



SABRINA MANDARANO MACIEL

**ANÁLISE ESPACIAL DO CARBONO EM UM
FRAGMENTO FLORESTAL COM
PREDOMINÂNCIA DE *Anadenanthera* sp.**

LAVRAS – MG

2012

SABRINA MANDARANO MACIEL

**ANÁLISE ESPACIAL DO CARBONO EM UM FRAGMENTO
FLORESTAL COM PREDOMINÂNCIA DE *Anadenanthera* sp.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em a madeira como matéria-prima, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Natalino Calegario

LAVRAS – MG

2012

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Maciel, Sabrina Mandarano.

Análise espacial do carbono em um fragmento florestal com
predominância de *Anadenanthera* sp. / Sabrina Mandarano Maciel. –
Lavras: UFLA, 2012.

134 p.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Natalino Calegario.

Bibliografia.

1. Geoestatística. 2. Efeito estufa. 3. Estoque de carbono. 4.
Espacialização. 5. Krigagem. Universidade Federal de Lavras. II.
Título.

CDD – 674.13

SABRINA MANDARANO MACIEL

**ANÁLISE ESPACIAL DO CARBONO PRESENTE EM UM
FRAGMENTO FLORESTAL COM PREDOMINÂNCIA DE
*Anadenanthera sp.***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em a madeira como matéria-prima, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 31 de julho de 2012.

Dra. Sabina Cerruto Ribeiro UFLA

Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli UFLA

Dr. Natalino Calegario

Orientador

LAVRAS – MG

2012

À minha mãe Ilma e ao meu marido Eric.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e saúde para realização desse trabalho.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciências Florestais, pela oportunidade da realização do Mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos.

Ao professor e orientador Natalino Calegario, pela orientação, amizade e bons conselhos.

Ao professor Paulo Trugilho, pelo apoio técnico e amizade.

À professora Sabina, pela contribuição nas correções e pelo carinho.

Ao professor Mozart, pela orientação sobre a realização da coleta de solo para análise de densidade.

Ao professor Marcelo e doutorando Enio, pela colaboração prestada com as análises geoestatísticas.

Aos professores da Ciência e Tecnologia da Madeira, pelos ensinamentos transmitidos durante o Mestrado.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo, pelo empréstimo dos materiais necessários para a coleta de solo.

Ao Claret, Melão e Edson, pela disposição e ajuda para a realização deste trabalho.

À Chica, Cris, Teresinha e Thaisa, que sempre estiveram dispostas a ajudar com muito carinho e atenção.

Aos meus pais, Aparecida e Geraldo Magela e Ilma e Geraldo Meirelles, pelo infinito amor.

Aos meus irmãos Tiago, Rafael, Cinthia, Geraldinho, Rodrigo, André, Gabriel e Lucas, por me proporcionarem imensa alegria e esperança.

Ao meu marido Eric, que dividiu comigo todas as alegrias e dificuldades desta etapa.

Aos meus tios e tias, primos e primas, pelo carinho e preocupação.

Aos meus amados avós, por tudo o que representam para mim.

Às queridas amigas de república Gabi, Juju, Maysa, Giu e Ana Carla pelos bons momentos que compartilhamos.

Às amigas Priscila, Carla, Andressa, Nathália, Gabrilinha, Amanda e Elvira que mesmo estando longe sempre participaram de todas as etapas de minha vida.

Aos amigos do mestrado, em especial, Carol, Jonnys, Alessandra, Maíra, Bola, Tião, Jeimy, Sylvia, Amanda e Cassiana pela amizade e companheirismo.

Aos queridos amigos Elliezer, Ernani, Rômulo, Ayuni, Joice, André, Antônio, Lucas, Geisi, Jonnys, Javan, Alan, Maíra, Carol, Juju, Gabi, Selma, Vinícius, Marya Eduarda, Pâmela, Andressa, Iberê, Bola, Claudinéia, Anna, Carla e Isaac que me ajudaram desde a elaboração do projeto até a execução do mesmo. Vocês são pessoas especiais, essenciais aos quais vou ser sempre grata.

RESUMO

A avaliação espacial de um atributo é importante para dar suporte à tomada de decisões referente ao seu manejo, sendo assim, o objetivo desse trabalho foi analisar espacialmente a biomassa, teor e estoque carbono no fuste, raiz e solo em um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. O capítulo 1 consiste numa revisão bibliográfica dos temas *Anadenanthera* sp., intensificação do efeito estufa e medidas institucionais de redução de gases de efeito estufa, importância dos ecossistemas florestais como sumidouros de CO₂, metodologias de quantificação de biomassa e carbono, estudo do carbono presente no fuste, raiz e solo e geoestatística. O capítulo 2 refere-se a um estudo geoestatístico realizado com o estoque de carbono presente no fuste de *Anadenanthera* sp., sendo este obtido de maneira não destrutiva, por meio de modelos de regressão e da relação densidade da madeira e volume do fuste. Esse estudo evidenciou que há dependência espacial para essa variável, porém, devido à ocorrência de uma superdispersão dos dados há necessidade de uma amostragem mais detalhada da área. O capítulo 3 compreende o estudo da distribuição espacial da biomassa, teor e quantidade de carbono em raízes coletadas em pontos centrais dentro de unidades amostrais selecionadas de maneira sistemática, em quatro profundidades diferentes. Observou-se a ausência de dependência espacial e ajuste de modelos de semivariograma com e sem patamar para as variáveis e profundidades estudadas. O capítulo 4 visa a estudar a dependência espacial do teor e estoque de carbono presente no solo em quatro profundidades diferentes. As amostras de solo foram coletadas nos mesmos pontos de coleta das raízes. Foi observado um gradiente decrescente no teor e estoque de carbono da superfície para as demais profundidades. Não ocorreu dependência espacial para algumas variáveis, sendo realizado o ajuste de modelos de semivariogramas com e sem patamar, possibilitando a construção de mapas de predição por krigagem.

Palavras-chave: Biomassa. Carbono. CO₂. Geoestatística.

ABSTRACT

The spatial analysis of an attribute is important to provide support for decisions related to its management. Therefore, the focus of this study is to spatially analyze the biomass, carbon content and carbon stock in the stem, root and soil in an *Anadenanthera* sp. predominating forest fragment. Chapter 1 consists of a literature review of *Anadenanthera* sp. issues, intensification of the greenhouse effect and institutional measures to reduce greenhouse gases, importance of forest ecosystems as CO₂ sinks, methods of quantification of biomass and carbon, the study of carbon in the stems, roots and soil, and geostatistics. Chapter 2 refers to a geostatistic study conducted on the carbon stock in the stem of *Anadenanthera* sp., which is obtained in a non-destructive way by means of regression models and the ratio wood density and stem relative volume. Results showed an existing spatial dependence for this variable, but due to the occurrence of data overdispersion there is a need for a more detailed sampling in the area. Chapter 3 includes the study of the biomass spatial distribution, carbon content and carbon amount in roots collected from central points within sampling units systematically selected at four different depths. The absence of spatial dependence as well as the semivariogram models adjustments with and without level for both the variables and the depths studied was noticed. Chapter 4 aims at studying the spatial dependence of both carbon content and carbon stock in the soil at four different depths. Soil samples were collected from the same sampling root points. A decreasing gradient in both carbon content and carbon stock was noticed from the surface to the other depths. There was no spatial dependence for the variables studied and the adjustment of semivariogram models with and without landing was performed, allowing the building of kriging prediction maps.

