



**HENRIQUE FERRAÇO SCOLFORO**

**INTERPOLADORES ESPACIAIS NA  
ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO DO  
ESTOQUE DE CARBONO DA VEGETAÇÃO  
ARBÓREA EM MINAS GERAIS, BRASIL**

**LAVRAS – MG**

**2014**

**HENRIQUE FERRAÇO SCOLFORO**

**INTERPOLADORES ESPACIAIS NA ESTIMATIVA DA  
DISTRIBUIÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO DA VEGETAÇÃO  
ARBÓREA EM MINAS GERAIS, BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Prof. Dr. José Marcio de Mello

**LAVRAS - MG**

**2014**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e  
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Scolforo, Henrique Ferraço.

Interpoladores espaciais na estimativa da distribuição do estoque de carbono da vegetação arbórea em Minas Gerais, Brasil / Henrique Ferraço Scolforo. – Lavras : UFLA, 2014.

74 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: José Marcio de Mello.

Bibliografia.

1. Biomas. 2. Geoestatística. 3. Inventário florestal. 4. Carbono.  
I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 634.9285

**HENRIQUE FERRAÇO SCOLFORO**

**INTERPOLADORES ESPACIAIS NA ESTIMATIVA DA  
DISTRIBUIÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO DA VEGETAÇÃO  
ARBÓREA EM MINAS GERAIS, BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 01 de julho de 2014.

Dr. Carlos Rogério de Mello            UFLA

Dr. Antônio Carlos Ferraz Filho      UFLA

Orientador

Prof. Dr. José Márcio de Mello

**LAVRAS - MG**

**2014**

*A Deus.*

*Aos meus pais José Roberto e Sandra.*

*A minha irmã Roberta.*

*Aos meus avós Jair, José, Isaura e Aurora.*

*Aos meus professores e amigos.*

*A minha família.*

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois sem ele nada seria possível. Agradeço por ele me proteger e me dar forças para poder seguir a vida de uma forma honrosa.

Aos meus pais José Roberto Soares Scolforo e Sandra Mara Ferração Scolforo agradeço, pelo amor incondicional, pelo total apoio, carinho e incentivo.

Agradeço a minha irmã Roberta pelo amor, companheirismo e amizade.

Aos meus familiares, por me ajudarem e por estarem sempre presentes na minha vida.

Aos amigos de LEMAF (Marcel, Fernando, Pedro, Aliny, Iasmim, Amanda, Matheus, Paula, Kalill, Thiza, Beth, Ewerton, Glaucia, Ronan, Samuel, Venícios, Cleiton, João, Stefano, Escova, Marcos), pelo companheirismo e amizade por todos esses anos passados juntos, em especial ao Vinicius pela ajuda na descrição da parte metodológica.

Aos amigos da UFLA, agradeço pela amizade e contribuição em diversos momentos.

Aos professores do LEMAF (Faustinho, Passarinho, Zé Luís, Donizette, Lucas Gomide, Bob) e ao Carlos Rogério de Mello, agradeço pela amizade, e conhecimentos compartilhados em diversos momentos.

Ao LEMAF – UFLA, pela grande oportunidade de crescimento e aprendizado.

À Capes e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal pela bolsa de estudos que contribuiu em muito na minha formação acadêmica.

E ao professor José Marcio de Mello, pela paciência, orientação e dedicação para a realização deste trabalho.

Agradeço a todos vocês!

## RESUMO

Objetivou-se, neste estudo, mapear o estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea de Minas Gerais, através dos interpoladores espaciais inverso do quadrado da distância, krigagem, cokrigagem e krigagem com regressão; avaliar a melhor técnica espacial de mapeamento e descrever a distribuição das concentrações de carbono da parte aérea das plantas arbóreas em Minas Gerais. Os dados utilizados neste estudo são provenientes de 163 fragmentos constituintes dos Biomas Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica. A seleção da melhor forma de mapeamento foi baseada em critérios visuais e estatísticos (por meio do erro médio reduzido, EMR), e a qualidade dos mapeamentos foi realizada via análise de correlação. O modelo teórico de semivariância exponencial foi selecionado para se proceder a krigagem ordinária, cokrigagem e krigagem ordinária dos resíduos gerados a partir do modelo de regressão. A partir dos mapeamentos de carbono pelas diferentes técnicas, verificou-se com base no EMR e por critérios visuais, que o mapeamento, a partir da krigagem com regressão, foi o mais eficiente. Outro detalhe verificado foi a alta correlação encontrada entre as formas de mapeamento, o que agrega em confiabilidade para o estudo. Dessa forma, concluiu-se que a distribuição do estoque de carbono da vegetação arbórea em Minas Gerais se apresentou estruturado, especialmente, que a técnica de krigagem com regressão apresentou uma estimativa mais confiável da distribuição desse estoque de carbono em MG, além de ser influenciada pelo regime climático e pela radiação incidente nas florestas, sendo que, para as regiões sul e a parte sul da região leste do estado, encontram-se o maior nível de estocagem de carbono.

Palavras-chave: Biomas. Geoestatística. Inventário Florestal. Carbono.

## ABSTRACT

The aim of this study was to map the aboveground carbon stock of the vegetation in Minas Gerais through spatial interpolation inverse square distance, kriging, cokriging and regression-kriging; evaluate the best spatial mapping technique and describe the distribution of aboveground carbon concentrations in Minas Gerais. The data used in this study are from 163 fragments distributed in the Biomes Caatinga, Cerrado and Atlantic Forest. Selecting the best form of mapping was based on visual and statistical criteria (through reduced average error, RMS), and the quality of the mappings was performed via correlation analysis. The exponential semivariance theoretical model was selected to carry out ordinary kriging, cokriging and ordinary kriging of residuals generated from the regression model. From the carbon mappings by different techniques, it was found based on the EMR and visual criteria that mapping from the regression-kriging was the most efficient. Another detail found was the high correlation among forms of mapping, which adds to reliability in the study. Thus, it was concluded that the distribution of the aboveground carbon stock of woody vegetation in Minas Gerais presented spatially structured, the technique of regression-kriging showed a more reliable estimate of the distribution of carbon stocks in MG, besides being influenced by climate regime and the radiation in the forests, and to the south and south side of the east of the state, are the highest level of carbon storage.

Keywords: Biomes. Geostatistic. Forest Inventory. Carbon.



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	12
<b>2.1</b>	<b>Estocagem e Dinâmica de Carbono em Ecossistemas Florestais</b> .....	12
<b>2.2</b>	<b>Caracterização do estado de Minas Gerais</b> .....	13
<b>2.2.1</b>	<b>Cerrado</b> .....	14
<b>2.2.2</b>	<b>Mata Atlântica</b> .....	15
<b>2.2.3</b>	<b>Caatinga</b> .....	16
<b>2.3</b>	<b>Geoestatística</b> .....	18
<b>2.3.1</b>	<b>Teoria geoestatística</b> .....	18
<b>2.3.2</b>	<b>Semivariograma</b> .....	19
<b>2.3.3</b>	<b>Krigagem</b> .....	21
<b>2.3.4</b>	<b>Cokrigagem</b> .....	22
<b>2.3.5</b>	<b>Krigagem com regressão</b> .....	23
<b>2.4</b>	<b>Estudos da variabilidade espacial em florestas</b> .....	25
<b>2.5</b>	<b>Interpolador espacial determinístico</b> .....	26
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	27
<b>3.1</b>	<b>Descrição fisiográfica e sócio-econômica de MG</b> .....	27
<b>3.2</b>	<b>Amostragem e determinação do estoque de carbono da parte aérea nas espécies arbóreas de cada um dos Biomas de MG</b> .....	30
<b>3.3</b>	<b>Mapeamento do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG</b> .....	34
<b>3.3.1</b>	<b>Interpolador determinístico</b> .....	34
<b>3.3.2</b>	<b>Estudo variográfico</b> .....	35
<b>3.3.3</b>	<b>Krigagem ordinária</b> .....	35
<b>3.3.4</b>	<b>Cokrigagem</b> .....	36

3.3.5	Krigagem com regressão.....	37
3.4	Determinação da melhor forma de mapeamento da distribuição do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea no estado de MG.....	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1	Modelagem variográfica para a Krigagem ordinária.....	42
4.2	Modelagem variográfica para a Cokrigagem.....	44
4.3	Aplicação da Krigagem com regressão.....	46
4.3.1	Modelagem do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG (Modelo Geográfico).....	47
4.3.2	Krigagem dos resíduos.....	50
4.4	Mapas do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG.....	51
4.4.1	Interpolação pelo Inverso do Quadrado da Distância.....	52
4.4.2	Interpolação pela krigagem ordinária.....	53
4.4.3	Interpolação pela Cokrigagem.....	54
4.4.4	Interpolação pela krigagem com regressão.....	55
4.5	Avaliação quali-quantitativa dos Mapas gerados a partir dos interpoladores geoestatísticos com a seleção da melhor técnica e consequente descrição final da distribuição do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG.....	57
5	CONCLUSÕES.....	66
6	REFERÊNCIAS.....	66

## 1 INTRODUÇÃO

Através da história, a agricultura e os recursos naturais têm sido usados para a produção de alimentos, fibras, energia, carne, leite e outros produtos. Tanto a demanda interna por esses produtos essenciais à vida humana, quanto o atendimento por parte das demandas mundiais por alimentos têm levado a um rápido crescimento da bioeconomia. Esta inclui todos os setores da indústria e setores da economia que produzem, manejam e exploram recursos biológicos. As oportunidades e mudanças da bioeconomia global são significativas. Em adição aos novos desenvolvimentos desta, muitos dos velhos problemas permanecem (SWINNEN; RIERA, 2013).

Uma ótima oportunidade de incorporar outros conceitos que levem à maior sustentabilidade dos recursos naturais é conhecer o ciclo de carbono das diferentes fitofisionomias inseridas dentro da paisagem. Segundo Ferreira et al. (2012), verificando-se a relação da produção agropecuária em relação aos diferentes Biomas existentes no Brasil, nota-se que, principalmente, nas regiões que não compõem a Amazônia legal há uma grande pressão por produção de alimentos e o conflito entre manter a vegetação ou produzir ou, ainda, como conciliar que ambas possam subsistir é um dos grandes desafios do Brasil.

O Brasil apresenta área de 8.514.877 Km<sup>2</sup>, e dentro desta, o estado de Minas Gerais, com 586.528 km<sup>2</sup>, representa aproximadamente 7% do território e contém variações paisagísticas que contemplam Cerrados, Mata Atlântica e Caatinga, com 57%, 41% e 2%, respectivamente. Mediante a magnitude dessas áreas dentro do estado, o entendimento acerca da distribuição e estocagem de carbono, das plantas que compõem essas diferentes fitofisionomias, é de fundamental importância para traçar políticas de desenvolvimento mais sustentáveis no contexto do ciclo de carbono.

Porém, para que esse conhecimento seja consolidado para os diferentes Biomas de Minas Gerais, um Inventário Florestal, contando com 4424 parcelas permanentes foi estruturado num sistema de amostragem em dois estágios, no qual foram mensuradas e estão sendo monitoradas 780.000 árvores em 165 diferentes fragmentos com vegetação nativa, representando diferentes condições de solo, clima, altitude, temperatura e fitofisionomias. Muitos estudos têm sido desenvolvidos a partir dessa base de dados e um deles tem como objeto maior o conhecimento do estoque de carbono espacializado nas diferentes fitofisionomias, como um componente que pode contribuir para que políticas mais sustentáveis na utilização do ambiente sejam estruturadas.

Nesse contexto, a geoestatística, com métodos de predição global, surge como uma técnica altamente apropriada, desde que a quantidade e a qualidade da amostragem da variável de interesse sejam apropriadas, pois a qualidade do modelo espacial ajustado é função direta da amostragem (MILLER; FRANKLIN; ASPINALL, 2007).

O campo geoestatístico possui uma amplitude de técnicas, as quais possibilitam estimativas mais acuradas em relação aos valores reais. No campo das ciências agrárias, por exemplo, além da utilização da krigagem ordinária, a cokrigagem, que é tratada como uma extensão multivariada da krigagem (YAMAMOTO; LANDIM, 2013) e a krigagem com regressão, que é a combinação entre técnicas de ajuste de modelos multivariados e a krigagem dos resíduos fornecidos por esses modelos (HENGL; HEUVELINK; ROSSITER, 2007), são alternativas potencialmente capazes de proporcionar essa espacialização.

Inferir sobre as estimativas a partir da interpolação espacial também pode ser feita através da forma determinística. O interpolador determinístico mais conhecido e utilizado é o Inverso da Distância Ponderada (IDW) que, para

a predição em locais não amostrados, utiliza informações de pontos amostrados que circundam o local da predição, isto é, os pontos amostrados vizinhos (YAMAMOTO, 2001). No entanto, os interpoladores determinísticos podem apresentar problemas relacionados a viés de estimativa, conforme já observado por Guedes et al. (2012).

Nesse sentido, os objetivos desse estudo foram: a) mapear o estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea de Minas Gerais, através dos interpoladores espaciais: inverso do quadrado da distância, krigagem, cokrigagem e krigagem com regressão; b) avaliar a melhor técnica espacial de mapeamento e descrever a distribuição das concentrações de carbono da parte aérea das plantas arbóreas em Minas Gerais.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Estocagem e Dinâmica de Carbono em Ecossistemas Florestais**

Para o comportamento da estocagem de carbono, observa-se que dentre os ecossistemas terrestres, as florestas se apresentam como as maiores armazenadoras (sumidouros) de carbono, pois é amplamente perceptível como plantas e solo têm alta capacidade de armazenamento (LAL, 2008).

As plantas estocam carbono tanto na parte aérea como na camada abaixo do solo, além da serapilheira que é formada sob a camada do solo, a partir de matéria oriunda da planta. A estocagem de carbono no ecossistema é dependente, primariamente, do clima local, topografia, espécies que compõem o ecossistema, características do solo, histórico de distúrbios na área, entre outros fatores (DAVINDSON; JANSSENS, 2006; BROWN; JOHNSTONE, 2011).

A condição de um indivíduo específico (planta) estocar maior quantidade de carbono na parte aérea ou na camada abaixo do solo é dependente das condições impostas pelo ambiente, ou seja, para um local onde esse indivíduo recebe uma boa luminosidade (tem espaço para desenvolver), além de boa disponibilidade de água e nutrientes no solo, ocasiona num maior acúmulo de carbono na parte aérea do indivíduo, caso oposto para locais com amplas limitações ambientais.

O conhecimento do estoque e dinâmica de carbono ainda não é, mas será de grande relevância, quando se observam questões relativas à estabilidade do ambiente (SILVA et al., 2007). Fixar carbono através do meio florestal é amplamente importante na busca pela mitigação dos possíveis efeitos que a instabilidade ambiental pode causar como, por exemplo, temperaturas extremas, irregularidade nas precipitações que acabam por aumentar a erosão nos solos e enchentes, etc.

