a variação dos estoques ao longo da disposição do terreno, com destaque para as regiões central e sul que apresentaram elevados valores que se mantiveram ao longo dos anos, salvo no 6^o, 9^o e 12^o anos, onde sofreram redução pela realização de desbastes nos anos anteriores.

A porção leste é onde se encontram os menores valores dos estoques de biomassa. Essa variação do estoque é explicada pela diferença na qualidade do sítio conforme a disposição do terreno, uma vez que as condições do sítio de um determinado local estão relacionadas à capacidade produtiva dele (LEAL *et al.*, 2014).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estoque de biomassa aérea oscilou de 7,96 t.ha⁻¹ no segundo ano a 116,13 t.ha⁻¹ no décimo segundo. A biomassa radicular apresentou média de 1,37 t.ha⁻¹ no segundo ano e 15,48 t.ha⁻¹ no décimo segundo, em que ambos os estoques aumentaram conforme a idade. Ao longo desse período, foram realizados três desbastes que evidenciaram as alterações nos estoques de biomassa.

Quando comparados com a literatura, os resultados obtidos no presente trabalho demonstram bom desempenho. Embora as equações utilizadas não tenham sido desenvolvidas especificamente para área estudada, elas resultaram em estimativas semelhantes às pesquisas realizadas em plantios na região deste estudo.

A análise geoestatística proporcionou mensurar e identificar os diferentes padrões e dinâmicas espaciais dos estoques de biomassa aérea e radicular com precisão estatística. O modelo exponencial foi o mais eficiente para modelar a variabilidade espacial dos estoques de biomassa no povoamento de Teca, evidenciando que a distribuição espacial dessas variáveis é heterogênea e dinâmica ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, V. M. S. da. **Alteração estrutural e os produtos obtidos de povoamentos de *Tectona grandis* L.f. submetidos a desbaste**. 25 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2015.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 2003.
- BASSO, S. **Biomassa, carbono e relação entre atributos químicos do solo e variáveis de produção da teca**. 21 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2016.
- BEHLING, M. **Nutrição, partição de biomassa e crescimento de povoamentos de Teca em Tangará da Serra – MT**. 22 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- BEHLING, M.; FELIPE, R. T. A.; FARIAS, J. B.; CARVALHO, G. de; NEVES, J. C. L. Relações entre parte aérea e raízes em povoamentos de Teca. **Revista Ceres**, v. 65, n. 6, p. 463-473, 2018.
- BEZERRA, A. F. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste**. 15 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- BOGNOLA, I. A. LINGNAU, C.; LAVORANTI, O. J.; STOLLE, L.; HIGA, A. R.; OLIVEIRA, E. B. de. **Geoestatística integrada com estatística multivariada e geoprocessamento na definição de unidades de manejo para o *Pinus taeda***. Colombo: Embrapa Florestas, 2011.
- BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer**. Rome: FAO, 1997.
- CARVALHO, J. R. P.; VIEIRA, S. R. **Avaliação e comparação de estimadores de krigagem para variáveis agrônomicas – uma proposta**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2001.
- CARVALHO, S. de P. Predição do volume de árvores integrando LIDAR e geoestatística. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 107, p. 627-637, 2015.
- FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, A. D. de; BARBOSA, L. K. F. **Teca (*Tectona grandis* L. f.): principais perguntas do futuro empreendedor florestal**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2005.
- FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Determinação do peso do desbaste para

florestas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, com base no índice de espaçamento relativo. **Ciência Florestal**, v. 9, n. 1, p. 79-87, 1999.

GARCIA, M. L. **Intensidade de desbaste em um povoamento de *Tectona grandis* L.f., no município de Sinop – MT**. 12-19 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2006.

GONZÁLEZ, W. F. **Manual para produtores de teca (*Tectona grandis* L. f) em Costa Rica**. Heredia: Costa Rica, 2004. 121 p.

GUEDES, I. C. L.; MELLO, J. M. de; MELLO, C. R. de; OLIVEIRA, A. D. de; SILVA, S. da; SCOLFORO, J. R. S. Técnicas geoestatísticas e interpoladores espaciais na estratificação de povoamentos de *Eucalyptus* sp. **Ciências Florestais**, v. 22, p. 541-550. 2012.

IBÁ – INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES. **Relatório 2017**. São Paulo: IBÁ, 2017.

KAOSA-ARD, A. Overview of problems in teak plantation establishment. In: REGIONAL SEMINAR ON TEAK, 2., 1998, Yangon. **Proceeding...** Bangkok: FAO, p. 49-59, 1998.

KARMACHARYA, S. B.; SINGH, K. P. Biomass and net production of teak plantations in a dry tropical region in India. **Forest Ecology and Management**, p. 233-247, 1991.

KRAENZEL, M.; CASTILLO, A.; MOORE, T.; POTVIN, C. Carbon storage of harvest-age Teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama. **Forest Ecology and Management**, 2001.