Keywords: Biomass. Carbon. CO₂. Geoestatistics.

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1 Introdução geral.....	12
1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	O gênero <i>Anadenanthera</i>	15
2.2	Intensificação do efeito estufa e medidas institucionais de redução de gases de efeito estufa	17
2.3	Importância dos ecossistemas florestais como sumidouros de CO₂	20
2.4	Metodologias para quantificação de biomassa e carbono em florestas	22
2.5	Carbono presente na parte aérea em povoamentos florestais	23
2.6	Carbono presente nas raízes de espécies florestais	26
2.7	Carbono presente no solo sob povoamentos florestais	28
2.8	Teoria da geoestatística	30
	REFERÊNCIAS	38
	CAPÍTULO 2 Especialização do estoque de carbono presente no fuste em um fragmento florestal com predominância de <i>Anadenanthera</i> SP.	50
1	INTRODUÇÃO	53
2	MATERIAL E MÉTODOS	55
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
3.1	Análise descritiva do estoque de carbono presente no fuste de <i>anadenanthera</i> sp.	61
3.2	Análise geoestatística do estoque de carbono presente no fuste de <i>anadenanthera</i> sp.	64
4	CONCLUSÕES	67
	REFERÊNCIAS	68
	CAPÍTULO 3 Distribuição espacial da biomassa, teor e quantidade de carbono presente nas raízes de <i>anadenanthera</i> sp.	72
1	INTRODUÇÃO	75
2	MATERIAL E MÉTODOS	77
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
3.1	Distribuição espacial da biomassa das raízes de <i>anadenanthera</i> sp.	85
3.2	Distribuição espacial do teor de carbono presente nas raízes de <i>anadenanthera</i> sp.	89
3.3	Distribuição espacial da quantidade de carbono presente nas raízes de <i>anadenanthera</i> sp.	95
4	CONCLUSÕES	101
	REFERÊNCIAS	102

	CAPÍTULO 4 Continuidade espacial do teor e estoque de carbono presente no solo em uma fragmento florestal com predominância de <i>anadenanthera</i> sp.	105
1	INTRODUÇÃO	108
2	MATERIAL E MÉTODOS	110
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	114
3.1	Teor e estoque de carbono no solo sob fragmento florestal com predominância de <i>anadenanthera</i> sp.	114
3.2	Continuidade espacial do teor de carbono presente no solo sob um fragmento florestal com predominância de <i>anadenanthera</i> sp.	116
3.3	Continuidade espacial do estoque de carbono presente no solo sob um fragmento florestal com predominância de <i>anadenanthera</i> sp.	123
4	CONCLUSÕES	129
	REFERÊNCIAS	130
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	134

CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 1 será apresentado o referencial teórico dos principais temas relacionados a esse trabalho. No capítulo 2 será apresentado um estudo espacial do estoque de carbono presente no fuste em um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. O capítulo 3 consistirá em uma análise espacial da biomassa, teor e quantidade de carbono presente nas raízes de *Anadenanthera* sp. O capítulo 4 será composto do estudo espacial do teor e estoque de carbono presente no solo sob fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp.

CAPÍTULO 1 Introdução geral

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o aquecimento global e mudanças climáticas globais culminaram na criação de medidas mitigatórias para a contenção desses fenômenos. O aquecimento global é causado pela elevada concentração de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O). A queima de combustíveis fósseis pelas atividades industriais, meios de transporte e mudanças no uso da terra são as principais causas da intensificação desse fenômeno.

A primeira medida concreta que estabeleceu um termo de compromisso de redução da emissão de GEE aos países desenvolvidos ocorreu após o acordo realizado na Conferência das Partes 3 (COP 3), no ano de 1997 em Kyoto, chamado Protocolo de Kyoto. Esse documento estabeleceu mecanismos de flexibilização, dentre eles o mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) cujo objetivo é a remoção ou a redução desses gases da atmosfera. Um dos escopos setoriais do MDL baseia-se no sequestro e fixação de carbono na biomassa, por meio de atividades de florestamento e reflorestamento. Esse processo é regido pelo fenômeno da fotossíntese, cujo princípio é a absorção do CO_2 atmosférico, transformando-o em matéria lenhosa. A retenção do carbono atmosférico pelas árvores torna-se viável, pois possibilita a sua imobilização para as diferentes aplicações ao qual a madeira é destinada.

Como remuneração aos projetos de sequestro de carbono insere-se o mercado de carbono. Para que os projetos sejam valorizados e reconhecidos, porém, é necessário que se conheça o estoque de carbono armazenado nos diferentes compartimentos da floresta, como solo, serrapilheira, fuste, galhos e folhas.

A diversidade de espécies florestais brasileiras é muito grande, tornando-se necessário que estudos de quantificação de carbono sejam

realizados para essas espécies, aumentando com isso as possibilidades de aplicação das mesmas, e contribuindo para a redução do efeito estufa.

A *Anadenanthera* sp. possui características atrativas devido ao seu rápido crescimento, elevada regeneração natural e pela qualidade de sua madeira, tornando-se, assim, uma espécie promissora para o florestamento e reflorestamento para diversos fins, inclusive para a geração de créditos de carbono.

Os estudos das variáveis biomassa e teor de carbono funcionam como subsídio para determinação do estoque de carbono em um povoamento florestal. No entanto, a maioria desses estudos desconsidera a dependência espacial existente para essas variáveis (AMARAL et al., 2010).

A análise geoestatística é fundamentada na teoria das variáveis regionalizadas a qual foi definida na década de 60 por Matheron, por meio de estudos de Daniel G. Krige. Esta teoria supõe a existência de dependência espacial entre as variáveis, ou seja, existe correlação dos valores das variáveis em função das distâncias entre elas, diferente da estatística clássica que supõe independência espacial entre os valores das variáveis.

Segundo Isaaks e Srivastava (1989), a análise geoestatística baseada na teoria das variáveis regionalizadas está substituindo a estatística clássica, cujo princípio é a independência entre as amostras. As ferramentas geoestatísticas compreendem basicamente a construção de semivariogramas e a predição por krigagem.

Nesse contexto, os objetivos deste trabalho foram analisar, espacialmente por meio da geoestatística, a biomassa, teor e estoque de carbono do fuste, raiz e solo em um fragmento florestal composto predominantemente pela espécie *Anadenanthera* sp.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Segue abaixo o referencial bibliográfico referente aos principais temas abordados nesse trabalho, sendo estes: O gênero *Anadenanthera*; intensificação do efeito estufa e medidas institucionais de redução de gases de efeito estufa; importância dos ecossistemas florestais como sumidouros de CO₂; metodologias de quantificação de biomassa e carbono; estudo do carbono presente no fuste, raiz e solo; e geoestatística.

2.1 O gênero *Anadenanthera*

Segundo Lewis et al. (2005), o gênero *Anadenanthera* apresenta distribuição geográfica abrangendo as Antilhas, norte da América do Sul, Peru, Bolívia, Argentina, Brasil e Paraguai, sendo representado pelas espécies *Anadenanthera peregrina* e *Anadenanthera colubrina*.