## **2.2 Caracterização do estado de Minas Gerais**

O estado de Minas Gerais compreende área de 586.528 km<sup>2</sup>, com altitude variando de 50 a 2500 m, sendo as maiores altitudes encontradas ao sul do estado. A temperatura anual média varia de 14°C ao sul a 27°C ao norte, e a precipitação anual média varia de 700 mm ao norte a 2.000 mm ao sul do estado (CARVALHO et al., 2008).

Minas Gerais possui algumas peculiaridades interessantes, em decorrência das especificidades relacionadas à clima e solo, o que resulta em variações paisagísticas que culminaram para o estado ter três Biomas de grande impacto no Brasil: Cerrado, Mata Atlântica e Caatinga, sendo que cada um ocupa uma extensão territorial do estado de 57%, 41% e 2%, respectivamente.

### 2.2.1 Cerrado

Com clima regulamente sazonal, solos em geral bem drenados e ácidos, principalmente Latossolos, Cambissolos, e Neosolos Quartzarênicos, o Cerrado apresenta cobertura do solo variando de campo sujo (10%) a cerradão (80%), essa com formação de dossel contínuo. O estrato lenhoso, composto por árvores e arbusto tortuosos, varia de 1,5 m a 15 m de altura (OLIVEIRA FILHO et al., 2006).

A fisionomia campo cerrado apresenta baixo número de árvores e arbustos e maior densidade de estrato herbáceo, esse sendo encontrado com ampla distribuição no estado, portanto com baixos valores de peso de matéria seca, volume e área basal. O cerrado *sensu stricto* apresenta estrato arbóreo arbustivo, cobrindo de 10 a 60%, com números de árvores e arbustos, peso de matéria seca, volume de madeira e área basal com valores medianos. Já, o cerradão contém dossel fechado, cobrindo até 80% da área, com número de árvores, peso de matéria seca, volume de madeira e área basal com os maiores valores para esse Bioma, aproximando-se dos valores para florestas semidecíduais e mata seca.

Apesar da incipiência de estudos quanto a real capacidade de estocagem de carbono no Bioma Cerrado, acredita-se que este, por ser de grande representatividade, mesmo no âmbito nacional, tenha um acúmulo representativo de estoque de carbono (REZENDE et al., 2006). Buis et al. (2009) corrobora com esse pensamento e também crê na ampla capacidade de armazenamento de carbono pelo Cerrado. Cabe ressaltar que Liu et al. (2010) inferiram que essa capacidade é mais pronunciada na camada abaixo do solo, ou seja, para o Bioma Cerrado, existe uma maior propensão de armazenamento de carbono no solo e raízes.

Grace et al. (2006) encontraram em áreas de cerrado tropical, o dobro da taxa de estocagem de carbono, na camada abaixo do solo, em relação à parte aérea, chegando a valores de 52 e 26 GtC/ano, respectivamente.

Um dos raros estudos realizados em Minas Gerais relacionado à estocagem de carbono, porém, de relevância para o cenário estadual e nacional, foi realizado por Scolforo et al. (2008a) onde os autores estimaram o estoque de carbono presente na biomassa aérea lenhosa de florestas nativas do Bioma Cerrado dividido por fitofisionomia vegetal. Esses estoques foram estimados, a partir da coleta de diversas plantas em campo espalhadas no estado, de forma a cobrir da melhor maneira possível a distribuição espacial dos tipos vegetacionais, onde foram incorporadas diferentes espécies em variadas classes diamétricas, o que proporcionou a geração de equações específicas para cada fitofisionomia e bacia hidrográfica do estado. Para se ter uma ideia, os valores encontrados por esses autores foram de 31,78; 14,21; e 5,34 Mg/ha no cerradão, cerrado *sensu stricto* e campo cerrado, respectivamente.

### **2.2.2 Mata Atlântica**

A Mata Atlântica, encontrada no estado de Minas Gerais, apresenta as seguintes fitofisionomias: Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Ombrófila, sendo a primeira de maior extensão.

Segundo Leitão Filho (1994), a Floresta Atlântica é um Bioma de grande riqueza de espécies, assim como de animais endêmicos e presença de alta densidade de plantas. Essas características, segundo Myers et al. (2000), colocaram esse Bioma entre os 8 “hotspots” mais importantes para a conservação da biodiversidade. Dessa forma, estudos com relação à dinâmica e



distribuição de carbono aéreo para remanescentes florestais atlânticos vêm ocorrendo de forma a direcionar da melhor forma possível as ações públicas.

Cunha et al. (2009), objetivando avaliar os estoques de carbono em fragmentos florestais montanos da Mata Atlântica, na região norte do estado do Rio de Janeiro, encontraram uma acumulação média de carbono na vegetação (parte aérea + serrapilheira) de 67,2 Mg/ha em dois anos de avaliação.

Ribeiro et al. (2009), objetivando quantificar o carbono estocado do fuste sem casca em um remanescente florestal atlântico, localizado no Município de Viçosa (MG), encontrou um valor correspondente a 83,34 Mg/ha.

Para o estado de Minas Gerais, Scolforo et al. (2008b), a partir da realização do projeto denominado “Inventário Florestal de Minas Gerais”, realizaram estudos para a determinação dos estoques de carbono dos remanescentes florestais de Mata Atlântica. Os autores estimaram o estoque de carbono presente na biomassa aérea lenhosa de florestas nativas do Bioma subdividido por fitofisionomia vegetal. Esses estoques foram estimados, a partir da coleta de diversas plantas em campo espalhadas no estado, de forma a cobrir da melhor maneira a distribuição espacial dos tipos vegetacionais. Com esses dados, foram geradas equações específicas por fitofisionomia e bacia hidrográfica, a fim de estimar o estoque de carbono. Os valores encontrados por esses autores foram de 64,89 e 61,12 Mg/ha para Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Ombrófila, respectivamente.

### **2.2.3 Caatinga**

A Caatinga apresenta características peculiares quanto à sua formação vegetal sendo arbustos e árvores baixas caducifólias, ou seja, perdem suas folhas

na estação seca, pois, dessa forma, conseguem evitar a transpiração e a perda de água, voltando a florescer no período chuvoso (OLIVEIRA et al., 2006).

Segundo Oliveira et al. (2006), as regiões de Caatinga são características por apresentarem altas médias de temperatura e baixo índice pluviométrico, sendo por essa irregularidade climática, caracterizada como a região dos maiores limitantes meteorológicos do Brasil.

Sendo locais de ampla irregularidade climática, a Caatinga tem uma conotação de mata espinhosa na época seca. As plantas possuem características xeromórficas, ou seja, para adaptação quanto ao clima, suas plantas têm suas folhas transformadas em espinhos, cutículas altamente impermeáveis e caules suculentos (OLIVEIRA et al., 2006).

Scolforo et al. (2008c) fizeram um dos poucos estudos relacionados a biomassa de carbono da parte aérea onde encontram-se remanescentes florestais do Bioma da Caatinga em Minas Gerais. Os autores estimaram os estoques de carbono, a partir da coleta de diversas plantas em campo espalhadas nas regiões desse Bioma, de forma a cobrir da melhor maneira, a distribuição espacial dos tipos vegetacionais, onde foram incorporadas diferentes espécies em variadas classes diamétricas, o que proporcionou a geração de equações específicas para o Bioma do estado. Os valores encontrados por esses autores foram de 28,55 Mg/ha.

Existem outros poucos estudos para o Bioma, na literatura recente, e estes têm suas áreas de estudo localizadas na região nordeste do Brasil e são relacionados à dinâmica de carbono no solo, como, por exemplo, o estudo de Giongo et al. (2011).

## 2.3 Geoestatística

A técnica geoestatística apresenta métodos tanto para a estratificação, quanto para a predição. Du et al. (2010) definiram o uso dos métodos geoestatísticos como promissores para a estimativa da biomassa arborea e Nanos et al. (2004) observaram ganhos com o uso da geoestatística para um modelo de altura/diâmetro pela possibilidade de predição dos efeitos de suporte aleatórios do povoamento sem a necessidade de adição no aumento da intensidade amostral do povoamento.

### 2.3.1 Teoria geoestatística

O início dos estudos da estatística espacial ocorreu com Daniel Krige em avaliações, buscando melhorias na estimativa da concentração de ouro em jazidas na África do Sul (LANDIM, 2006), o que mostrou, então, o surgimento da necessidade de levar em consideração a distância entre as amostras.

Landim (2006) cita que Matheron desenvolveu a Teoria das Variáveis Regionalizadas no ano de 1963, que foi definida como uma função espacial numérica, variando de um local para outro, apresentando continuidade aparente e cuja variação é complexa. O emprego dessa teoria estatística nos estudos geológicos foi chamado de geoestatística.

A teoria das variáveis regionalizadas pressupõe que cada dado  $Y_i$  é modelado como uma variável aleatória que pode ser expressa pela soma de três componentes, sendo um componente estrutural associado a um valor médio constante ou a uma tendência constante; um componente aleatório, espacialmente correlacionado; e um erro aleatório.

Se  $i$  representa uma posição em uma, duas ou três dimensões, então o valor da variável  $Y$ , em  $i$ , é dado por:

$$Y_i = M_{(x_i)} + W_{(x_i)} + \varepsilon_i \quad (1)$$

Em que:  $Y_i$  é o valor da variável resposta para a observação  $i$ ;  $M_{(x_i)}$  é a variabilidade determinística (“tendência”);  $W_{(x_i)}$  é a variabilidade aleatória ou componente aleatório;  $\varepsilon_i$  é o ruído não-correlacionado (“erro experimental”);  $X_i$  é a posição espacial da observação  $i$ .

### 2.3.2 Semivariograma

O semivariograma é um método da geoestatística que permite verificar a dependência espacial entre observações. Matematicamente, o variograma  $2\gamma(x, h)$  é definido como a esperança matemática do quadrado da diferença entre valores de pontos no espaço, separados por uma distância ( $h$ ):

$$2\gamma(x, h) = E[Z(x) - Z(x + h)]^2 \quad (2)$$

Metade da função variograma é a função semivariograma, que representa uma função de semivariâncias em relação às respectivas distâncias. O estimador da semivariância  $\hat{\gamma}(h)$  é igual à média aritmética das diferenças entre pares de valores experimentais ao quadrado, em todos os pontos separados pela distância  $h$ :

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (3)$$

Em que:  $\hat{\gamma}(h)$  é a semivariância estimada para cada distância ( $h$ ),  $N(h)$  é o número de pares de ponto separados pela distância  $h$ ,  $Z(x)$  é o valor da variável regionalizada no ponto  $x$  e  $Z(x+h)$  é o valor no ponto  $x+h$ .

A função semivariograma permite gerar o gráfico da semivariância em função da distância ( $h$ ), denominado de semivariograma experimental, o qual permite interpretar a continuidade espacial da variável regionalizada, sendo a qualidade deste ajuste de fundamental importância para a precisão do processo de krigagem.

Existem modelos teóricos utilizados no ajuste do modelo teórico de semivariância. Para os modelos mais utilizados (esférico, exponencial e gaussiano), existem três componentes que definem todo o entendimento da Teoria das Variáveis Regionalizadas.

O primeiro componente é o “efeito pepita” ( $\tau^2$ ) ou variação ao acaso. É a variação difícil de ser controlada. Ela pode ser reduzida ou minimizada, à medida que se estuda o comportamento da variável na menor escala. O aumento da qualidade da krigagem está diretamente relacionado com a diminuição do efeito pepita. A segunda componente é conhecida como “patamar” ( $\sigma^2$ ). O patamar mostra o ponto em que parte da variação total é explicada pela componente espacial  $[W(x)]$ . E, por último, o “alcance” ( $\phi$ ), define o ponto até onde existe dependência espacial.

Na Figura 1, está apresentado um semivariograma típico para dados sem tendência e com ruído. A linha tracejada refere-se a um semivariograma sem ruído. Nesse semivariograma estão apresentados os parâmetros que caracterizam a estrutura de autocorrelação espacial: efeito pepita, patamar e alcance.

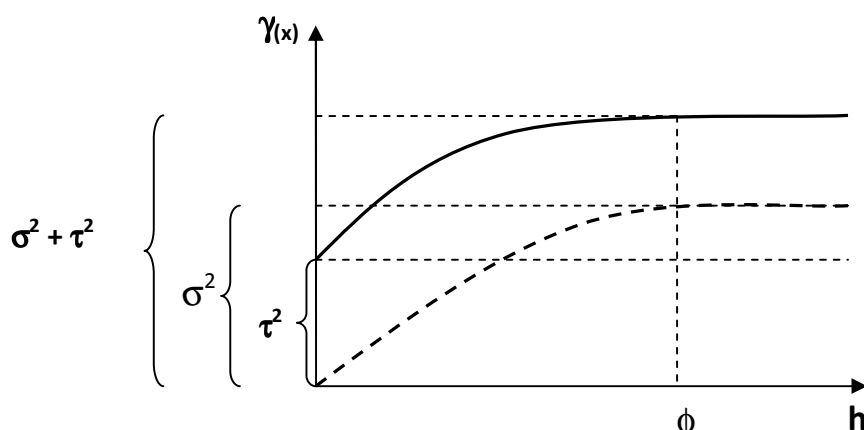


Figura 1: Semivariograma típico para dados sem tendência e com ruído.

### 2.3.3 Krigagem

Conhecido o semivariograma da variável, e havendo dependência espacial entre as amostras, pode-se interpolar valores em qualquer posição dentro da área. O método de interpolação chama-se krigagem, nome que foi dado em homenagem ao matemático sul – africano Krige (LANDIM, 2006).

A diferença entre krigagem e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. No caso de interpolação linear simples, por exemplo, os pesos são todos iguais a  $1/N$  ( $N$  = número de amostras); na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. Na krigagem, os pesos são

determinados, a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. A krigagem efetua as predições com variância mínima e sem viés, sob a validade da hipótese intrínseca da geoestatística. A hipótese intrínseca assume que a  $E\{Z(X_i)}\}$  é igual a média, e que a variância seja constante, dependendo apenas da distância e não da posição.

### 2.3.4 Cokrigagem

Segundo Yamamoto & Landim (2013), a cokrigagem pode ser definida como um procedimento da estatística espacial, a partir do qual se pode estimar um conjunto de diversas variáveis regionalizadas com base na correlação espacial entre elas.

Portanto, no campo das ciências agrárias, observa-se esse método como de grande valia, pois, a partir de variáveis de fácil medição correlacionadas as variáveis de difícil medição, o uso da cokrigagem proporciona resultados altamente satisfatórios aliados a uma redução de custo. Pode-se inferir que a consistência do método se fundamenta na observação da correlação prévia entre as variáveis (WATANABE et al., 2009).

A ferramenta geoestatística que nos permite observar a dependência espacial entre observações para esse método é conhecida como semivariograma cruzado:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \left\{ \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)][Z_2(x) - Z_2(x+h)] \right\} \quad (4)$$

Em que:  $Z(x)$  representa o valor da variável numa certa localização; e  $Z_2(x)$  representa o valor da outra variável para a mesma posição.