LAMPRECHT, H. Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas- possibilidades e métodos de povoamento sustentado. **Eschborn: Instituto de Silvicultura da Universidade de Göttingen**, p. 310-313, 1990.

LEAL, F. A.; MATRICARDI, E. A. T.; MIGUEL, E. P. Interpolador Geoestatístico para estimar volume num povoamento de *Eucalyptus urophylla*, em Rio Verde/GO. **Nucleus**, v. 11, n. 1, p. 153-159, 2014.

MARTINS, A. P. M.; CARVALHO, R. R.; ANDRADE, C. de; SANQUETTA, C. R. Comparação de métodos de quantificação de carbono em Bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.). **BIOFIX Scientific Journal**, v. 2, n. 1, p. 16-21, 2017.

MWANGI, J. R. **Volume and biomass estimation models for *Tectona grandis* grown at Longuza forest plantation, Tanzania**. XX f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - University of Agriculture, Morogoro, Tanzania, 2015.

MELLO, J. M. de. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. Tese, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2004.

MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. de; BATISTA, J. L. F.; JUNIOR, P. R. J.; JUNIOR, H. K. Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão. **Floresta**, v.

36, n. 2, p. 251-260, 2006.

OLIVEIRA, A. C.; PACHECO, R. M.; VITAL, B. R. Pesquisa avalia poder calorífico de Teca. **Revista Madeira**, n.136, 2013.

ORTIZ, J. L.; VETTORAZZI, C. A.; COUTO, H. T. Z. do; GONÇALVES, J. L. de M. Relações espaciais entre o potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo. **Scientia Forestalis**, n. 72, p. 67-79, 2006.

PANDEY, D.; BROWN, C. Teak: a global overview. **Unasyiva**, v. 51, n. 201, p. 3-13, 2000.

PELISSARI, A. L. **Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos de *Tectona grandis* L. f.** 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

PELISSARI, A. L. **Silvicultura de precisão aplicada ao desenvolvimento de *Tectona grandis* Linn F. na região sul do estado de Mato Grosso.** 14-18 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2012.

PELISSARI, A. L.; FILHO, A. F.; CALDEIRA, S. F.; MACHADO, S. A. do. Geoestatística Aplicada ao manejo de Povoamentos Florestais de Teca, em períodos pré-desbaste seletivo, no estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 32, n. 3, p. 430-444, 2014.

REIS, A. A. dos; MELLO, J. M. de; RAIMUNDO, M. R.; JUNIOR, F. W. A.; OLIVEIRA, M. S. de; DINIZ, J. M. F. de S. Estratificação de um povoamento de eucalipto por interpoladores geoestatísticos e sensoriamento remoto. **Embrapa**, v. 51, n.10, p. 1751-1761, 2016.

RONDON, E. V. Estudo de biomassa de *Tectona grandis* L.f. sob diferentes espaçamentos no estado do Mato Grosso. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 337-341, 2006.

RUFINO, T. M. C. R.; THIERSCH, C. R.; FERREIRA, S. O.; JUNIOR, H. K.; FAIS, D. Uso da geoestatística no estudo da relação entre variáveis dentrométricas de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e atributos do solo. **Ambiência**, v. 2, p.83-93, 2006.

SANTOS, H. G.; et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF : **Embrapa**, v. 5, p.326, 2018
SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. dos S. **As florestas e o carbono**. Curitiba, 2002.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D.; SIMON, A.; PSCHEIDT, H. RUZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 361-370, 2014a.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; MOGON, F. MAAS, G. C. B.; RODRIGUES,

A. L. Estimativa de carbono individual para *Araucaria angustifolia*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 1, p. 1-8, 2014b.

SHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Influência da intensidade do desbaste sobre o crescimento em altura de *Pinus elliotti* E. **Ciência Florestal**, v. 3, n. 1, p. 171-184, 1993.

SILVA, D. A. da; CHRISTO, E. R. de; BELHING, A.; MAYER, S. L. S.; PELANDA, K. A.; SIMETTI, R. Potencial e qualidade da madeira de desbaste de teca para produção de biocombustível. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n.83, p. 299-305, 2015.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa da biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, v.38, p. 185-206, 2008.

SOUZA, M. O.; BARBIN, D.; JÚNIOR, P. J. R.; STAPE, J. L. Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um ensaio de espaçamento florestal em delineamento sistemático tipo leque. **Revista Árvore**, v. 32, n. 3, p. 499-509, 2008.

TEIXEIRA, M. B. dos R.; SCALON, J. R. Comparação entre estimadores de semivariância. **Rev. Bras. Biom.**, São Paulo, v.31, n.2, p.248-269, 2013.

VIEIRA, S. R. Uso de geoestatística em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 01-54, 2000.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, B. **Geoestatística conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A **Geostatistics for environmental scientists**. 2. Ed. Wiley, 2007.