A *Anadenanthera peregrina* é pioneira, comumente conhecida como angico, angico-vermelho, angico-do-morro, angico-branco, paricá, paricá-de-terra firme. Pertencente à família Fabaceae - Mimosoideae (Mimosaceae), tal espécie possui ampla distribuição geográfica, ocorrendo em florestas semidecíduas e na transição com o Cerrado, nos estados do Tocantins, Goiás, Bahia, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (LORENZI, 1998).

A *Anadenanthera colubrina* é conhecida como angico-branco ou cobí, apresenta hábito arbóreo e alcança altura de 23 m. É uma espécie pioneira decídua e heliófita. Ocorre em Floresta Ombrófila Densa Submontana e Montana, Restinga, Floresta Estacional, Campo Rupestre, Cerrado e Caatinga, nos estados do Mato Grosso, Maranhão, Piauí, Ceará, Pernambuco, Bahia, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e em alguns países da América do Sul (MORIM, 2005).

Esse gênero possui madeira densa (0,84 a 1,10 g cm⁻³) e de textura média, apresentando altura que varia de 8 a 20 m e 30 a 50 cm de DAP, podendo atingir até 30 m de altura e 90 cm de DAP na floresta estacional (LORENZI, 2002). Apresenta crescimento de moderado a rápido e em ótimas condições pode atingir produtividades de até 25,55 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (GONÇALVES et al., 2012).

Alguns estudos mostram grande importância para a madeira desse gênero como: uso no meio rural, em vigamentos, tabuados, trabalhos de marcenaria, móveis, lenha e carvão (VIEIRA, 1986); utilização na arborização e na confecção de dormentes e moirões (FONSECA FILHO, 1960); construções civis, obras hidráulicas, obras expostas e internas (SANTOS, 1991); curtimento de couro, devido a presença de taninos em sua casca (TORTORELLI, 1956), uso da casca para o tingimento de redes de pesca pelos caiçaras na Ilha Grande (OLIVEIRA, 2002), produção de fármacos pela extração de compostos tânicos (MONTEIRO et al., 2005), utilização da madeira para pavimentação e construção (LEWIS et al., 2005), produção de carvão, devido ao alto teor de lignina (GONÇALVES et al., 2012).

Abreu (1997), avaliando o potencial alelopático da espécie *Anadenanthera peregrina* sobre a germinação e ciclo mitótico da alface e da canafistula, observou no campo uma diminuição na taxa de germinação e anomalias no ciclo celular de ambas as espécies. Silva et al. (2010), investigando a alelopatia de *Anadenanthera macrocarpa*, observaram que o extrato etanólico presente nas folhas dessa espécie interferiu negativamente na germinação de alface e couve-da-malásia. Martins et al. (2009) avaliaram o efeito alelopático da serrapilheira de *Anadenanthera peregrina* por meio de um estudo ecofisiológico e concluíram que a produção de aleloquímicos representa uma estratégia ecológica para a espécie, alterando o padrão de germinação e dificultando o padrão de desenvolvimento de outras espécies. Os autores verificaram também que o potencial alelopático do angico está relacionado com a concentração de

compostos liberados no solo. Logo, observa-se que o sucesso dessa espécie está relacionado com o seu potencial alelopático que inibe o crescimento e desenvolvimento de outras plantas.

Segundo Vieira et al. (2002), a ampla utilização da *Anadenanthera* sp. fez com que houvesse uma prioridade para conservação *in situ*, na 1ª Reunião Técnica de "Estratégias para a Conservação e Gestão dos Recursos Genéticos de Plantas Medicinais e Aromáticas do Brasil" em 2002.

2.2 Intensificação do efeito estufa e medidas institucionais de redução de gases de efeito estufa

O aumento das emissões dos chamados gases de efeito estufa (GEE) é causa de preocupação por parte dos cientistas. Esses estudiosos acreditam que uma mudança no balanço radioativo da atmosfera seja a causa, em longo prazo, pelo aumento da temperatura média do planeta (KOHLMAIER et al., 1998). As maiores fontes de emissão de gases de efeito estufa originadas pela ação antrópica incluem a queima de combustíveis fósseis, os desmatamentos, as queimadas para tornar a terra disponível para a agricultura e a queima de madeira e carvão para fins combustíveis (KOEHLER et al., 2005).

Os gases considerados como principais agentes causadores do efeito estufa são o metano, óxido nitroso e dióxido de carbono (KHANDEKAR; MURTY; CHITTIBABU, 2005), além de outros gases como hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆). Esses gases possibilitam a ocorrência do efeito estufa natural, responsável por manter a superfície terrestre cerca de 30°C mais aquecida do que na ausência desse fenômeno (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE - UNFCCC, 2010).

Dentre os GEE, o dióxido de carbono (CO₂) é o de maior importância antrópica e o que apresenta maior parcela de contribuição no aquecimento

global, pois é responsável por 55% do total de emissões de GEE na atmosfera (SCARPINELLA, 2002). Sua concentração, durante o período entre 1750 e 2005, aumentou de 280 ppm para 379 ppm, sendo as emissões advindas, principalmente, do uso de combustíveis fósseis e da mudança do uso da terra.

A partir da década de 1980, as questões relativas às mudanças climáticas e ao aquecimento global passaram a se destacar como ameaças ambientais que colocam em risco a integridade do planeta (SILVA et al., 2008).

O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*), criado no ano de 1988, que contou com a participação de cientistas renomados de diferentes partes do mundo, divulgou seu Primeiro Relatório de Avaliação em 1990, com as primeiras comprovações científicas de que as atividades antrópicas são as responsáveis pelo aquecimento global, e que este fenômeno traria consequências danosas ao planeta (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2001).

Com base no Primeiro Relatório do IPCC, foi realizada, em Maio de 1992, a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática - CQNUMC (*United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC*), com objetivo de equilibrar a concentração atmosférica dos GEE. A abertura para a assinatura da CQNUMC ocorreu na ECO-92, no Rio de Janeiro, em junho de 1992, onde também iniciaram-se as primeiras negociações referentes às mudanças climáticas. A partir daí, as discussões sobre mudanças climáticas e medidas mitigatórias passaram a ocorrer anualmente, por meio de reuniões chamadas Conferência das Partes (*Conference of the Parts – COP*), com a participação dos países signatários da CQNUMC.

Em 1997, na cidade de Kyoto, ocorreu a Convenção das Partes 3 (COP-3), onde foi criado o Protocolo de Kyoto para a concretização da redução de GEE. O Protocolo de Kyoto determinou que os países de economia

desenvolvida (Anexo 1) adotassem medidas de redução das emissões, entre 2008 e 2012, para um nível médio de 5,2% inferior ao registrado em 1990.

O Protocolo de Kyoto previu a utilização de mecanismos de flexibilização, de forma a facilitar o atendimento aos compromissos assumidos pelos países do Anexo 1, sendo o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) o único que pode beneficiar os países do Não-Anexo 1, como o Brasil. O MDL possui como princípio o financiamento de projetos de diminuição ou compra dos volumes de redução de emissões nos países em desenvolvimento, por parte dos países do Anexo 1 (NISHI et al., 2005). Uma das linhas de projetos consideradas elegíveis no MDL, na categoria Sequestro de carbono, são as atividades de florestamento e reflorestamento.