A obtenção do semivariograma cruzado empírico apresenta diferença em relação ao semivariograma empírico simples, no ponto onde o alcance do primeiro representa a distância máxima de dependência espacial e não mais a metade da distância. Além disso, quando a existência do patamar é confirmada, seu valor deve-se aproximar do valor da covariância entre as variáveis.

É interessante também notar, que ao contrário do semivariograma empírico simples, este semivariograma cruzado aceita valores negativos, basta para tanto à correlação entre as variáveis ser negativa.

Santos (2013) observou uma melhoria na explicação do estoque de carbono de uma área, a partir da utilização da matéria orgânica como covariável. Estudos como esse, ratificam que, usada corretamente, a cokrigagem proporciona melhoria nos resultados.

### **2.3.5 Krigagem com regressão**

A krigagem com regressão consiste em uma abordagem da geoestatística na qual se busca, primeiramente, estabelecer relações estatísticas, normalmente multivariadas, entre a variável de interesse e variáveis geográficas, com destaque para latitude, longitude, altitude, declividade, continentalidade, distância euclidiana de marcos topográficos importantes, dentre outras, cuja fonte seja geográfica ou topográfica, como um modelo digital de elevação (MDE) ou um modelo digital do terreno (MDT) (MENEZES, 2011). Contudo, outras fontes de informação secundária e correlacionadas com a variável de interesse podem também ser aplicadas, como, por exemplo, o índice de sítio, altura dominante, índice de área foliar, NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), entre outras, as quais podem ser fortemente correlacionadas com a variável principal, tais como o volume de uma floresta.



Vários trabalhos associados ao mapeamento de grandezas com continuidade espacial vêm sendo desenvolvidos, atualmente, com essa abordagem. Destaca-se a aplicação dessa metodologia para mapeamento da erosividade da chuva (MELLO et al., 2013; MEUSBURGER et al., 2012) e mapeamento de atributos do solo e indicadores ambientais associados com a recarga de água subterrânea (MENEZES, 2011). Em todos os trabalhos citados, modelos de regressão linear múltipla são ajustados, aplicando-se procedimento de regressão como *forward*, o qual possibilita selecionar variáveis de entrada do modelo (*inputs*) significativas e que explicam de forma significativa a variável principal. Na maioria das vezes, as variáveis de entrada nesses modelos explicam geograficamente a variável principal, ou possuem boa correlação com a mesma, contudo, devem estar disponíveis em toda a área a ser mapeada.

De acordo com Meusbürger et al. (2012) e Daly et al. (2002), o uso de modelos estatísticos para mapeamento de variáveis climáticas pode apresentar bom desempenho, pois em tais modelos busca-se uma relação de causa e efeito entre a variável principal e as variáveis geográficas, tais como latitude, longitude e altitude. Contudo, Mello et al. (2013) chamam atenção para o fato de que o uso de modelos estatísticos multivariados podem produzir resultados superestimados ou subestimados para determinados locais cujas variáveis de entrada estejam próximas dos limites trabalhados, o que é corrigido com aplicação da krigagem ordinária dos resíduos.

Assim, é plausível que a krigagem com regressão possa produzir melhor resultado entre os interpoladores mais conhecidos por combinar as características do modelo estatístico multivariado, isto é, a relação de causa e efeito com variáveis geográficas, com a geoestatística (abordagem estocástica), a qual é aplicada para produzir um mapa prévio dos resíduos gerados pelo modelo multivariado. Isso significa que o mapa estimado pelo modelo estatístico

multivariado será corrigido com base no mapa dos resíduos, reduzindo distorções que o mapa gerado pelo modelo estatístico possa produzir (MEUSBURGER et al., 2012; MENEZES, 2011).

Após a etapa de ajuste do modelo estatístico multivariado, determinam-se os resíduos gerados pela aplicação do modelo, os quais serão modelados espacialmente com base na geoestatística (HENGL; HEUVELINK; STEIN, 2004). Um primeiro mapa da variável de interesse é gerado com base em um SIG e no modelo estatístico multivariado, cujas entradas são estabelecidas em função das coordenadas geográficas e do MDE (ou MDT). Esse mapa, em formato raster, é então corrigido, somando-o ao mapa de krigagem do resíduo.

#### **2.4 Estudos da variabilidade espacial em florestas**

Em ciências florestais, os estudos de continuidade espacial tiveram início com Martérn (1960). Na sequência, Samra, Gill e Bhatia (1989), procuraram modelar o crescimento de *Melia azedarach* na Índia. Os semivariogramas para as alturas das árvores da espécie estudada revelou um alcance que variou de 17,6 a 20,0 metros. Os autores verificaram que a dependência espacial do crescimento em altura está fortemente ligada a variação de solo. Neste mesmo trabalho, o erro de estimativa da krigagem foi de 9% em relação à altura média dos 3 anos de medição. Wulder, Lavigne e Franklin (1996) apresentaram um trabalho onde utilizaram imagens provenientes de sensoriamento remoto associado a informação espacial, para avaliar parâmetros biofísicos e estruturais de coníferas, tais como: o índice de área foliar e área basal.

Outra técnica importante da amostragem espacial ou krigagem, segundo Kanegae Júnior et al. (2006) é a possibilidade eficiente do estudo espacial como

alternativa para controlar a variação existente na floresta. Sendo assim, o mesmo autor encontrou a partir do uso de técnicas de espacialização, uma forma objetiva na produção de mapas, resultando numa forma alternativa eficaz no controle na variabilidade das florestas plantadas. Sendo assim, a ideia da estratificação, a partir da krigagem resultou num método objetivo e eficiente de forma a gerar uma redução no custo aliada a uma maior precisão do inventário. Guedes et al. (2012) observaram essa mesma lógica, tendo encontrado melhoras expressivas, a partir do uso do interpolador espacial geoestatístico.

## 2.5 Interpolador espacial determinístico

Essa forma de interpolação permite estimar valores para pontos não amostrados, com base em pontos amostrados, atribuindo pesos diferentes para cada amostra, com base na distância em que estas se encontram do ponto a ser amostrado (ALVARENGA et al., 2012)

A estratificação por meio do Inverso da Distância Ponderada (IDW), com expoente 2, sendo, nesse caso, conhecida como Inverso do Quadrado da Distância (IQD), é a seguinte:

$$W = \frac{1}{d^2} \quad (5)$$

Em que:  $W$  é o peso de cada ponto amostrado; e  $d$  é a distância euclidiana entre cada ponto observado e o ponto a ser estimado.

Sendo, o estimador IQD dado pela seguinte expressão:

$$\hat{Z}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (6)$$

Em que:  $\hat{Z}_0$  é o valor estimado para o ponto não amostrado;  $W_i$  é o peso da  $i$ -ésima parcela amostral; e  $Z_i$  é o valor medido da  $i$ -ésima parcela amostral.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição fisiográfica e sócioeconômica de MG

O estado de Minas Gerais é o quarto maior e o segundo mais populoso estado do Brasil, com uma população estimada em cerca de 20,59 milhões de habitantes, tendo uma densidade demográfica de 33,41 habitantes por quilômetro quadrado. Em termos econômicos, Minas Gerais é o estado brasileiro que possui o terceiro maior produto interno bruto, que totalizava 351,38 bilhões de reais, no final do ano de 2010, sendo o rendimento médio per capita de 733 reais, de acordo com o censo realizado em 2010 pelo IBGE.

As condições topográficas mostram altitudes em sua maior parte variando ao longo do estado entre 900 e 1500 metros, sendo, porém, para a região leste encontrada uma acentuada variabilidade de altitude (as menores altitudes, além de possuir o Pico da Bandeira que com 2.891 metros de altitude se apresenta como o ponto mais alto do estado de MG).

O estado de Minas Gerais, no geral, pode ser separado em 6 regionais (regiões), sendo elas a regional Central, Centro-sul, Leste, Noroeste, Norte e Triângulo Mineiro (Figura 2).

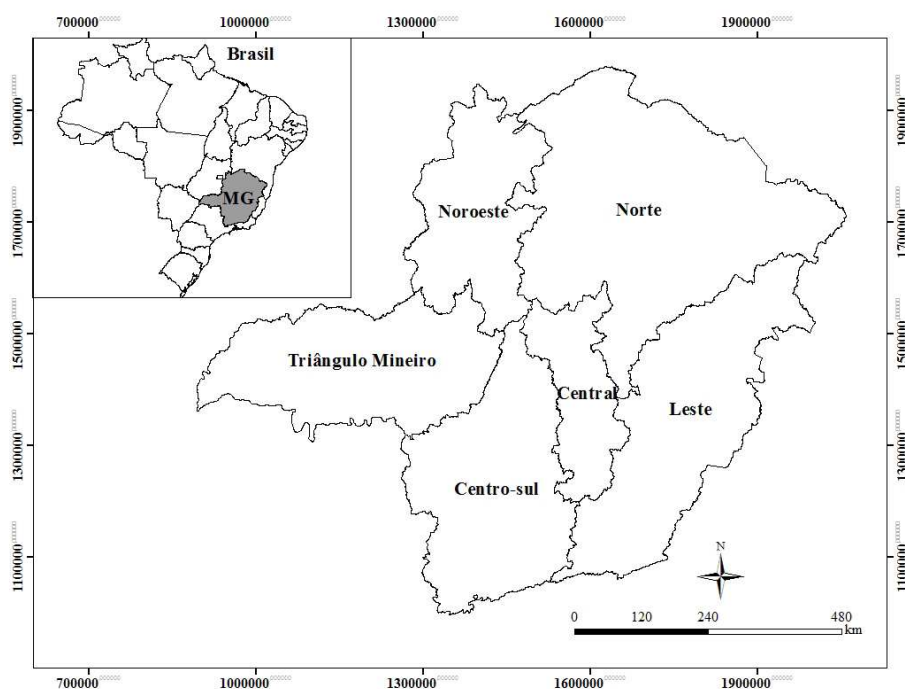


Figura 2: Divisão do estado de Minas Gerais pelas 6 regionais.

Na regional Central, tem-se do sul ao norte predominância dos tipos climáticos B2 (Úmido), B1 (Úmido) e C2 (Subúmido). O solo predominante para essa regional é Cambissolo.

A regional Centro-sul caracteriza-se pela predominância das condições climáticas do tipo B1, B2 e B3 (tipos climáticos úmidos), além dos tipos B4 (Úmido), A (Superúmido), onde o clima sofre influência da Serra da

Mantiqueira e do tipo C2 (Subúmido). Os solos predominantes para essa região são o Latossolo (para o extremo sul), Argissolo e Cambissolo (norte da regional).

Na regional Leste, abrangendo de norte a sul e do centro a leste limitando-se com os estados do Espírito Santo e Bahia, ocorre o clima tipo C1 (Subúmido seco). Mais ao centro, em faixa indo do sul ao norte dessa regional, predomina o tipo climático C2 (Subúmido) e também em áreas isoladas ao norte, leste e sul. Também se verifica a ocorrência do clima caracterizado como B1 (Úmido) para algumas faixas da regional. Além disso, nessa regional, ocorrem pequenas áreas com o tipo climático B4 (Úmido), seguindo com o tipo B3 (Úmido) e B2 (Úmido). O solo predominante para essa regional é o Latossolo, seguido pelo Argissolo (porção central da regional).

Na regional Noroeste, de norte a sul, abrangendo extensa área central, predomina o tipo climático C2 (Subúmido). A oeste ocorre uma faixa de tipo climático B1, assim como no extremo sul dessa regional. Ao norte, nordeste e leste ocorre o tipo climático classificado como C1 (Subúmido). O solo predominante para essa região é o Cambissolo.

Ao extremo norte da Regional Norte, verifica-se a ocorrência do tipo climático D (semiárido). Em maior extensão territorial, em toda essa regional, indo de oeste a leste, predomina o tipo climático C1 (Subúmido). Ao longo da faixa sul desta regional, nota-se a ocorrência de clima C2 (Subúmido) e, em três pequenas áreas isoladas no extremo sul, ocorre o tipo climático B1 (Úmido), além do tipo climático B2 (Úmido). Os solos para a regional Norte apresentam variações quanto aos tipos, sendo, destacadas a presença de Cambissolos, Neossolos, Argissolos e Latossolos.

Na regional do Triângulo Mineiro, há a ocorrência do clima caracterizado como B1 (Úmido). Em segundo, na ordem de extensão territorial,

aparece o tipo climático classificado como B2 (Úmido). Há a ocorrência também do tipo climático C2 (Subúmido) em estreita faixa a nordeste dessa regional e ainda uma pequena área do clima tipo B3 (Úmido) ao extremo sudeste dessa regional. O solo predominante é o Latossolo.

Na Tabela 1, apresentam-se os valores médios de precipitação média anual (mm) e temperatura média anual (°C) para os tipos climáticos.

Tabela 1 - Valores médios de precipitação e temperatura média anual.

<b>Tipo Climático</b>	<b>Precipitação (mm)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
A	1750	14,0
B4	1700	16,0
B3	1600	18,0
B2	1550	19,5
B1	1500	21,5
C2	1250	22,0
C1	975	23,5
D	850	25,0

### **3.2 Amostragem e determinação do estoque de carbono da parte aérea nas espécies arbóreas de cada um dos Biomas de MG**

Os dados utilizados neste estudo são provenientes de 163 fragmentos constituintes dos Biomas Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica, nos quais foram mensuradas 4146 parcelas de 1000 m<sup>2</sup>. Os dados utilizados nas análises foram os 163 fragmentos, pelo fato do interior de um fragmento nativo no geral ser muito heterogêneo. Tornou-se válida a atribuição de valores médios para cada fragmento, pois além da heterogeneidade verificada dentro dos fragmentos

nativos, também se observa, conforme a Tabela 2, o quão variável são as estruturas entre os mesmos, pela existência de 3 Biomas, no estado de MG. A atribuição do valor médio para o fragmento proporcionou uma análise mais coerente, tendo-se em vista que analisar os dados por parcela poderia resultar num mascaramento da estrutura espacial da variável estoque de carbono ao longo do estado de MG.

Os levantamentos das áreas foram efetuados por ocasião da realização do inventário da flora nativa e dos reflorestamentos do estado de Minas Gerais, conforme metodologia descrita por Scolforo et al. (2008d); Scolforo et al. (2008e); Scolforo et al. (2008f).

Para cada Bioma, diversos fragmentos foram selecionados na busca da melhor representação do atual estágio florestal no estado de Minas Gerais (Figura 3). Na Tabela 2, apresentam-se as estatísticas descritivas gerais para cada Bioma, evidenciando o quão variável são as estruturas entre os mesmos.

Tabela 2 - Estatísticas descritivas referentes a cada bioma.