Como ferramenta de remuneração desses projetos inserem-se os créditos de carbono que são certificados gerados por projetos que reduzam ou absorvam emissões de gases de efeito estufa. Os Certificados de Redução de Emissões (CREs) são documentos emitidos pelo Conselho Executivo do CQNUMC no contexto do Protocolo de Kyoto. Esses documentos provam que houve a redução da emissão de gases de efeito estufa por meio do MDL (MACIEL et al., 2009).

Rocha (2002) acredita que a reversão do processo de mudança climática global poderá garantir uma posição privilegiada para o Brasil, tanto do ponto de vista das reduções de emissões quanto do sequestro de carbono, pelo fato de ser um país com condições climáticas e tecnológicas favoráveis à produção florestal. No entanto, o autor ressalta que é necessária a utilização de um manejo florestal moderno, integrando a floresta, indústria e mercado, com o objetivo de garantir o retorno financeiro e uma base sustentável para o crescimento das florestas. Para isso, devem ser desenvolvidas técnicas para identificação das oportunidades, alternativas de uso e estimativas dos diferentes produtos que as florestas podem oferecer (PAIXÃO et al., 2006).

2.3 Importância dos ecossistemas florestais como sumidouros de CO₂

De acordo com Brown (1997), o papel das florestas no ciclo do carbono é muito importante, pois estas armazenam grandes quantidades de carbono na vegetação e no solo, trocando o carbono com a atmosfera por meio da fotossíntese e da respiração. Em contrapartida, as florestas podem funcionar como fonte de carbono atmosférico pela ação antrópica e natural, por meio da carbonização da biomassa, respiração ou decomposição de seus resíduos.

O ciclo do carbono consiste na transferência deste elemento, por meio de queima, respiração, reações químicas, para a atmosfera ou para o mar e a sua reintegração na matéria orgânica (GAUDARD, 2010). O CO₂ chega até a atmosfera por meio da respiração dos animais e vegetais, da decomposição e queima das substâncias orgânicas e da atividade dos oceanos, retornando ao solo por meio da fotossíntese das plantas terrestres e dos plânctons oceânicos.

De acordo com Paula e Valle (2007), mesmo que alguns sistemas naturais sejam grandes reservatórios de carbono, como o oceano, a dinâmica do seu ciclo é controlada por sistemas com capacidade de trocá-lo ativamente com a atmosfera, como é o caso da vegetação e do solo. A capacidade do oceano como sumidouro é baixa, pois a molécula de CO₂ não se dissolve facilmente na água, e grande parte dos oceanos tem uma baixa produtividade de matéria orgânica. Contudo, a fotossíntese que ocorre nas plantas terrestres é responsável pela retenção de carbono atmosférico no material vegetal e, eventualmente, na matéria orgânica no solo (PACHECO; HELENE, 1990).

Péllico Netto et al. (2008) afirmam que as florestas desempenham papel fundamental na redução das emissões e remoções de CO₂ pela conservação florestal e fixação de carbono. A conservação florestal, obtida por meio de planos de manejo, assegura a fixação de carbono nas árvores por meio do crescimento anual, contrapondo-se às ações de desmatamento e queimada. A

fixação está relacionada com o florestamento e reflorestamento, para fins comerciais e ambientais, ocorrendo nesses casos uma maior absorção, pelo fato das árvores estarem em pleno desenvolvimento e crescimento.

Há diferenças no estoque de carbono presente nos diferentes biomas e nos diferentes locais dentro dos biomas. As florestas nativas ou plantadas também apresentam diferentes estoques de carbono em sua biomassa, pode-se citar a idade, espécie, fenômenos edafoclimáticos, sítio e densidade de plantio como fatores determinantes da taxa de produtividade da floresta e conseqüentemente da acumulação do CO₂ (FEARNSIDE, 1994; HOUGHTON, 1994; KOEHLER; WATZLAWICK; KIRCHNER, 2002; VIEIRA et al., 2009).

De acordo com Ribeiro (2007), uma floresta jovem estoca menos carbono se comparada com uma floresta madura, porém, quando considera-se o sequestro de carbono da atmosfera ao longo do tempo a floresta jovem se sobressai. Como evidência dessa afirmação, Coutinho (2009) quantificou o estoque líquido de carbono na biomassa aérea após a substituição de uma área de pastagem por plantio de eucalipto e regeneração natural de espécies nativas em região de Mata Atlântica, no município de Cruzeiro, SP. O plantio de eucalipto tinha 4 anos de idade, a área de regeneração 35 anos e o pasto tinha aproximadamente 90 anos. O autor encontrou estoque de carbono de 45 Mg ha⁻¹ para a mata secundária, 34,1 Mg ha⁻¹ para o plantio de eucalipto e 2,2 Mg ha⁻¹ para o pasto. Observou-se que o estoque de carbono na mata secundária foi superior ao plantio de eucalipto. O autor justificou esse resultado porque a idade da área de regeneração era superior ao reflorestamento com eucalipto. Em contrapartida, considerando o incremento médio anual de carbono (IMC), a área de mata secundária apresentou um IMC de 1,3 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto a área de eucalipto apresentou IMC de 8,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

2.4 Metodologias para quantificação de biomassa e carbono em florestas

Para que haja precisão na quantificação de carbono fixado nos ecossistemas florestais, a variável biomassa deve ser estimada de forma fidedigna (SANQUETTA, 2002). Segundo Cotta et al. (2008), para a obtenção do carbono total estocado na biomassa florestal deve-se considerar a biomassa presente nos diversos compartimentos das árvores como fuste, casca, raízes, folhas, galhos.

Existem diferentes métodos de estimar estoque de carbono na biomassa, podendo estes ser classificados em quatro tipos, segundo Bombelli et al. (2009): *in situ* destrutivo, *in situ* não destrutivo, inferência a partir de sensoriamento remoto e por modelos.

O método *in situ* destrutivo é realizado a partir do corte das árvores, separação nos diversos compartimentos e determinação da massa seca. Nesse método, as medições podem ser baseadas em cada árvore individualmente ou em uma unidade amostral. É um método preciso quando se trata de pequenas áreas, em contrapartida torna-se oneroso e inviável em larga escala. Este método é muito utilizado em pesquisas para o desenvolvimento de equações com objetivo de determinar a biomassa em grandes áreas (BOMBELLI et al., 2009).

O método *in situ* não destrutivo compreende a medição das variáveis dendrométricas (DAP e altura), sem a necessidade da derrubada das árvores. Nesse caso, as estimativas de biomassa e carbono por unidade de área são obtidas por meio de fatores de conversão ou de equações alométricas, e a acurácia dos resultados depende da representatividade na amostragem do ecossistema avaliado (BOMBELLI et al., 2009).

A inferência a partir de sensoriamento remoto utiliza dados de sensoriamento remoto para ampliação das estimativas de biomassa para grandes áreas, onde não é possível a realização de inventário florestal. Esse método pode

ser aplicado em associação com o inventário florestal nos locais onde há escassez de dados para determinação da biomassa (BOMBELLI et al., 2009).

O uso de modelos consiste em extrapolar as estimativas de biomassa ao longo do tempo e/ou espaço a partir de dados *in situ* ou de sensoriamento remoto. Normalmente, utilizam-se modelos empíricos baseados em medições periódicas em árvores localizadas em unidades amostrais permanentes (BOMBELLI et al., 2009).

Maestri et al. (2004) relatam que, para embasar a tomada de decisão, é necessário que haja metodologias de amostragem e modelagem das frações raiz, tronco e folhas. O desenvolvimento de metodologias de quantificação de carbono confiáveis e de baixo custo é necessário para viabilização de estudos de estoque carbono, sendo importante para negociação de créditos de carbono entre as partes interessadas (GUTIÉRREZ; LOPERA, 2001).

Segundo Koehler et al. (2005), o emprego de equações e fatores empregados para determinação de biomassa e carbono podem sub ou superestimarem os resultados. Watzlawick et al. (2004) afirmam que a estimativa de estoque de carbono por meio do fator de conversão de 50% é irreal. Os autores ainda ressaltam a importância da determinação dos teores de carbono para cada espécie e compartimento da planta objetivando resultados reais e coerentes.

2.5 Carbono presente na parte aérea em povoamentos florestais

As plantas dotadas de clorofila e sob a presença de luz solar fixam carbono por meio do fenômeno da fotossíntese, que consiste na retirada do CO₂ atmosférico e água do solo, emitindo oxigênio e capturando carbono em sua biomassa ao longo do seu crescimento. De acordo com Boina (2008), devido ao porte avantajado, longevidade e possibilidade de crescimento em maciços, as

árvores ganham destaque entre os seres vivos com maior capacidade de armazenar carbono em sua biomassa. A autora ainda ressalta que a fixação de carbono em uma floresta ocorre na folhagem, galhos, fuste, raízes, serrapilheira e solo, sendo todos esses compartimentos passíveis de cômputo.

Segundo Ferez (2010), a transformação da biomassa em carbono deve ser realizada com base no teor de carbono de cada componente (folhas, fuste, galhos e raízes). Miranda (2008) afirma que normalmente é empregado um teor fixo de 50% de carbono, devido aos custos de análise. Entretanto, o ideal é que o teor de carbono seja estimado em laboratório, visto que pequenas diferenças podem levar a sub ou superestimação do estoque de carbono.

Muller et al. (2009) estimaram o estoque de biomassa e carbono aéreo por meio de equações alométricas, em um sistema silvipastoril, com área de 4 ha, composto por *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*, na Zona da Mata Mineira. Os valores obtidos pelos autores foram de 24,8 Mg ha⁻¹ de biomassa e 11,17 Mg ha⁻¹ de carbono para eucalipto e 6,94 Mg ha⁻¹ de biomassa e 3,12 Mg ha⁻¹ de carbono para acácia.

Ribeiro et al. (2009) quantificaram a biomassa e carbono no fuste sem casca em uma floresta madura no município de Viçosa, por meio da densidade média da madeira das espécies de maior valor de importância. Os autores encontraram 166,67 Mg ha⁻¹ de biomassa e 83,34 Mg ha⁻¹ de carbono.

Marcene et al. (2006) estimaram a biomassa e carbono no fuste em uma área de 265,89 ha plantada com *Gmelina arborea* Roxb aos 10 anos de idade, localizada na região litorânea do Paraná e encontraram valores de biomassa de 60 a 210 Kg/árvore, com média de 120 Kg, e quantidade de carbono no fuste variando entre 30 Kg até 85 Kg, com média de 50 Kg. Os autores afirmam que o incremento médio em carbono foi de 5 Kg ano⁻¹ e que as árvores da espécie em estudo acumularam biomassa seca e carbono de modo bastante diferenciado, em função do estágio sucessional e sítio.

Balbinot et al. (2008), analisando a dinâmica do estoque de carbono em plantações de *Pinus* spp. em diferentes classes de idade entre os anos de 1993 e 2000, no município de General Carneiro, por meio de imagens de satélite, observaram que o valor encontrado do carbono presente na biomassa do fuste foi de 71 Mg ha^{-1} , representando cerca de 70% de todo carbono fixado.

Fernandes et al. (2007) avaliaram o estoque de carbono nos diferentes compartimentos das árvores de *Hevea* sp. com idade de 12 anos, no município de Oratórios, e obtiveram estoque de carbono $62,10 \text{ Mg ha}^{-1}$ e IMC de $5,18 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Do total desse estoque, 35,9% pertencem aos galhos, 30,1% ao fuste, 29,9% às raízes e 4,1% às folhas.

Torres et al. (2011) estudaram o estoque de carbono encontrado na cultura do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) aos 3 anos de idade, no município de Viçosa, e encontraram $4,18 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono estocado e incremento médio de carbono de $1,39 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Wink (2009) estudou o estoque de carbono total em plantações de *Eucalyptus* sp. com diferentes idades, localizado em campo nativo na Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária, na cidade de Boca do Monte e obteve valores de 2,32 a $15,56 \text{ Mg ha}^{-1}$ no povoamento com 20 meses de idade, 6,31 a $54,92 \text{ Mg ha}^{-1}$ no povoamento de 44 meses de idade e 13,28 a $335,16 \text{ Mg ha}^{-1}$ no povoamento com 240 meses de idade.

Estudos realizados por Melo e Durigan (2006) com objetivo de quantificar o estoque de carbono em matas ciliares nativas no Vale do Paranapanema, apresentaram valores de 50 Mg ha^{-1} sob solos de cerrado e $79,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ sob solos de Floresta Estacional Semidecidual. Os autores concluíram que o estoque de biomassa na mata ciliar nativa em região de Floresta Estacional Semidecidual foi 60% superior à mata ciliar em domínio de Cerrado.

Os estudos relacionados à quantificação do estoque de carbono aéreo tornam-se importantes para a escolha da espécie em caso de florestamento ou

reflorestamento com objetivo de geração de créditos de carbono. Tais estudos mostram que as florestas são instrumentos eficazes no sequestro de CO₂ emitido, no contexto do MDL.

2.6 Carbono presente nas raízes de espécies florestais

As raízes possuem importância vital para os vegetais, pois além das funções de fixação, absorção e condução de água e nutrientes, representam uma das principais fontes de matéria orgânica para o solo, influenciando a atividade microbiana e processos de decomposição (CHENG, 1999).

De acordo com Cerri et al. (1992), nos ecossistemas florestais o carbono orgânico é incorporado ao solo de duas maneiras: pela via epígea, que ocorre por meio dos resíduos animais e vegetais depositados na superfície do solo para formar a serrapilheira; e pela via endógena, por meio da exsudação de raízes vivas ou dos produtos de sua decomposição quando a raiz morre.

Em ecossistemas florestais as raízes finas, ou seja, aquelas com diâmetro menor que 2 mm, desempenham papel importante na ciclagem de nutrientes por serem uma porção dinâmica da biomassa subterrânea. Essas raízes estão relacionadas com a respiração do solo, absorção de água e nutrientes e atividade de micorrizas (ALBUQUERQUE FILHO et al., 2010; HANSON; ANDRÉN; STEEN 1991).