<b>Bioma</b>	<b>N/ha</b>	<b>G(m<sup>2</sup>/ha)</b>	<b>V<sub>med</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Nº espécies</b>
Caatinga	1028	12,96	97,49	554
Cerrado	552	9,91	55,02	1602
Mata Atlântica	1395	23,91	246,4	1998

N/ha: número de indivíduos por hectare; G: área basal; V<sub>med</sub>: volume médio.



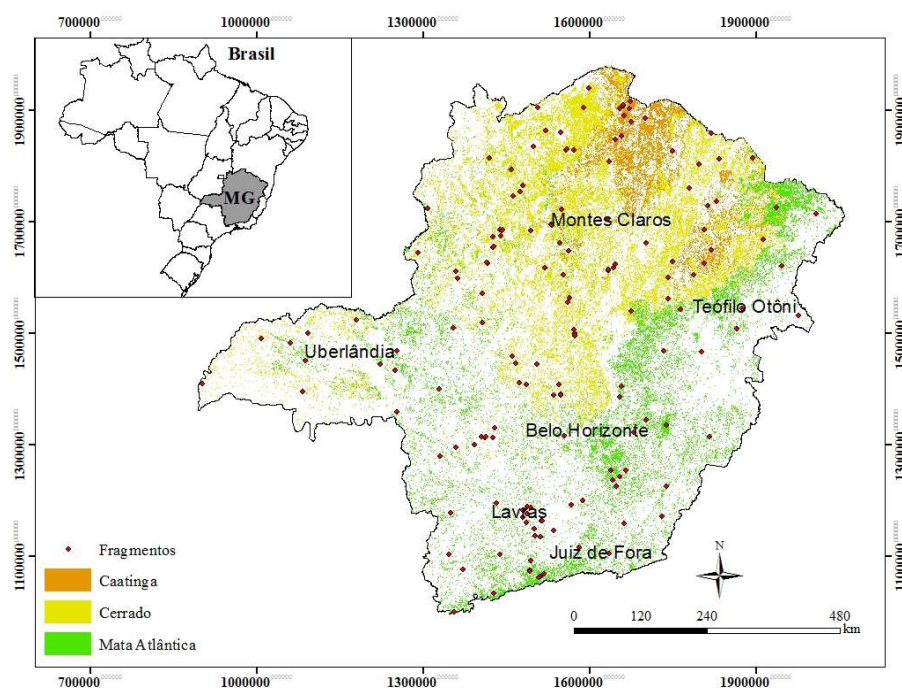


Figura 3: Localização geográfica do estado de MG, com a distribuição espacial dos Biomas e dos fragmentos analisados.

Para os 3 Biomas, realizou-se a cubagem rigorosa, a qual contemplou 1.091 árvores distribuídas por classe de diâmetro e altura e proporcionalizadas pela densidade relativa das espécies amostradas nos 163 fragmentos.

Foram colhidos discos nas posições de 0%, 25%, 75% e 100% da altura da planta e, destes, retiradas as maravalhas que foram tratadas para se avaliar o carbono existente. O percentual de carbono de cada planta foi ponderado pela matéria seca da seção entre um disco e outro, considerando-se toda planta. O sistema de análise do carbono realizado foi o da combustão completa da

amostra, seguida por redução, separação cromatográfica e detecção dos produtos em detector de condutividade térmica.

Pôde-se então desenvolver equações para volume, peso de matéria seca e carbono, as quais aplicadas às árvores das parcelas de cada um dos 163 fragmentos amostrados propiciaram as estimativas do estoque de carbono por fragmento, sendo que, para cada Bioma, as equações foram desenvolvidas por fitofisionomia, conforme as equações (RUFINI et al., 2010; SCOLFORO et al., 2008g):

### **Bioma Caatinga**

$$C = e^{-10,7501678493+2,0580637328\ln(DAP)+0,8604515609\ln(H)} \quad (7)$$

### **Bioma Cerrado**

Campo cerrado e cerrado *sensu stricto*:

$$C = e^{-11,1279639766+2,3816314802\ln(DAP)+0,6106838246\ln(H)} \quad (8)$$

Cerradão:

$$C = e^{-10,8771683824+2,6359736325\ln(DAP)+0,60878059946\ln(H)} \quad (9)$$

## **Bioma da Mata Atlântica**

Floresta Estacional Semidecidual:

$$C = e^{-10,9520199234+2,0898526615\ln(DAP)+0,8096162241\ln(H)} \quad (10)$$

Floresta Ombrófila

$$C = e^{-11,319842099+2,1415723631\ln(DAP)+0,8134282561\ln(H)} \quad (11)$$

Em que:  $C$  é o estoque de carbono da parte aérea em Mg para cada indivíduo arbóreo;  $e$  é a base do logaritmo natural;  $\ln$  é o logaritmo natural;  $DAP$  é o diâmetro medido a 1,30 metros do solo (cm);  $H$  é a altura total do indivíduo (m).

### **3.3 Mapeamento do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG**

O mapeamento do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea de Minas Gerais foi feito, através das técnicas do inverso do quadrado da distância, krigagem ordinária, cokrigagem e krigagem com regressão.

#### **3.3.1 Interpolador determinístico**

A predição pelo interpolador determinístico se deu por meio do Inverso da Distância Ponderada (IDW), com expoente 2, sendo, neste caso, conhecido como Inverso do Quadrado da Distância (IQD), descrito por Yamamoto (2001).

A predição, a partir desse interpolador apresenta vantagens em relação a outros interpoladores, pois ele não exige análise mais trabalhosa dos dados, o que certamente torna o processo menos oneroso, e para casos onde a estrutura de continuidade espacial é fraca, este interpolador apresenta resultado semelhante à krigagem (SOUZA et al., 2010), porém para áreas com estrutura espacial detectada, a krigagem é recomendada, pelo fato de não causar viés de estimativa, ao contrário do interpolador determinístico, que para qualquer situação pode ter sua acurácia prejudicada, resultando em viés de estimativa.

### **3.3.2 Estudo variográfico**

O estudo variográfico foi constituído das ações de geração do semivariograma experimental, modelagem do modelo teórico do semivariograma para aplicação da krigagem ordinária, cokrigagem, e krigagem ordinária dos resíduos, para aplicação da krigagem com regressão.

Foram ajustados os modelos exponencial, esférico e gaussiano, descritos por Journel e Huijbregts (1978) pelo método dos mínimos quadrados ponderados, para a obtenção do conjunto de parâmetros a serem utilizados na estimação da krigagem ordinária, cokrigagem e krigagem com regressão. Os ajustes foram feitos pelo programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013), por meio do pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLE, 2001).

### **3.3.3 Krigagem ordinária**

A predição dos pontos não amostrados efetuada a partir da krigagem ordinária foi descrita, inicialmente, por Journel e Huijbregts (1978), sendo, atualmente, descrita por Meusburger et al. (2012) e Hengl, Heuvelink e Stein (2004), dentre outros.

Nesta abordagem, a identificação dos pesos foi obtida com os parâmetros do semivariograma ajustado para a característica avaliada (estoque de carbono). O estimador da krigagem ordinária é dado pela equação:

$$\hat{Z}_{X_0} = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{x_i} \quad (12)$$

Em que:  $\hat{Z}_{X_0}$  é a estimativa do valor na posição  $X_0$ ;  $n$  é o número de pontos amostrais vizinhos utilizados para a predição do valor não amostrado  $\hat{Z}_{X_0}$  (vizinhança da krigagem);  $\lambda_i$  é o  $i$ -ésimo peso atribuído a cada  $i$ -ésima observação da variável de interesse na posição  $X$ ;  $Z_{x_i}$  é o valor observado.

### 3.3.4 Cokrigagem

A estimação dos pontos não amostrados efetuada a partir da cokrigagem foi descrita por Yamamoto e Landim (2013), dentre outros, a qual é uma extensão da krigagem, onde uma ou mais variáveis de fácil medição ajudam a explicar uma variável primária de difícil mensuração, sendo estas correlacionadas (WU et al., 2009).

Para esta abordagem, a identificação dos pesos foi obtida com os parâmetros do semivariograma cruzado ajustado para a característica (estoque de carbono).

A variável auxiliar foi a latitude. Células georreferenciadas contínuas espaçadas de 10.000 m em 10.000 m foram criadas em toda a extensão da vegetação existente no estado de Minas Gerais com o programa ArcMap (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 2010), de forma a se obter os valores de latitude.

Para esta abordagem, a identificação dos pesos foi obtida com os parâmetros do semivariograma cruzado ajustado, sendo o estimador da cokrigagem dado pela equação:

$$\hat{Z}_{X0} = \sum_{i=1}^{n1} \lambda_{1i} Z_{1i} + \sum_{i=1}^{n2} \lambda_{2i} Z_{2i} \quad (13)$$

Em que:  $\hat{Z}_{X0}$  é a estimativa do valor na posição  $X0$ ;  $n$  é o número de pontos amostrais vizinhos utilizados para a predição do valor não amostrado  $\hat{Z}_{X0}$  (vizinhança da krigagem);  $\lambda_{1i}$  e  $\lambda_{2i}$  são os  $i$ -ésimos pesos atribuídos a cada  $i$ -ésima observação das variáveis  $Z_{1i}$  (variável observada) e  $Z_{2i}$  (covariável observada).

### 3.3.5 Krigagem com regressão

A krigagem com regressão consiste da combinação entre dois interpoladores espaciais, sendo um do tipo global e outro estocástico. O primeiro diz respeito à aplicação de um modelo geográfico de regressão linear múltipla, o qual capta, de forma global, o comportamento da variável principal, ou seja, aquela que se deseja mapear. Esse interpolador produzirá um mapa global, sendo possível identificar o comportamento espacial geral da variável, contudo, sem

um detalhamento de locais mais específicos (MELLO et al., 2013). Para que o mapa final contenha um maior detalhamento de áreas específicas, é necessário que haja uma correção do primeiro mapa, desenvolvido exclusivamente a partir do modelo de regressão. Assim, aplica-se a krigagem ordinária aos resíduos gerados pelo modelo geográfico com o objetivo principal de corrigir tendências e detalhar o comportamento espacial da variável principal, introduzindo um aspecto estocástico ao mapeamento (MELLO et al., 2013; MEUSBURGER et al., 2012).

Para ajuste dos modelos lineares multivariados foram utilizados os dados de Latitude e de Altitude, a partir do modelo digital de elevação (DEM).

Nesse intuito, a regressão linear múltipla aplicada para o ajuste do modelo geográfico foi:

$$C = b_0 + b_1 \times A + b_2 \times LA + b_3 \times A^2 + b_4 \times LA^2 + b_5 \times A^3 + b_6 \times LA^3 + b_7 \times A \times LA + b_8 \times A \times LA^2 + b_9 \times A^2 \times LA + b_{10} \times A^2 \times LA^2 \quad (14)$$

Em que:  $C$  é o estoque de carbono (Mg/ha);  $LA$  e  $A$  são a latitude e a altitude, respectivamente, em metros; e  $b_i$  são os parâmetros a serem estimados.

O estoque de carbono foi aplicado ao ajuste do modelo, em decorrência de seu caráter direto quanto ao comportamento do crescimento de florestas, tendo-se como referência o comportamento edafoclimático geral da área. Essa variável sofre direta influência da latitude e altitude, pois essas duas variáveis geográficas são correlacionadas quanto às variações de temperatura, precipitação e radiação solar, conforme mencionado por Mello e Silva (2009).

Para ajuste do modelo foi utilizada a técnica Stepwise através do software R 3.0.0, aplicando o comando chamado Step e definindo a direção a ser seguida, Back, For ou Both. Esse procedimento admite a avaliação estatística, individualmente, de todos os indicadores, que podem ter influência sobre a variável dependente, por meio do teste "t" de Student parcial. Assim, é possível avaliar a contribuição de cada variável independente do modelo, que tem o coeficiente parcial de determinação ( $R^2$  parcial) como uma ferramenta de análise estatística. Para evitar a colinearidade, o procedimento "Step" seleciona apenas as variáveis significativas dadas por "t" de Student, rejeitando aquelas variáveis não significativas ou redundantes, de acordo com uma tolerância específica (5% para este estudo) (FERREIRA, 2009).

Para testar a eficiência do modelo ajustado foi aplicada e caracterizada a estatística de precisão Erro Médio Absoluto:

$$EMA(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|O_i - P_i|}{O_i} \right)}{n} \times 100 \quad (15)$$

Em que:  $O_i$  e  $P_i$  são os valores da variável estoque de carbono observados e preditos, respectivamente; e  $n$  corresponde ao número de fragmentos.

Gráfico de dispersão dos valores preditos ao redor da reta 1:1 também foi gerado com o objetivo de analisar o comportamento das predições realizadas pelo modelo.

A partir desse processo determinou-se o comportamento dos resíduos, para que se procedesse à análise quanto ao comportamento da continuidade



espacial dos mesmos, ou seja, estudando-se sua autocorrelação espacial como função da distância, ajustando-se modelos teóricos de semivariograma ao semivariograma experimental por meio do programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013), com o uso do pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGLLE, 2001). Sendo assim, o mapa de krigagem ordinária do resíduo foi desenvolvido.

Para a aplicação da krigagem com regressão, células georreferenciadas contínuas com dimensões de 100 m x 100 m foram criadas em toda a extensão da vegetação existente no estado de Minas Gerais com o programa ArcMap (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 2010). Em cada uma dessas células, foram caracterizadas a latitude e a altitude e o modelo de regressão foi aplicado às mesmas, gerando o mapa global de estimativa de estoque de carbono. Na sequência, com base no mapa de krigagem do resíduo gerado para a área, os valores deste foram extraídos para cada célula, possibilitando corrigir os valores gerados pelo modelo de regressão.

### **3.4 Determinação da melhor forma de mapeamento da distribuição do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea no estado de MG**

A seleção da melhor forma de mapeamento (inverso do quadrado da distância, krigagem ordinária, cokrigagem e krigagem com regressão) foi baseada em critérios visuais e estatísticos. A avaliação estatística foi conduzida por meio do erro médio reduzido.

Além disso, a qualidade entre os mapeamentos foi realizada a partir do módulo Spatial Analyst, implantado no programa ArcMap (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 2010), por meio da ferramenta Multivariate - Band Collection Statistics. Por essa ferramenta,

primeiramente os pixels têm de ser comuns entre os mapas, para que possa ser efetuado o processamento. Dessa forma, a ferramenta realiza a análise pixel a pixel entre os mapas de forma a observar a correlação entre os mesmos ao longo da área de interesse. Portanto, a ferramenta gera uma matriz de correlação entre os mapas de distribuição espacial.

Para testar, quantitativamente, qual forma de mapeamento gerou estimativas mais confiáveis, foi aplicada e caracterizada a estatística de precisão Erro Médio Reduzido, conforme Cressie (1993). Essa estatística foi válida, pois, por exemplo, atribuiu-se o valor médio do estoque de carbono para cada fragmento, ou seja, o estoque de carbono presente no fragmento foi representado pela coordenada central do mesmo que está representando um hectare (estoque de carbono dado em Mg/ha). Imaginando, então, um fragmento de 5 hectares, tem-se os outros 4 hectares (quadrículas) que contém o mesmo valor do estoque de carbono em relação a esse valor central, porém eles estão sendo estimados pelo modelo. Dessa forma, pode-se avaliar, dentro do fragmento, o quanto as estimativas geradas estão variando em relação ao valor observado.

$$EMR = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{\sigma} \quad (16)$$

Em que:  $O_i$  e  $P_i$  são os valores da variável estoque de carbono observados e preditos, respectivamente;  $n$  corresponde aos número de valores preditos para cada quadrícula dos fragmentos em relação aos valor central de cada fragmento que é igual ao valor observado; e  $\sigma$  é o desvio padrão espacial.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Modelagem variográfica para a krigagem ordinária**

A avaliação da continuidade espacial de uma dada característica passa necessariamente pela seleção do melhor modelo de semivariância possível. A escolha adequada do modelo permite a representação confiável da estrutura de dependência espacial da característica ou variável aleatória no processo de krigagem (NIELSEN; WENDROTH, 2003). Para o presente estudo, o modelo que melhor se ajustou aos pontos do semivariograma experimental foi o modelo exponencial. Na Figura 4, estão apresentados os semivariogramas experimental e modelado para a variável estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas do estado de MG.

Pela análise variográfica, fica nítida a existência da estrutura espacial para a variável, ou seja, existe uma função estrutural com semivariância modelável, sendo possível avaliar que o modelo exponencial se ajustou de forma adequada, permitindo modelar a continuidade espacial do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea nos Biomas de MG.

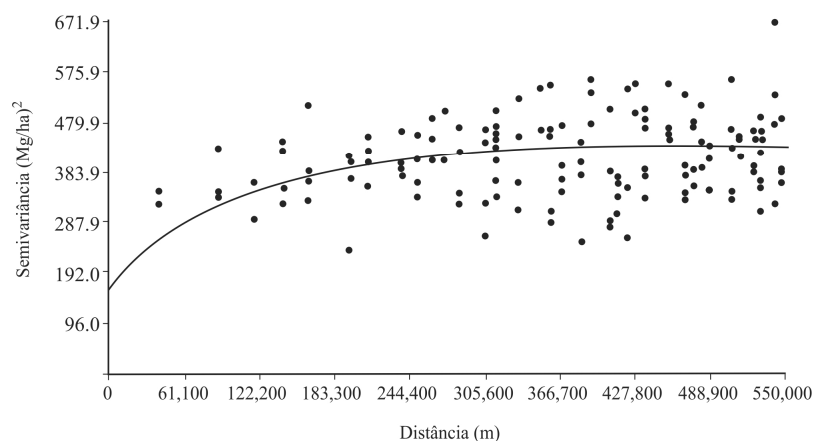


Figura 4: Semivariograma unidirecional teórico e experimental para a variável estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea (Mg/ha) dos Biomas de Minas Gerais.

O alcance do semivariograma modelado representa a distância máxima dentro da qual a característica apresenta-se correlacionada espacialmente. Pelo alcance do presente estudo, os dados estão correlacionados até uma distância de 311.831,60 m.

O alcance encontrado neste estudo, embora grande, é compatível com a extensão territorial e a média de densidade de pontos de amostragem de fragmentos no estado de MG. Hengl, Heuvelink e Rossiter (2007), estudando o mapeamento da matéria orgânica do solo na Croácia, encontrou um alcance de 84.129 m, considerando que a Croácia é cerca de 10 vezes menor que o estado de MG e que a rede de densidades de pontos amostrados foi menor, torna-se factível esse valor.

O efeito pepita refere-se a variação não explicada pela componente espacial, ou seja, para sua redução, seria necessária uma amostragem mais intensa ao longo do estado, porém a amostragem realizada foi suficientemente

adequada para que esse parâmetro não prejudicasse a observação da existência da estrutura de continuidade espacial para a distribuição do estoque de carbono, ao longo do estado, sendo o seu valor relativamente médio, ao ponto de que a contribuição, também, apresentou um valor mediano. Por meio desses valores de efeito pepita e contribuição, verificou-se que a característica avaliada apresentase, moderadamente, estruturada no espaço, conforme Cambardella et al (1994), com grau de dependência acima de 63%.

#### **4.2 Modelagem variográfica para a cokrigagem**

A utilização de variáveis secundárias pode ser de grande valia, pois se as variáveis de fácil obtenção conseguirem explicar, ao menos, parcialmente, o comportamento da variável primária, no caso o estoque de carbono, a cokrigagem pode resultar em melhoria das estimativas (VIOLA et al., 2010).

Para o estado de MG, a variável secundária latitude foi obtida de forma facilitada, resultando num conjunto de 5870 amostras, sendo 163 coincidentes aos locais com dados obtidos da amostra de campo de estoque de carbono e o restante em locais não amostrados quanto ao estoque de carbono, resultando, assim, numa base heterotrópica parcial, ou seja, ideal quando se procura significância, a partir do uso da cokrigagem. Conforme já indicado por Viola et al. (2010) e Watanabe et al. (2009), é necessário que exista correlação dessas variáveis secundárias às variáveis primárias. Sendo assim, pode-se observar pela Tabela 3 que a variável apresentou-se significativamente correlacionada quanto à distribuição do estoque de carbono.

Tabela 3 - Coeficientes de correlação de Pearson entre estoque de carbono (Mg/ha) e as variáveis latitude, longitude e altitude.

Variável	Latitude	Longitude	Altitude
Estoque de Carbono	-0,5187 <sup>a</sup>	-0,1160 <sup>ns</sup>	0,2205 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Significativo a 5%

Verifica-se, pela Tabela 3, que a variável altitude também apresentou correlação significativa com a variável principal, porém o uso da cokrigagem é recomendado para casos onde a variável primária e secundária apresentem alta correlação, ao ponto de Yates e Warrick, citados por Basaran et al. (2011) verificarem que a cokrigagem apresenta melhores resultados em relação à krigagem, quando a correlação entre as variáveis primária e secundária excedem 0,5. Portanto, o semivariograma cruzado foi modelado com o auxílio da variável latitude.

Na Figura 5, estão apresentados os semivariogramas cruzado experimental e modelado para a variável estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas, do estado de MG, com o auxílio da variável secundária latitude.

Pela análise variográfica, fica nítida a existência da estrutura espacial para a variável estoque de carbono aéreo combinada à latitude, variável selecionada por carregar os efeitos de precipitação e temperatura, segundo Mello e Silva (2009), ou seja, existe uma função estrutural com semivariância modelável, sendo possível avaliar que o modelo exponencial se ajustou de forma adequada.

Pelo alcance do presente estudo, os dados estão correlacionados até uma distância de 330.000 m. O efeito pepita apresentou valor relativamente médio, ao ponto de que a contribuição apresentou um valor superior ao da contribuição

advinda da krigagem ordinária, ou seja, verificou-se que a inclusão da latitude como covariável aumentou o grau de continuidade espacial para a variável analisada.

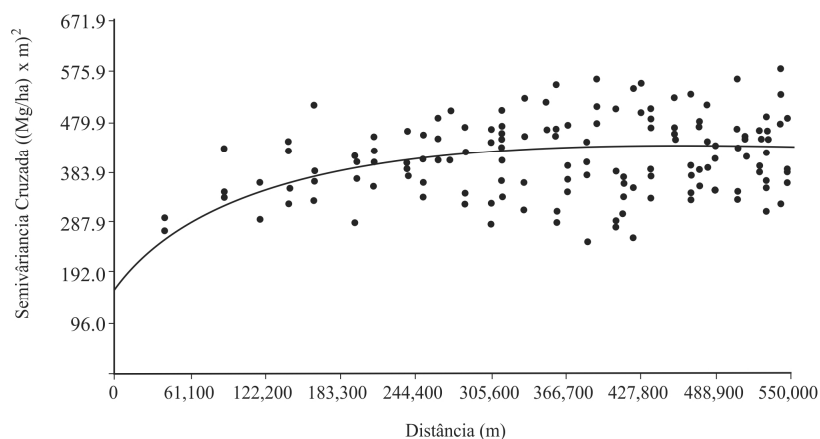


Figura 5: Semivariograma cruzado unidirecional teórico e experimental para a variável estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea (Mg/ha) dos Biomas de Minas Gerais.

#### 4.3 Aplicação da krigagem com regressão

A krigagem com regressão foi separada em duas partes: geração do modelo geográfico do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG em relação às variáveis geográficas e, posteriormente, a krigagem dos resíduos gerados pelo modelo.

#### **4.3.1 Modelagem do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG (Modelo Geográfico)**

Os coeficientes de Pearson entre o estoque de carbono e as variáveis latitude, longitude e altitude foram apresentados na Tabela 3. Esse é um importante passo para a realização de uma modelagem consistente, pois o teste direciona quais variáveis geográficas têm um real impacto significativo na relação com a variável independente.

Pela Tabela 3, a latitude associou-se mais fortemente quanto à explicação da distribuição do estoque de carbono no estado de MG. Interessante observar que latitude e altitude apresentaram correlação significativa com o estoque de carbono, sendo a primeira negativa e a segunda positiva. Oposto a essas variáveis está a longitude que apresentou correlação negativa, porém não significativa ao nível de  $\alpha$  igual a 0,05.

A correlação negativa aponta aumento nos estoques de carbono com a diminuição da latitude e a correlação positiva indica aumento dos estoques com o aumento de altitude. Essa lógica faz sentido, no estado de MG, pois, segundo o Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais – ZEE (CARVALHO et al., 2008), a redução da latitude é acompanhada, em termos, pelo aumento da precipitação e pela redução da temperatura no estado, ou seja, como o aumento da precipitação e a diminuição da temperatura até certo ponto (a medida que se aproxima do sul do estado, a temperatura tem o efeito negativo quanto à estocagem de carbono, assim como a temperatura excessiva no norte do estado) trazem o aumento do estoque de carbono, essa correlação negativa pronunciada faz sentido.

Já, para a altitude, seu aumento em regiões onde as temperaturas médias anuais são altas, traz um melhor equilíbrio quanto ao fator radiação, porém para



os demais pontos do estado de MG, essa variável não tem efeito positivo, apresentando, por isso, uma correlação não tão pronunciada.

As estatísticas de precisão quanto ao modelo ajustado, o qual foi em função apenas das variáveis geográficas significativas estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Erro Médio Absoluto (EMA (%)), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o teste de Shapiro-Wilk (SW).

EMA (%)	$R^2$	SW
74,95%	0,40	0,984; 0,049 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Significativo a 5%

O modelo ajustado apresentou um valor de  $R^2$  aceitável, decorrente da ampla variação encontrada entre os dados do estudo. Essa ampla variação demonstra como as condições dos fragmentos pertencentes aos domínios dos 3 Biomas de MG são distintos. É importante considerar a complexidade da variável estoque de carbono em questão, tais como, os fragmentos têm diferentes graus de antropização, estão em estágios sucessionais diferentes, sítios diferentes, árvores com portes em diâmetro e altura diferentes, o que, por si só, já acarreta um aumento da variabilidade vegetal (SCOLFORO et al., 2008d; SCOLFORO et al., 2008e; SCOLFORO et al., 2008f).

Com relação ao erro médio absoluto (EMA (%)), o modelo apresentou um valor de 74,95%. Novamente, considerando-se a complexidade na modelagem dos estoques de carbono em grandes áreas e com grande heterogeneidade, esse valor pode ser considerado satisfatório, uma vez que os estoques de carbono são uma complexa interação de fatores edafoclimáticos (SALTON et al., 2011; SHEIKH; KUMAR; BUSSMANN, 2009).

Um detalhe quanto à confiabilidade do modelo ajustado se dá na questão da normalidade dos resíduos. O pressuposto básico da regressão é de que estes sejam normais, o que foi comprovado pelo teste de Shapiro-Wilk.

Complementando a análise desse modelo geográfico, pode-se verificar, pela Figura 6, a distribuição dos valores observados em relação aos estimados. Quanto maior a proximidade dos valores observados em relação aos estimados, melhor o ajuste, ou seja, maior a precisão e menor a chance de ocorrer algum viés de estimativa e, conseqüentemente, soma dos resíduos tendendo a zero.

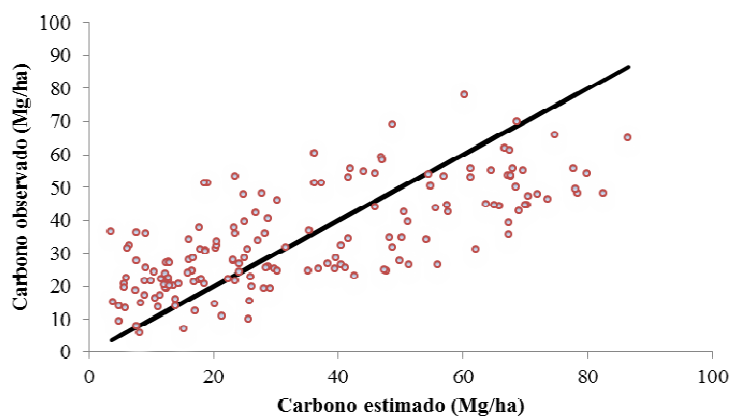


Figura 6: Gráficos de tendência a partir da equação geográfica ajustada para o estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea em Minas Gerais.

Na Tabela 5, apresenta-se o resultado do modelo multivariado selecionado, mostrando os coeficientes estimados e também o teste “t” de Student para cada variável. No modelo, não houve nenhum coeficiente não significativo e a todos eles apresentaram alta significância estatística, tornando o modelo confiável.

Tabela 5 - Ajuste do modelo com coeficientes estimados pela regressão e a significância estatística (Student “t” test) dos coeficientes estimados.

Coeficiente estimado para regressão	Variável	Valores
b0	Intercepto	1,14e+03 <sup>a</sup>
b1	A	-1,80e+00 <sup>a</sup>
b2	LA	-1,51e-03 <sup>a</sup>
b3	A <sup>2</sup>	8,65e-04 <sup>a</sup>
b4	LA <sup>2</sup>	5,27e-10 <sup>a</sup>
b5	LA*A	2,70e-06 <sup>a</sup>
b6	LA <sup>2</sup> *A	-1,04e-12 <sup>a</sup>
b7	LA*A <sup>2</sup>	-1,38e-09 <sup>a</sup>
b8	LA <sup>2</sup> *A <sup>2</sup>	5,58e-16 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Significativo a 5%; A=altitude; LA=latitude; A e LA em metros.

#### 4.3.2 Krigagem dos resíduos

Avaliando-se a Figura 7, verifica-se que o modelo ajustado para o semivariograma dos resíduos, apresentou-se estruturado espacialmente, demonstrando que a krigagem ordinária do mesmo apresentará mapa de boa qualidade e inferência confiável sobre o comportamento dos resíduos nas células desenvolvidas para aplicação à krigagem com regressão, sendo o modelo exponencial ajustado de forma adequada.