O conhecimento sobre o funcionamento do sistema radicular é de grande importância, pois auxilia também no manejo das florestas plantadas (RUFINO, 2009). De acordo com Rylter (1997), as raízes finas das plantas são responsáveis pelo acesso aos recursos do solo, e o seu comprimento e número são características que indicam a capacidade de absorção de nutrientes.

As raízes finas são mais abundantes no horizonte orgânico, onde está concentrado cerca de 40% a 70% da biomassa dessas raízes, porém dessa

proporção, 50% a 80% correspondem a biomassa morta, devido a sua rápida decomposição e regeneração (EHRENFELD; KALDOR; PARMELEE, 1992; FREITAS; BARROSO; CARNEIRO, 2008; HENDRICK; PREGITZER, 1993; VOGT; GRIER; VOGT, 1986).

De acordo com Sainju e Good (1993), para entender as relações existentes entre as raízes com a parte aérea, características edáficas e padrões de absorção de água e nutrientes, é importante o entendimento sobre a biomassa das raízes e sua distribuição no solo.

Outra importância com relação ao conhecimento da dinâmica de raízes finas (comprimento, biomassa e conteúdo nutricional) presentes nas camadas superficiais do solo e na serrapilheira, refere-se à possibilidade de prevenção de impactos, como incêndios, queima controlada e gradagem, que visam à diminuição da camada do material combustível presente no piso florestal (SCHUMACHER, 2009 citado por LOPES, 2009).

Paiva, Rezende e Pereira (2011), estudando o estoque de carbono subterrâneo sob vegetação lenhosa de um cerrado *sensu stricto*, na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília, verificaram que 88,7% do carbono está localizado no solo e 7,3% nas raízes, sendo os valores encontrados de 271,23 Mg ha⁻¹ para o solo e 22,38 Mg ha⁻¹ para as raízes.

Os estudos realizados mostram a relação intrínseca entre as raízes e solo. Apesar de poucos estudos sobre a sua distribuição espacial, essa é uma estrutura fundamental para explicação dos padrões de distribuição das florestas, permitindo assim o seu manejo correto.

2.7 Carbono presente no solo sob povoamentos florestais

O solo possui papel fundamental no ciclo global do carbono, pois funciona como um reservatório com cerca de duas vezes a quantidade de carbono na atmosfera e na biomassa vegetal (SWIFT, 2001).

De acordo com Mafra et al. (2008), a dinâmica do carbono e nutrientes minerais é influenciada pelo clima, tipo de solo, cobertura vegetal e práticas de manejo. Os autores ainda ressaltam que há maior capacidade de ciclagem de nutrientes para as espécies florestais em detrimento às plantas de ciclo anual, devido ao sistema radicular permanente e profundo que absorve elementos de camadas subsuperficiais, retornando-os à superfície pela deposição da serrapilheira.

O carbono orgânico total do solo está distribuído nas proporções de 4% na matéria orgânica viva e 98% na matéria orgânica morta. Dessa cota, 60% a 80% do carbono presente na matéria orgânica viva corresponde aos microorganismos, representados por fungos e bactérias, 15% a 30% pertence às minhocas, ácaros e térmitas e 5% a 10% pertence às raízes (MACHADO, 2005).

Segundo Costa et al. (2008), o balanço de carbono no solo depende da relação entre as adições de carbono fotossintetizado pelas plantas e pelas perdas de carbono para a atmosfera, resultantes da oxidação microbiana do carbono orgânico a CO₂. De acordo com Baddeley et al. (2004), o desmatamento e a queima de vegetação nativa são consideradas práticas que acarretam perdas do carbono do solo, reduzindo drasticamente a deposição de resíduos sem uma alteração proporcional na decomposição da matéria orgânica do solo.

Oliveira et al. (2000) afirmam que o solo possui como característica marcante a heterogeneidade, ocorrendo variações em suas propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas, influenciando diretamente as concentrações de carbono. Vieira (2000) sugere o uso da estatística espacial, por

meio da krigagem ordinária, para caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo, pois permite estimar os valores desses atributos em áreas não amostradas, direcionando, com isso, as pesquisas de amostragem do solo.

Couto, Klamt e Stein (2000), estudando a localização do potássio trocável e de argila nos horizontes A e B, por meio da krigagem ordinária, ao longo de transectos que cruzaram classes pedológicas distintas, no sul do estado de Mato Grosso, identificaram os locais onde a argila e potássio trocável estão concentradas, facilitando, com isso, futuros trabalhos de levantamentos pedológicos.

Cambardella et al. (1994) contribuíram para o fortalecimento da estatística espacial ao verificarem as semelhanças nos padrões de variabilidade espacial em alguns atributos de solo em locais diferentes. Chig et al. (2008) ressaltaram que isso permite a extrapolação das relações medidas em uma área para outros locais não amostrados, dentro de uma mesma bacia hidrográfica ou em escala regional.

Scurlock e Hall (1998 citados por ADUAN; VILELA; KLINK, 2003) estimam que 80% do carbono total dos ecossistemas de savana está presente no solo e que este possui distribuição espacial irregular, onde os maiores teores de carbono encontram-se sob as árvores. Os autores ressaltam que um enriquecimento arbóreo pode elevar o valor de estoque de carbono nesse solo de 67 Mg ha^{-1} para 149 Mg ha^{-1} , assemelhando-se às florestas tropicais.

Novaes Filho et al. (2007), trabalhando com a distribuição espacial de carbono em solos sob floresta primária na Amazônia Meridional, verificaram dependência espacial desse atributo no horizonte superficial e subsuperficial. Os autores concluíram também que a concentração de carbono varia de acordo com a fitofisionomia vegetal, posição topográfica da paisagem e características intrínsecas do solo como a textura.

Estudos realizados por Caldeira et al. (2003) em um povoamento de *Acacia mearnsii*, com 4 e 6 anos de idade, no município de Butiá, mostraram que o estoque de carbono orgânico no solo sob esse povoamento, a 1m de profundidade, foi de 110,1 Mg ha⁻¹ para o povoamento de 4 anos e 101,5 Mg ha⁻¹ para o povoamento de 6 anos.

Balbinot, Schumacher e Hernandes (2000), estimando o estoque de carbono no solo sob um povoamento de *Pinus taeda*, com 15 e 20 anos de idade, observaram que a 1 m de profundidade os valores foram de 246 Mg ha⁻¹ e 189,7 Mg ha⁻¹ para as respectivas idades.

Observou-se, por meio dos estudos realizados, que a heterogeneidade do carbono existente no solo está diretamente ligada a fitofisionomia vegetal e características edafoclimáticas. Os estudos evidenciam a real importância do solo como sumidouro de carbono.

2.8 Teoria da geoestatística

A teoria da estatística clássica baseia-se na hipótese de que as variações entre locais distintos são aleatórias, não ocorrendo dependência espacial. Entretanto, o engenheiro de minas Krige (1951), ao trabalhar com dados de concentração de ouro na África do Sul, observou que a variância não fazia sentido se não fosse considerada a distância entre os locais onde foram coletadas as amostras.