O semivariograma dos resíduos derivados das estimativas do modelo geográfico está apresentado na Figura 7 e mostra uma estrutura de continuidade espacial com alcance de 304.131 m.

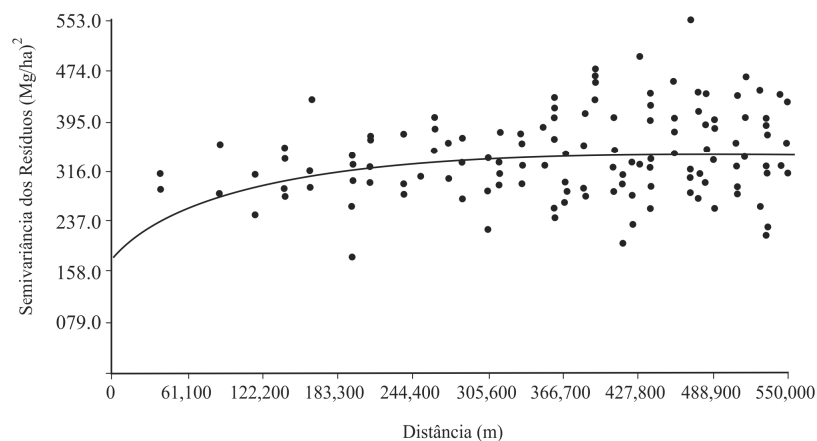


Figura 7: Semivariograma unidirecional teórico e experimental para os resíduos da variável estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea (Mg/ha) dos Biomias de Minas Gerais.

O efeito pepita e a contribuição apresentaram valores relativamente medianos, porém, ainda permitindo verificar a continuidade espacial da variável. Por meio desses valores de efeito pepita e contribuição, verificou-se que a característica avaliada apresenta-se moderadamente estruturada no espaço, conforme Cambardella et al (1994), com grau de dependência acima de 46%.

#### 4.4 Mapas do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomias de MG

Pelo estudo variográfico, foi possível verificar que a variável estoque de carbono apresentou estrutura de correlação espacial. Isso implica em afirmar que há relação entre os fragmentos amostrados. Essa relação permite utilizar técnicas robustas, capazes de levar em consideração a correlação no processo de interpolação da variável em pontos não amostrados. Kanegae Júnior (2004)

observou que o fato de não considerar o efeito da estrutura espacial, quando existente a partir dos interpoladores geoestatísticos, pode acarretar em superestimativas para a variável de interesse estudada.

#### 4.4.1 Interpolação pelo Inverso do Quadrado da Distância

Esse tipo de interpolação é útil quando não há continuidade espacial da variável de interesse ao longo da área. Na Figura 8, apresenta-se o mapa do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG, por meio do IQD.

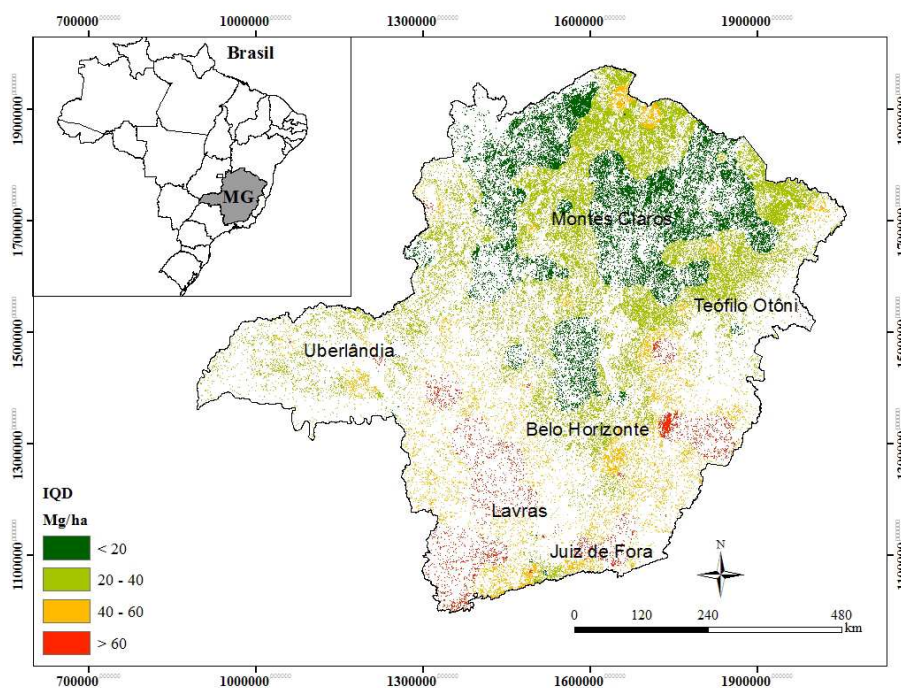


Figura 8: Mapa dos valores interpolados do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG por meio do IQD.

No presente estudo, essa forma de mapeamento foi apresentada, para mostrar como ocorreu o enviesamento das estimativas por esse interpolador: formação de ilhas em excesso, conhecidas como “bull eyes”, e como a amostragem considerou todo o estado de MG, o IQD apresentou superestimativa do estoque de carbono para algumas regiões.

Para a região próxima de Teófilo Otôni, existe uma faixa vermelha indicando alta concentração de carbono onde, na verdade, a concentração se apresenta de média a alta, sendo essa mesma situação recorrente para uma pequena faixa do noroeste mineiro e outra próxima a Uberlândia.

Essas superestimativas são explicadas, pois, pelo interpolador determinístico, o somatório de pesos pode ultrapassar 1, sendo assim, ele não trata, necessariamente, de que locais próximos tendem a ser mais parecidos, seus pesos estão em relação à ponderação, em razão da distância euclidiana. Já, a utilização de interpoladores espaciais evita esse enviesamento, pois com a estrutura espacial detectada para a variável de interesse na área, os interpoladores espaciais estocásticos funcionam de forma probabilística, ou seja, o somatório dos pesos para estimar locais não amostrados é igual a 1, sendo, assim, a inclusão da probabilidade reduz a chance de se criar falsos locais de alta produtividade, por exemplo, no meio de um grande local de baixa produtividade.

#### **4.4.2 Interpolação pela krigagem ordinária**

Utilizando-se o interpolador da krigagem, aquele que permite dar pesos diferentes em relação aos pesos amostrais, conforme o grau de correlação espacial, foi possível interpolar os estoques de carbono para toda a área de

vegetação de MG. Na Figura 9, demonstra-se a espacialização do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG.

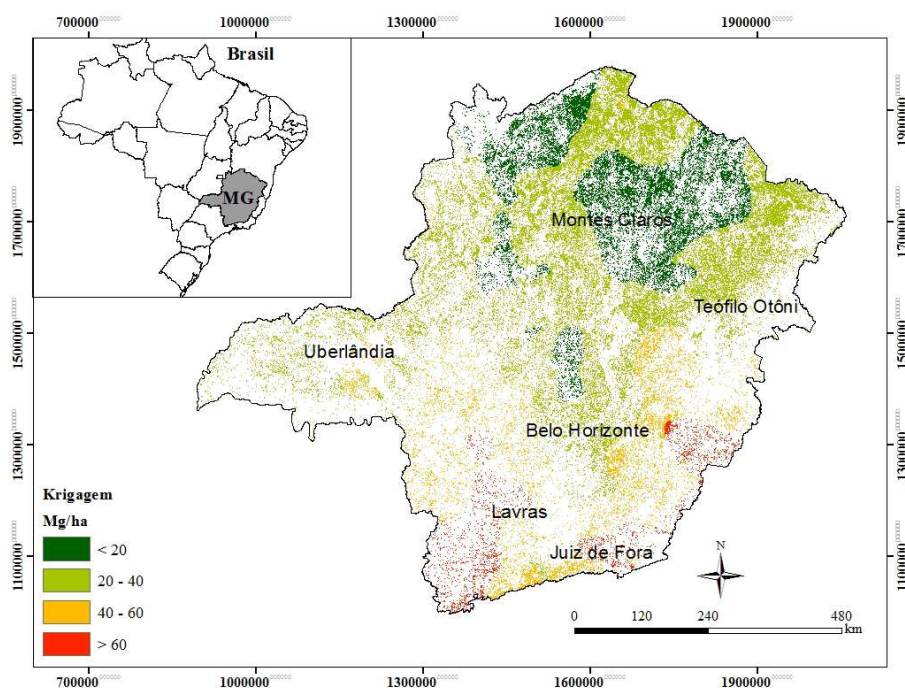


Figura 9: Mapa dos valores interpolados do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG, por meio da krigagem ordinária.

#### 4.4.3 Interpolação pela Cokrigagem

Como observado, houve correlação entre a variável principal, estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG, e a variável geográfica latitude. A estimativa dessa variável principal em pontos não amostrados deve ser feita com o auxílio da variável secundária, a qual é fácil de

ser obtida para toda a área. Na Figura 10, demonstra-se a espacialização do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG, com o auxílio da variável geográfica latitude.

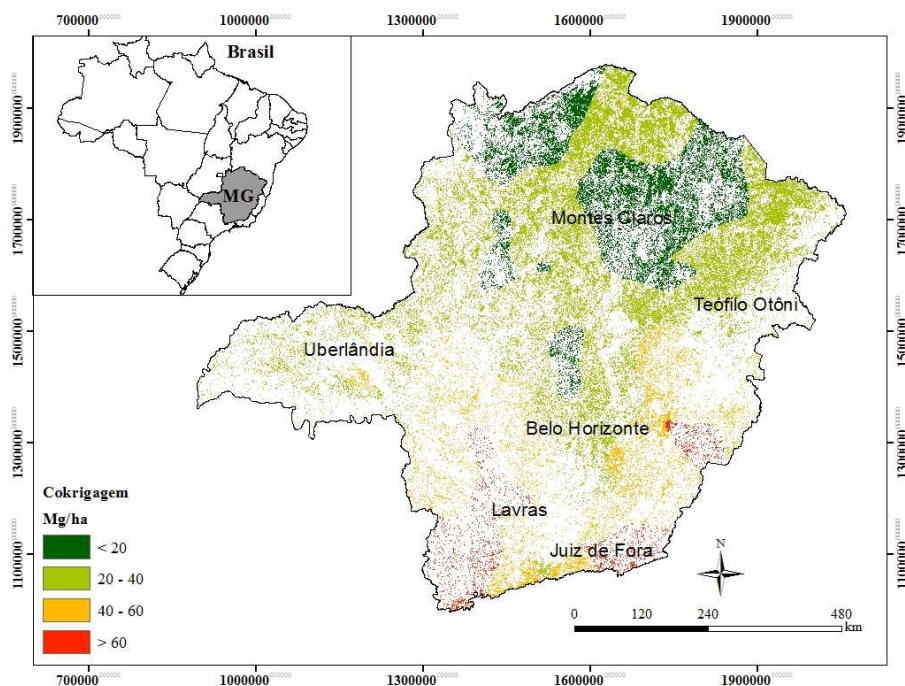


Figura 10: Mapa dos valores interpolados do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG, por meio da cokrigagem.

#### 4.4.4 Interpolação pela krigagem com regressão

Os mapas de krigagem do resíduo e do modelo geográfico estão apresentados na Figura 11, e é possível observar alguns aspectos importantes, além de enfatizar que o somatório desses dois mapas resulta no mapa final da krigagem com regressão. Primeiramente, um equilíbrio entre as sub e



superestimativas, significando que o modelo está adequado em suas estimativas na área de estudo, conforme apresentado e discutido anteriormente. Meusburger et al. (2012) e Mello et al. (2013), ambos aplicando krigagem com regressão para o mapeamento da erosividade da chuva, respectivamente, na Suíça e no Brasil, comentam sobre esse aspecto, ou seja, de que os resíduos necessitam apresentar uma distribuição espacial equilibrada, sem tendência, para que os resultados da krigagem com regressão possam ser os mais expressivos possíveis.

Além dessa característica, é importante destacar pela Figura 11, os valores consideravelmente baixos de estimativa, tanto de subestimativas (valores negativos) quanto de superestimativas (valores positivos), demonstrando não somente o bom desempenho do modelo estatístico, mas, também, da krigagem ordinária, fruto da expressiva continuidade espacial modelada para o resíduo.

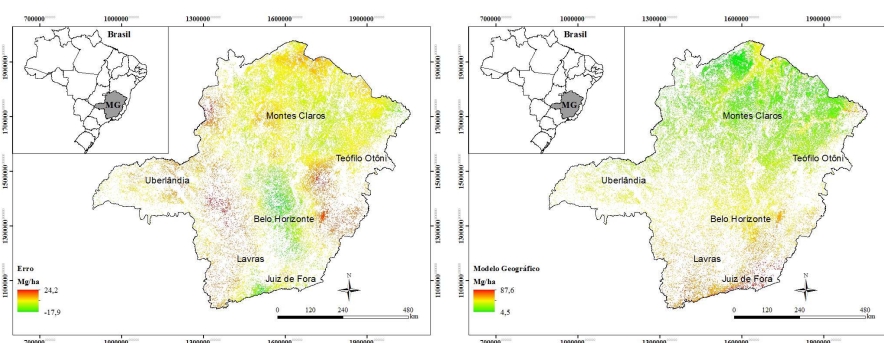


Figura 11: Mapas de krigagem dos resíduos e do modelo geográfico.

Na Figura 12, apresenta-se o mapa resultante da distribuição do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG, gerado, a partir da técnica híbrida da krigagem com regressão.

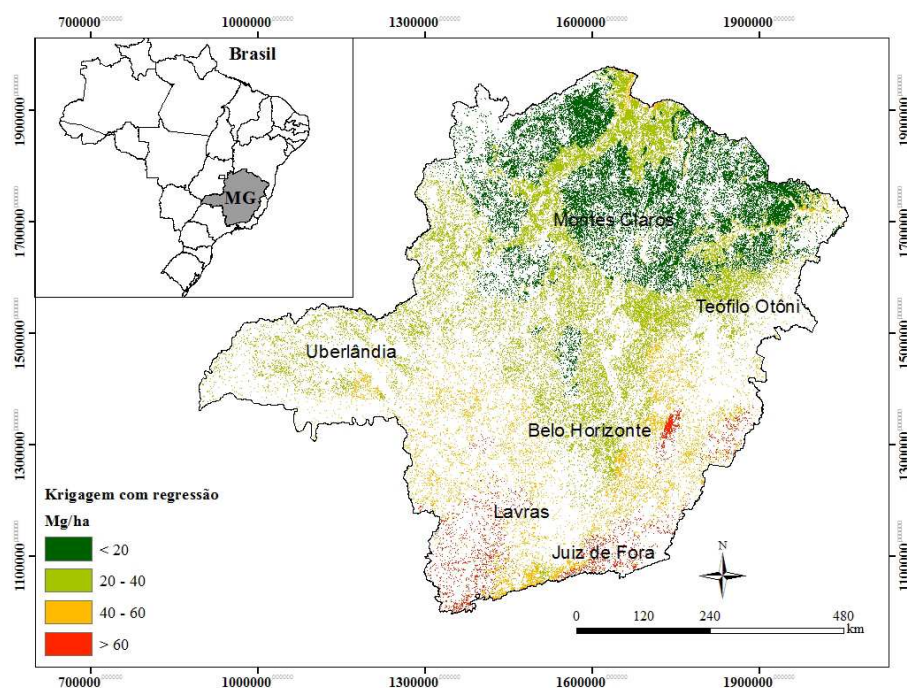


Figura 12: Mapa dos valores interpolados do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG, por meio da krigagem com regressão.

#### 4.5 Avaliação quali-quantitativa dos Mapas gerados a partir dos interpoladores geoestatísticos com a seleção da melhor técnica e consequente descrição final da distribuição do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG

Na Tabela 6, estão apresentadas as estatísticas de precisão do Erro Médio Reduzido (EMR) gerados pelas estimativas, por meio da krigagem ordinária, cokrigagem e krigagem com regressão.

Tabela 6 - Estatística de precisão para as técnicas da krigagem, cokrigagem e krigagem com regressão.

<b>Variável</b>	<b>Técnicas</b>	<b>EMR</b>
C (Mg/ha)	Krigagem ordinária	0,1145
	Cokrigagem	0,0564
	Krigagem com regressão	0,0227

Com relação ao EMR, que de acordo com Cressie (1993), quanto mais próximo de zero, mais confiável se tornam as estimativas geradas pelo mapa, a técnica da krigagem com regressão apresentou menor valor em relação à cokrigagem e a krigagem ordinária. Mishra et al. (2012), estudando estimativas de estoque de carbono, a partir do método do IPCC, também demonstraram que a utilização de técnicas que incorporam a geoestatística, mais especificamente pelo uso da krigagem com regressão, podem resultar numa predição mais acurada quando observada a existência da dependência espacial.

Pela acentuada variabilidade entre os dados, decorrente da grande amplitude de latitude, altitude, tipo de solo, clima, estágio de conservação dos fragmentos e mesmo sucessional da vegetação encontrada em MG, esses valores de validação, a partir do EMR são altamente satisfatórios.

Além do EMR satisfatório, torna-se interessante observar a semelhança apresentada pelas formas de mapeamento do estoque de carbono em MG, a partir das técnicas espaciais (Figuras 9, 10 e 12). A correlação entre os pixels estimados e distribuídos, ao longo do estado, pelas células de 100 x 100 metros (1 hectare) é de 89% entre os mapas de krigagem ordinária e cokrigagem; 90% entre os mapas de krigagem com regressão e krigagem ordinária; 85% entre os mapas de krigagem com regressão e cokrigagem, ou seja, existe aqui um claro indicativo de confiabilidade no estudo realizado, sendo que a captação de

alguns detalhes específicos tornaram a krigagem com regressão mais eficiente no mapeamento da estocagem de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG.

O melhor desempenho da krigagem com regressão em relação à krigagem ordinária e cokrigagem pode ser atribuído ao fato de ter havido correlação entre o estoque de carbono e as variáveis geográficas (altitude e latitude). Dessa forma, a adição do resíduo krigado, gerado a partir do modelo geográfico colaborou na captação das pequenas variações existentes quanto à distribuição de carbono no território mineiro. Por seus coeficientes dependerem somente da correlação entre a variável dependente e independente, a krigagem com regressão se apresenta como a técnica mais adequada para a extrapolação espacial (MENG; CIESZEWSKI; MADDEN, 2009), além de combinar as vantagens da regressão linear com a krigagem (YAO et al., 2013). Isso significa que, para grandes áreas a técnica de interpolação híbrida produz um mapa de predição mais detalhado, conferindo uma maior consistência aos resultados, o que foi observado no presente estudo. Esse fato pode ser observado na Figura 12, principalmente para a região norte do estado de MG, cujas predições se destacam em relação às Figuras 9 e 10, geradas pela krigagem ordinária e cokrigagem. Nessa região, a alta vulnerabilidade social, o baixo índice pluviométrico e as altas temperaturas, implicam em um mais baixo estoque de carbono da parte aérea das plantas.

Para estudo realizado com estoque de carbono em 3 diferentes locais no estado de Nebraska nos EUA, com uma área total de 166,5 ha, porém do solo e não da parte aérea, Simbahan et al. (2006) também observaram a krigagem com regressão como a melhor técnica de estimativa.

Já, a krigagem ordinária e a cokrigagem também se apresentaram de forma adequada, em decorrência do fato de que os coeficientes dessas técnicas

são dependentes das variações espaciais entre os pontos amostrais (HUDAK et al., 2002).

A análise da distribuição do carbono, no estado de MG, por meio da técnica de krigagem com regressão, permitiu identificar uma concentração mediana de estoque de carbono, na região do Triângulo Mineiro, que é a região onde se concentra o cerrado, além da presença de remanescentes florestais do Bioma Atlântico. Conforme verificado por Carvalho et al. (2008), essa região apresenta boas condições edafoclimáticas, com condições favoráveis para o desenvolvimento das plantas, calor associado a boa disponibilidade hídrica e de nutrientes, sendo esses importantes fatores que afetam diretamente a estocagem de carbono.

Na região Noroeste do estado, que é uma zona predominantemente de transição do cerrado para o cerrado *sensu stricto* encontram-se sítios menos produtivos do que no Triângulo Mineiro, com solos apresentando maior nível de erosão, aliado a uma baixa presença do Bioma Atlântico, o que implica em áreas com menor estoque de carbono.

A região Norte do estado é constituída, basicamente, pelo cerrado *sensu stricto* e pelo Bioma da Caatinga. O cerrado apresenta, predominantemente, baixo estoque de carbono. A combinação de altas temperaturas (superiores a 25 °C) com baixa pluviosidade (850 mm), característicos de um clima semiárido, resultam em estresse ambiental, o que, logicamente, reflete no desenvolvimento das plantas. Outro ponto relevante é a alta vulnerabilidade social da população local, o que aumenta o extrativismo ilegal das vegetações ali existentes, sendo esse fator impactante quanto ao desenvolvimento dos remanescentes. Já, o Bioma da Caatinga, apesar de estar na mesma região Norte contém vegetação, predominantemente, de porte arbóreo, apresentando estoques de carbono, naturalmente superiores aos dos cerrados *sensu stricto*.

Na região Central do estado, existe predominância de cerrado *sensu stricto*, sendo que, para porção mais ao norte dessa região, existe uma zona de baixa estocagem de carbono, o que é explicado pelo fato da vegetação presente ser de campo cerrado, ou seja, vegetação com menor densidade de plantas que os demais tipos vegetacionais. Para o restante da região, existe uma estocagem de carbono, tendendo de baixa para média, fato explicado pela pluviosidade bastante concentrada em três meses do ano (1250 mm), além dos sítios pertencentes a essa região serem de média a baixa produtividade e pela pressão antrópica na região pelos motivos já explicados anteriormente.

Para as regiões Leste e Centro-sul do estado, existe uma alta estocagem de carbono, variando de média-alta para alta. Por serem regiões com predominância de remanescentes florestais do Bioma Atlântico, estas, conforme pode ser observado na Tabela 2, tornam-se propícias a uma maior acumulação de carbono. Seus remanescentes apresentam alta densidade de plantas aliada à ocorrência de grande número de plantas vigorosas, além das regiões apresentarem um bom regime de chuvas ao longo do ano com precipitação média na faixa dos 1500 mm anuais e temperatura média de 21,5 °C.

A partir da Tabela 7, observa-se, numericamente, o que está sendo apresentado via mapeamento, ou seja, a análise da distribuição do carbono no estado, por meio da técnica de krigagem com regressão.

Tabela 7 - Valor médio e total de estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea para cada Bioma nas variadas regiões.

<b>Região</b>	<b>Bioma</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Carbono (Mg/ha)</b>	<b>Estoque de Carbono (Mg)</b>
Central	Caatinga	2.219	23,64	52.467
	Cerrado	638.532	23,2	14.813.048
	Mata Atlântica	398.180	32,65	12.999.860
<b>Total da Região</b>		<b>1.038.931</b>	<b>26,82</b>	<b>27.865.376</b>
Centro-Sul	Cerrado	255.230	34,32	8.758.472
	Mata Atlântica	1.161.051	53,53	62.146.067
<b>Total da Região</b>		<b>1.416.281</b>	<b>50,06</b>	<b>70.904.540</b>
Leste	Mata Atlântica	1.940.536	46,61	90.452.264
<b>Total da Região</b>		<b>1.940.536</b>	<b>46,61</b>	<b>90.452.264</b>
Noroeste	Cerrado	1.203.366	18,8	22.618.708
	Mata Atlântica	331.175	22,5	7.450.642
<b>Total da Região</b>		<b>1.534.541</b>	<b>19,60</b>	<b>30.069.350</b>
Norte	Caatinga	1.948.891	22,74	44.325.771
	Cerrado	4.379.024	17,38	76.099.116
	Mata Atlântica	1.218.991	23,48	28.624.346
<b>Total da Região</b>		<b>7.546.906</b>	<b>19,75</b>	<b>149.049.235</b>
Triângulo	Cerrado	391.871	35,44	13.887.281
	Mata Atlântica	722.375	38,76	28.000.844
<b>Total da Região</b>		<b>1.114.246</b>	<b>37,59</b>	<b>41.888.12</b>
<b>Total</b>		<b>14.591.441</b>	<b>28,11</b>	<b>410.228.892</b>

Essa tabela corrobora as afirmativas feitas, anteriormente, para cada região. Interessante observar que a mesma apresenta o somatório total de carbono estimado para todo o estado de Minas Gerais, sendo o total estimado de carbono igual a 410.228.892 Mg.

A realização de estudos com relação ao entendimento do uso dos recursos naturais a partir do conhecimento do ciclo de carbono das diferentes fitofisionomias é uma oportunidade de incorporação de conceitos relacionados à sustentabilidade para a população. O desenvolvimento da bioeconomia, a qual está associada a uma série de fatores, tais como políticas governamentais, é um ponto chave para um governo preocupado com a sustentabilidade (SWINNEN; RIERA 2013).

Eswaran, Van Den Berg e Reich (1993) comentaram que, apesar do estoque de carbono no solo ser superior ao estoque presente na atmosfera e vegetação arbórea, sua dinâmica é de certa forma lenta e de difícil monitoramento. Já, o estoque de carbono da parte aérea das plantas tem sua dinâmica mais bem compreendida, o que permite o seu monitoramento. Sendo assim, estudos quanto à estocagem de carbono pela parte aérea das plantas é um importante componente na busca pela mitigação dos efeitos das mudanças climáticas globais.

Segundo IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007), o desmatamento florestal é a segunda maior fonte antrópica de emissão de gases de efeito estufa no mundo, sendo para os países tropicais a maior delas. Corroborando com essas afirmativas, Stephens et al. (2007) consideram que mais prejudicial que o carbono emitido, a partir do desmatamento, está a perda do ecossistema florestal como importante sumidouro de sequestro de carbono, a partir da atmosfera, o qual é um ponto crítico quanto à estabilização climática no futuro.

Os maiores emissores globais de carbono são: China, EUA e Índia, sendo, o Brasil, o décimo quarto nessa lista (BRAZILIAN MINISTRY OF AGRICULTURE LIVESTOCK AND FOOD SUPPLY, 2010). Dessa forma, estudos como este, os quais impulsionam o conhecimento da estocagem de



carbono em uma fração ou em todo o país, estimulam a conservação de fragmentos florestais das diferentes fitofisionomias existentes, sendo que para o estado de Minas Gerais, servirá como um lastro para o Brasil avançar na política de contribuir para a redução dos impactos globais no clima.

Em 2009, o governo brasileiro lançou a Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei 12.187/2009). Entre outras iniciativas, essa lei propôs a redução de emissões de gases de efeito estufa entre 36,1% a 38,9%, em comparação com as emissões projetadas para 2020 (total projetado em 2020 é 2,7 milhões tCO<sub>2</sub>). Mais da metade do total da redução de emissões será obtido a partir da redução do desmatamento em todos os Biomas brasileiros, demonstrando que informações como as produzidas para este são altamente estratégicas.

O Brasil possui uma economia de rápido crescimento, e acaba por refletir no uso de madeira. Segundo a Organização Internacional de Madeiras Tropicais (INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION, 2012), enquanto o Brasil é o maior produtor de madeira serrada tropical do mundo (16,1 milhões de m<sup>3</sup>), é também o maior consumidor (15,3 milhões de m<sup>3</sup>).

O Brasil possui uma grande diversidade de Biomas, resultando em uma grande diversidade de espécies arbóreas que ocorrem dentro de suas fronteiras. No estado de Minas Gerais, em razão da existência de 3 diferentes Biomas, foram relatados um total de 2.401 espécies de árvores existentes no estado (OLIVEIRA FILHO; SCOLFORO, 2008), ou seja, entendimentos a respeito da dinâmica e estocagem de carbono são fundamentais para o controle na emissão de gases de efeito estufa.

Buscando entender a estocagem de carbono para o estado de Minas Gerais, observa-se que a busca pelo aumento e manutenção de remanescentes

florestais na região Centro-sul parece inviável, pois a elevada ação antrópica histórica nessa região aliada à alta dependência do estado pela produção agrícola e pecuária, tornam a busca pela recuperação florestal em sítios produtivos pouco provável. Entretanto, há necessidade de recuperação de áreas degradadas que, aliada aos remanescentes existentes, os quais apresentam uma boa taxa de estocagem de carbono, por serem predominantemente do Bioma Atlântico, será de grande valor para o controle climático, ambiental e faunístico do estado.

A região do Triângulo Mineiro é amplamente propícia para o desenvolvimento agroindustrial do estado de MG. Por ser uma região que possui alta capacidade produtiva, pela combinação de bons solos, boa temperatura média e bom índice pluviométrico que das demais regiões, essa é uma região que tem sido explorada como celeiro de produção agropecuária no estado de Minas Gerais. É, portanto, uma região que, além de apresentar uma mediana estocagem de carbono pela predominância de remanescentes de cerrado e floresta atlântica, ainda carece de vegetação nativa para promover a proteção adequada da fauna e, principalmente, da produção de água.

Pela alta ocorrência de solos arenosos nas regiões Central e Norte do estado, caracterizadas predominantemente por sítios pouco produtivos, essas são regiões que devem buscar formas de desenvolvimento baseadas em indústrias de base tecnológica, capacitando à mão de obra local para tal e buscar na promoção da conservação da vegetação nativa desses locais, uma maneira de tornar a região mais sustentável e aprazível, inclusive com a prática do turismo ecológico, em razão das belezas cênicas existentes na região.