Na década de 60 na França, o estudioso Matheron (1963) desenvolveu a teoria fundamental da geoestatística, conhecida como Teoria das Variáveis Regionalizadas, com base nas observações do engenheiro de Minas Krige. A teoria fundamental da geoestatística é a esperança de que, na média, as amostras próximas no tempo e espaço sejam mais similares entre si do que as que estiverem distantes (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Vieira (2000) define a Teoria das Variáveis Regionalizadas $Z(x)$ como uma variável aleatória que assume diferentes valores Z em função da posição x dentro de uma certa região S , e representa pares de coordenadas (x_i, y_i) (Gráfico 1).

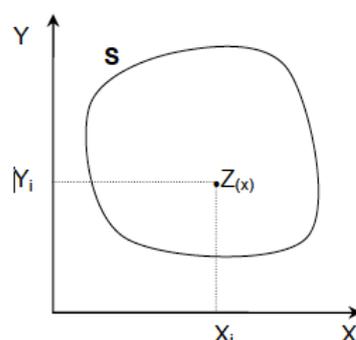


Gráfico 1 Variável aleatória regionalizada $Z(x)$
Fonte: Genú (2004)

A variância é a medida de dispersão dos dados em torno da média, sendo um estimador usado na estatística clássica. A variância das variáveis regionalizadas na geoestatística é caracterizada pela semivariância, sendo o gráfico denominado semivariograma.

Os semivariogramas são ferramentas utilizadas para verificar a continuidade espacial da característica avaliada, sendo preferidos por exigirem hipóteses de estacionaridade menos restritivas. É esperado que observações mais próximas geograficamente tenham comportamentos mais semelhantes entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias (RIBEIRO JÚNIOR, 1995).

O estimador da semivariância $\hat{\gamma}(h)$ de Matheron representado abaixo é igual a metade da média aritmética das diferenças entre pares de valores experimentais ao quadrado, em todos os pontos separados pela distância h . Nesse estimador, $N(h)$ representa o número de pares separados por uma distância

h , $Z(x)$ é o valor da variável observada no ponto x e $Z(x+h)$ é o valor da variável medida a uma distância h do ponto x (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978).

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

De acordo com Vieira (2000), as características de um semivariograma ideal ocorrem quando a diferença $[Z(x) - Z(x+h)]$ diminui à medida que o valor de h decresça. Quando a distância é nula ($h=0$), o valor da semivariância será zero ($\gamma=0$). Porém, isso não ocorre, pois, à medida que a distância diminui, o valor da semivariância tende a um valor positivo conhecido como efeito pepita.

Os parâmetros do semivariograma que auxiliam na descrição da dependência espacial são o alcance, patamar, efeito pepita e contribuição. O alcance é a distância máxima a partir do qual os valores da variável passam a ser independentes. O patamar é o valor limite do semivariograma que iguala a variância dos valores da variável. O efeito pepita é atribuído a erros de mensuração aliado ao fato dos dados não terem sido coletados em intervalos suficientes para representar o comportamento espacial do fenômeno. A contribuição é a diferença entre o patamar e o efeito pepita (CRESSIE, 1993; ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

O Gráfico 2 mostra um semivariograma típico retirado do trabalho de Camargo (2001) com seus respectivos parâmetros que caracterizam a estrutura de correlação: efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$), alcance (a) e contribuição (C_1).

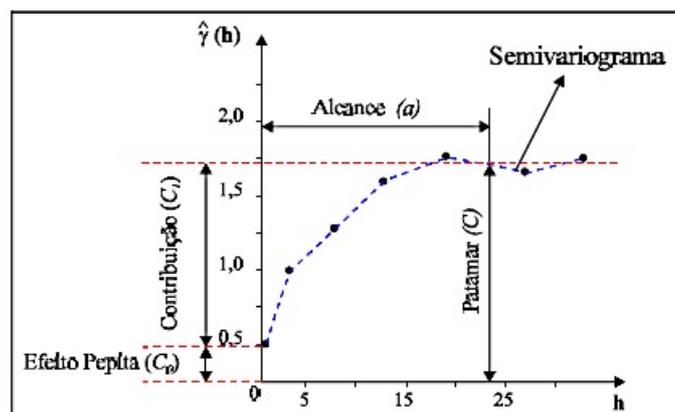


Gráfico 2 Semivariograma típico
Fonte: Camargo (2001)

De acordo com Vieira (2000), o efeito pepita representa a variância não explicada ou ao acaso, causada por erros de medições ou variações dos atributos que não podem ser detectados na escala de amostragem, logo, quanto maior for o valor do efeito pepita, mais fraca é a dependência espacial.

Os semivariogramas podem ser classificados em modelo com patamar definido (Gráfico 3 - A), modelo com efeito pepita puro (Gráfico 4 - B) e modelo sem patamar (Gráfico 5 - C). Modelos com patamar são referenciados na geoestatística como modelos transitivos, sendo os mais utilizados o esférico, exponencial e gaussiano (Gráfico 6). Para o modelo esférico, o alcance é obtido quando se atinge o patamar. Já nos modelos exponencial e gaussiano, o alcance prático é obtido a 95% do patamar. Modelos sem patamar continuam aumentando enquanto a distância aumenta. Tais modelos são utilizados para modelar fenômenos que possuem capacidade infinita de dispersão (CAMARGO, 2001).

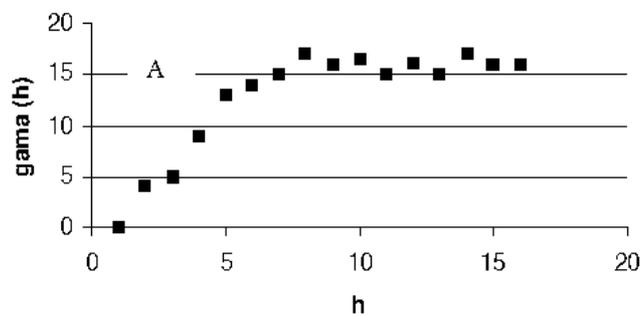


Gráfico 3 (A) Semivariograma com patamar definido
Fonte: Guimarães (2004)

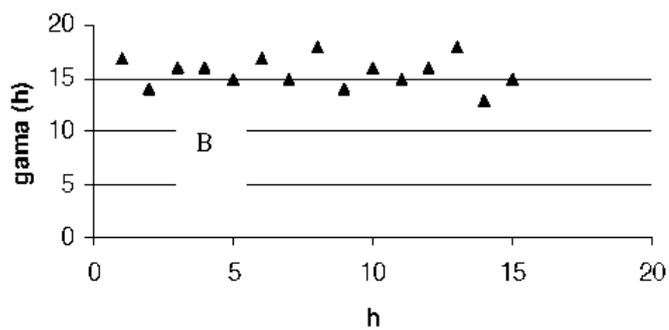


Gráfico 4 (B) Semivariograma com efeito pepita puro
Fonte: Guimarães (2004)

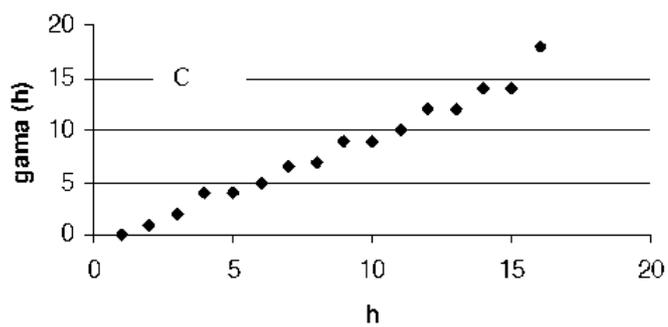


Gráfico 5 (C) Semivariograma sem patamar definido
Fonte: Guimarães (2004)