## 5 CONCLUSÕES

O IQD apresentou mapa de distribuição do carbono em Minas Gerais bastante semelhante ao da krigagem ordinária, cokrigagem e krigagem com regressão. No entanto, as técnicas de krigagem devem ser preferidas, em relação ao IQD, pois o estoque de carbono apresentou-se estruturado espacialmente. Essa condição permite utilizar técnicas de inferência com variância mínima e sem viés. Assim, as três técnicas de krigagem utilizadas no presente estudo proporcionaram estimativas mais confiáveis do estoque de carbono da parte aérea da vegetação arbórea dos Biomas de MG.

A krigagem com regressão resultou num menor erro médio residual, quando comparado a krigagem ordinária e cokrigagem. Dessa forma, o mapa gerado por esse procedimento, conseguiu detalhar melhor a distribuição do estoque de carbono no estado e com maior confiabilidade.

Pelo mapa de krigagem com regressão, os maiores estoques de carbono se encontram ao sul do estado. Nessa região, encontram-se diversos fragmentos de vegetação do Bioma Atlântico. A partir do centro do estado, nas direções norte e noroeste, ocorrem as menores concentrações medias do estoque de carbono. Nessas regiões, encontram-se fragmentos do Bioma Cerrado, onde as árvores são menores, além, de estarem em condições de precipitação e temperatura desfavorável em relação as outras partes do estado.

## 6 REFERÊNCIAS

ALVARENGA, L. H. V. et al. Desempenho da estratificação em um fragmento de cerrado *stricto sensu* utilizando interpolador geoestatístico. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 4, p. 675-681, out./dez. 2012.

BASARAN, M. et al. Spatial information of soil hydraulic conductivity and performance of cokriging over kriging in a semi-arid basin scale. **Environmental Earth Sciences**, New York, v. 63, n. 4, p. 827–838, Jan. 2011.

BRAZILIAN MINISTRY OF AGRICULTURE LIVESTOCK AND FOOD SUPPLY. **Brazilian Agriculture in Figures**. Brasília: [s.n.], 2010. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 15 mar. 2013.

BROWN, C. D.; JOHNSTONE, J. F. How does increased fire frequency affect carbon loss from fire? A case study in the northern boreal forest. **International Journal of Wildland Fire**, Victoria, v. 20, n. 7, p. 829–837, Sept. 2011.

BUIS, G. M. et al. Controls of aboveground net primary production in mesic savanna grasslands: and inter-hemispheric comparison. **Ecosystems**, New York, v. 12, n. 6, p. 982–995, Sept. 2009.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, Sept. 1994.

CARVALHO, L. G. de et al. (Org.). **Zoneamento ecológico-econômico do Estado de Minas Gerais**: componentes geofísico e biótico: volume 1. Lavras: Editora da UFLA, 2008.

CRESSIE, A.G. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1993.

CUNHA, G. M. et al. Biomassa e estoque de carbono e nutrientes em florestas montanas da mata atlântica na região norte do estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1175-1185, set./out. 2009.

DALY, C. et al. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate. **Climate Research**, Oldendorf, v. 22, n. 2, p. 99–113, Sept. 2002.

DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, London, v. 440, n. 7081, p. 165–173, Mar. 2006.

DU, H. et al. Spatial heterogeneity and carbon contribution of aboveground biomass of moso bamboo by using geostatistical theory. **Plant Ecology**, Dordrecht, v. 207, n. 1, p.131–139, Mar. 2010.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **Geostatistical analyst tutorial**. Redlands: [s.n.], 2010.

ESWARAN, H.; VAN DEN BERG, E.; REICH, P. Organic carbon in soils of the world. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 1, p. 192–194, Jan./Feb. 1993.

FERREIRA, D. F. **Estatística básica**. 2. ed. Lavras: Editora da UFLA, 2009.

FERREIRA, J. et al. Towards environmentally sustainable agriculture in Brazil: challenges and opportunities for applied ecological research. **Journal of Applied Ecology**, Hoboken, v. 49, n. 3, p. 535–541, Apr. 2012.

GIONGO, V. et al. Carbono no sistema solo-planta no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, n. 6, p. 1233-1253, Nov. 2011.

GRACE, J. B. et al. Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. **Journal of Biogeography**, Hoboken, v. 33, n. 3, p. 387–400, Feb. 2006.

GUEDES, I. C. de L. et al. Técnicas geoestatísticas e interpoladores espaciais na estratificação de povoamentos de *Eucalyptus* sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 3, p. 541-550, jul./set. 2012.

HENGL, T.; HEUVELINK, G. B. M.; ROSSITER, D. G. About regression-kriging: from equations to case studies. **Computers & Geosciences**, Oxford, v. 33, n. 1-2, p. 1301–1315, May 2007.

HENGL, T.; HEUVELINK, G.; STEIN, A. A. A genetic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. **Geoderma**, Amsterdam, v. 122, n. 1, p. 75-93, May 2004.

HUDAK, A.T. et al. Integration of lidar and Landsat ETM + data for estimating and mapping forest canopy height. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 82, n. 2–3, p. 397–416, Apr. 2002.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007**: the physical science basis, contribution of working group I to the

fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION. **Annual review and assessment of the world timber situation**. Yokohama: Itto, 2012.

Disponível em: <[http://www.itto.int/annual\\_review/](http://www.itto.int/annual_review/)>. Acesso em: 20 maio 2014.

JOURNAL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistics**. London: Academic Press, 1978.

KANEGAE, J. R. H. **Avaliação de sistemas de inventários sucessivos e dos interpoladores espaciais como instrumento de estratificação de povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp.** 2004. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

KANEGAE JÚNIOR, H. et al. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos como instrumento de estratificação de povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 123-136, abr./jun. 2006.

LAL, R. Carbon sequestration. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, London, v. 363, n. 1492, p. 815-830, Feb. 2008.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, Campinas, v. 2, n. 1, p. 19-33, set. 2006.

LEITÃO FILHO, H. F. Diversity of arboreal species in Atlantic rain forest. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 66, n. 1, p. 91-96, set. 1994.

LIU, F. et al. Spatial scaling of ecosystem C and N in a subtropical savanna landscape. **Global Change Biology**, Hoboken, v. 16, n. 8, p. 2213–2223, Dec. 2010.

MARTÉRN, B. **Spatial variation**: stochastic models and their application to some problems in forest surveys and other sampling investigations. Stockholm: Skogsforsknings Institut, 1960.

MELLO, C. R. et al. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 202-203, n. 7, p. 88-102, July 2013.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Modelagem estatística da precipitação mensal e anual e no período seco para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 1, p. 68-74, jan./fev. 2009.

MENEZES, M. D. de. **Levantamento pedológico de hortos florestais e mapeamento digital de atributos físicos do solo para estudos hidrológicos**. 2011. 255 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

MENG, Q.; CIESZEWSKI, C.; MADDEN, M. Large area forest inventory using Landsat ETM+: A geostatistical approach. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 64, n. 1, p. 27–36, Jan. 2009.

MEUSBURGER, K. et al. Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland. **Hydrology and Earth System Sciences**, Gottingen, v. 16, n. 1, p. 167–177, Jan. 2012.

MILLER, J.; FRANKLIN, J.; ASPINALL, R. Incorporating spatial dependence in predictive vegetation models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 202, n. 3-4, p. 225–242, Apr. 2007.

MISHRA, U. et al. Improving regional soil carbon inventories: Combining the IPCC carbon inventory method with regression kriging. **Geoderma**, Amsterdam, v. 189–190, n. 11, p. 288–295, Nov. 2012.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, London, v. 403, n. 6772, p. 853-858, Feb. 2000.

NANOS, N. et al. Geostatistical prediction of height/diameter models. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 195, n. 1-2, p. 221–235, June 2004.

NIELSEN, D.; WENDROTH, O. **Spatial and temporal statistics-sampling field soils and their vegetation**. Reiskirchen: Catena-Verlag, 2003.

OLIVEIRA FILHO, A. T. et al. Definição e delimitação de domínios e subdomínios das paisagens naturais do estado de Minas Gerais. In: SCOLFORO, J. R.; CARVALHO, L. M. T. (Ed.). **Mapeamento e inventário**

**da flora e dos reflorestamentos de Minas Gerais.** Lavras: Editora da UFLA, 2006. Cap. 1, p.21-35.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; SCOLFORO, J. R. S. **Inventário florestal de Minas Gerais: espécies arbóreas da flora nativa: volume 1.** Lavras: Editora da UFLA, 2008.

OLIVEIRA, M. B. L. et al. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.21, n.3b, p. 378-386, dez. 2006.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing.** Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: < <http://www.R-project.org>>. Acesso em: 22 maio 2013.

REZENDE, A. V. et al. Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado *sensu stricto* em Brasília, DF. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 71, n. 2, p. 65-73, ago. 2006.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. geoR: a package for geostatistical analysis. **R-News**, Pelotas, v. 1, n. 2, p. 15-18, June 2001.

RIBEIRO, S. C. et al. Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma floresta madura no município de Viçosa, Minas Gerais. **Árvore**, Viçosa, v.33, n.5, p. 917-926, set./out. 2009.

RUFINI, A. L. et al. Equações de volumétricas para cerrado *sensu stricto* em Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 1-11, jan./mar. 2010.

SALTON, J. C. et al. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1349-1356, out. 2011.

SAMRA, J. S.; GILL, H. S.; BHATIA, V. K. Spatial stochastic modelling of growth and forest resource evaluation. **Forest Science**, Bethesda, v. 35, n. 3, p. 663-676, Sept. 1989.

SANTOS, C. N. S. **Padrões espaço-temporais do estrato arbóreo de uma remanescente de floresta ombrófila densa na serra da mantiqueira, Minas**



**Gerais.** 2013. 121 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

SCOLFORO, J. R. S. et al. Amostragem e caracterização dos fragmentos inventariados. In: SCOLFORO, J. R. S. et al. **Inventário florestal de Minas Gerais**: cerrado: florística, estrutura, diversidade, similaridade, distribuição diamétrica e de altura, volumetria, tendências de crescimento e áreas aptas para manejo florestal: volume 1. Lavras: Editora da UFLA, 2008d. p. 1-78.

SCOLFORO, J. R. S. et al. Amostragem e caracterização dos fragmentos inventariados. In: SCOLFORO, J. R. S. et al. **Inventário florestal de Minas Gerais**: floresta estacional Semidecidual e ombrófila: florística, estrutura, diversidade, similaridade, distribuição diamétrica e de altura, volumetria, tendências de crescimento e áreas aptas para manejo florestal: volume 1. Lavras: Editora da UFLA, 2008e. p. 1-88.

SCOLFORO, J. R. S. et al. Amostragem e caracterização dos fragmentos inventariados. In: SCOLFORO, J. R. S. et al. **Inventário florestal de Minas Gerais**: floresta estacional decidual: florística, estrutura, diversidade, similaridade, distribuição diamétrica e de altura, volumetria, tendências de crescimento e áreas aptas para manejo florestal: volume 1. Lavras: Editora da UFLA, 2008f. p. 1-25.

SCOLFORO, J. R. S. et al. Equações para quantidade de carbono das fisionomias, em Minas Gerais. In: SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; ACERBI JÚNIOR, F. W. **Inventário florestal de Minas Gerais**: equações de volume, peso de matéria seca e carbono para diferentes fitofisionomias da flora nativa: volume 1. Lavras: Editora da UFLA, 2008g. p. 197-215.

SCOLFORO, J. R. S. et al. Volumetria, peso de matéria seca e carbono. In: SCOLFORO, J. R.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, A. D. **Inventário florestal de Minas Gerais**: cerrado: florística, estrutura, diversidade, similaridade, distribuição diamétrica e de altura, volumetria, tendências de crescimento e áreas aptas para manejo florestal. Lavras: Editora da UFLA, 2008a. p. 157-208.

SCOLFORO, J. R. S. et al. Volumetria, peso de matéria seca e carbono para o Domínio Atlântico em Minas Gerais. In: SCOLFORO, J. R.; MELLO, J. M.; SILVA, C. P. C. **Inventário florestal de Minas Gerais**: floresta estacional semidecidual e ombrófila: florística, estrutura, diversidade, similaridade,

distribuição diamétrica e de altura, volumetria, tendências de crescimento e áreas aptas para manejo florestal. Lavras: Editora da UFLA, 2008b. p. 463-629.

SCOLFORO, J. R. S. et al. Volumetria, peso de matéria seca e carbono para o Domínio da Caatinga em Minas Gerais. In: MELLO, J. M.; SCOLFORO, J. R. S.; CARVALHO, L. M. T. **Inventário florestal de Minas Gerais: floresta estacional decidual: florística, estrutura, diversidade, similaridade, distribuição diamétrica e de altura, volumetria, tendências de crescimento e áreas aptas para manejo florestal.** Lavras: Editora da UFLA, 2008c. p. 363-438.

SHEIKH, M.; KUMAR, M.; BUSSMANN, R. W. Altitudinal variation in soil organic carbon stock in coniferous subtropical and broadleaf temperate forests in Garhwal Himalaya. **Carbon Balance and Management**, United Kingdom, v. 4, n. 6, p. 1-6, Aug. 2009.

SILVA, C. J. et al. Produção de serapilheira no cerrado e floresta de transição Amazônia-Cerrado do Centro-Oeste Brasileiro. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 37, n. 4, p. 543-548, out./dez. 2007.

SIMBAHAN, G. C. et al. Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data. **Geoderma**, Amsterdam, v. 132, n. 3-4, p. 471-489, June 2006.

SOUZA, G. S. et al. Ordinary kriging and inverse-square-distance in espacialization in the chemical attributes of the ultisol. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 11, n. 1, p. 73-81, Jan./Feb. 2010.

STEPHENS, B. B. et al. Weak northern and strong tropical Land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO<sub>2</sub>. **Science**, Washington, v. 316, n. 5832, p. 1732-1735, June 2007.

SWINNEN, J.; RIERA, O. The global bio-economy. **Agricultural Economics**, Hoboken, v. 44, n. 1, p. 1-5, July 2013.

VIOLA, M. R. et al. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, João Pessoa, v. 14, n. 9, p. 970-978, July 2010.

WATANABE, J. et al. Study of influence of initial correlation between variables in the co-estimates results. **Geociências**, São Paulo, v.28, n.4, p. 467-484, Oct./Dec. 2009.

WU, C. et al. Spatial estimation of soil total nitrogen using cokriging with predicted soil organic matter content. **Soil Science of America Journal**, Madison, v. 73, n. 5, p. 1676-1677, Sept. 2009.

WULDER, M.; LAVIGNE, M.; FRANKLIN, S. High spatial resolution optical image texture for improved estimation of forest stand leaf area index. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Kanata, v. 22, n. 4, p. 441-449, Feb. 1996.

YAMAMOTO, J. K. **Avaliação e classificação de reservas minerais**. São Paulo: Editora da USP, 2001.

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

YAO, X. et al. Comparison of four spatial interpolation methods for estimating soil moisture in a complex terrain catchment. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 8, n. 1, p. 1-13, Jan. 2013.