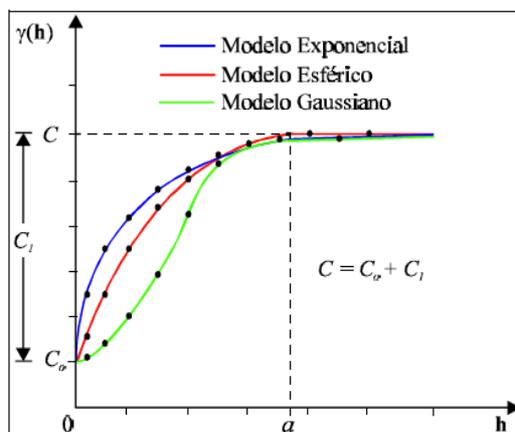


Gráfico 6 Modelos de ajuste de semivariogramas
Fonte: Camargo (2001)

Considerando C_0 como efeito pepita, $C_0 + C$ como patamar e a como alcance, os principais modelos de semivariogramas utilizados na geoestatística são:

a) Modelo esférico (MATHERON, 1971).

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]$$

b) Modelo exponencial (FORMERY).

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{-3(h/a)} \right]$$

c) Modelo gaussiano (GAUSS).

$$\gamma(h) = C_0 + C[1 - e^{-3(h/a)^2}]$$

Para o ajuste dos modelos ao semivariograma experimental, foram desenvolvidos alguns métodos de ajustes como o método dos quadrados mínimos ordinários, quadrados mínimos ponderados e máxima verossimilhança. O último método é aplicado diretamente à base de dados enquanto os outros são aplicados ao semivariograma experimental (CRESSIE, 1993).

De acordo com Zimback (2001), para detectar a variabilidade espacial das amostras, por meio dos semivariogramas, deve-se ajustar de maneira eficiente os dados experimentais ao modelo teórico do semivariograma, que pode ser feito de maneira visual, ou seja, “ajuste à sentimento”.

Camargo (2001) ressalta que o procedimento de ajuste de um semivariograma não é direto e automático, como realizado em uma regressão, mas sim interativo pois, nesse caso, é feito um primeiro ajuste e verifica-se a adequação do modelo teórico. Dependendo do ajuste obtido, é possível ou não a redefinição do modelo, até a obtenção de um que seja satisfatório.

O semivariograma permite verificar e modelar a dependência espacial de uma variável e o interpolador que o utiliza em sua modelagem é conhecido como krigagem. A krigagem tem como função principal o conhecimento de determinada característica em locais não amostrados (GUIMARÃES, 2004). Tal técnica se destaca entre os demais métodos de interpolação, pois os pesos são atribuídos de acordo com a variabilidade espacial expressa no semivariograma, baseada nos seus vizinhos, não sendo tendenciosos, apresentando variância mínima e possibilitando o conhecimento da variância da estimativa (AMARAL et al., 2010).

Existem vários interpoladores para estimar valores em pontos não amostrados, como krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem universal, krigagem indicadora, entre outros (SOARES, 2000). Considerando a krigagem simples, as médias locais são constantes e com valor semelhante à média populacional, ou seja, a média da população é utilizada em conjunto com os pontos vizinhos para a estimação do atributo. A krigagem universal é um método eficiente para os casos onde não ocorre a estacionaridade, ou seja, o processo apresenta uma tendência (SANTOS et al., 2011). Na krigagem ordinária desconsidera-se a média populacional e utiliza somente os pontos vizinhos para a estimação, além de considerar a estacionaridade dos dados. Segundo Isaaks e Srivastava (1989), a krigagem ordinária é o melhor estimador linear não viciado.

A geoestatística apresenta-se como técnica eficiente para avaliação espacial, porém, para a sua aplicação é necessário detalhar a área onde será implantado o estudo. Para isso, todas as informações devem ser referenciadas juntamente com um processo de amostragem dentro de uma região geográfica definida. Esse processo é viabilizado pela implantação de um sistema de coordenadas locais ou geográficas, no qual cada atributo ou característica terá suas informações quantitativas e/ou qualitativas associadas a um ponto no espaço (BOGNOLA et al., 2007).

REFERÊNCIAS

ABREU, J. C. **Potencial Alelopático do angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina* (L.) Speng.)**: efeitos sobre a germinação de sementes e ciclo mitótico de plântulas de Alface (*Lactuca sativa* L.) e Carnafistula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.). 1997. 55 f. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1997.

ADUAN, E. A.; VILELA, M. F.; KLINK, C. A. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres**: o caso do cerrado brasileiro. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2003. 30 p.

ALBUQUERQUE FILHO, J. C. C. et al. Determinação de biomassa de raízes finas em solos do semi-árido de Pernambuco. In: JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 10., 2010, Recife. **Anais...** Recife: UFRPE, 2010. 1 CD-ROM.

AMARAL, L. P. et al. Análise da distribuição espacial de biomassa e carbono arbóreo acima do solo em floresta ombrófila mista. **Revista Ambiência**, Guarapuava, v. 6, p. 103-114, jul. 2010. Edição especial.

BADDEY, R. M. et al. **Sequestro de carbono em solos sob sistemas agropecuários produtivos**. Seropédica: EMBRAPA; Centro Nacional de Pesquisa de Agrobiologia, 2004. 3 p.

BALBINOT, R. et al. Estoque de carbono em plantações de *Pinus* spp. em diferentes idades no sul do estado do Paraná. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 317-324, jun. 2008.

BALBINOT, R.; SCHUMACHER, M. V.; HERNANDES, J. I. Carbono orgânico em uma floresta de *Pinus taeda* na região de Cambará do Sul, RS. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL SOBRE FLORESTAS, 6., 2000, Porto Seguro. **Resumos Técnicos...** Porto Seguro: CEIF, 2000. p. 56.

BOGNOLA, I. A. et al. Modelagem uni e bivariada da variabilidade espacial de rendimento de *Pinus taeda* L. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, jun. 2007. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/floresta/article/viewArticle/11632>>. Acesso em: 10 mar. 2012.

BOINA, A. **Quantificação de estoques de biomassa e de carbono em floresta estacional semidecidual, vale do Rio Doce, Minas Gerais**. 2008. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

BOMBELLI, A. et al. **Assessment of the status of the development of the standards for the terrestrial essential climate variables: biomass**. Rome: FAO, 2009. 18 p.

BROWN, S. Los bosques y el cambio climático: el papel de terrenos forestales como sumidouro de carbono. In: CONGRESSO FLORESTAL MUNDIAL, 1., 1997, Ankara. **Anais...** Ankara: CFM, 1997. p. 107-121.

CALDEIRA, M. V. W. et al. Determinação de carbono orgânico em povoamentos de *Acacia mearnsii* de Wild. plantados no Rio Grande do Sul. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 1, n. 2, p. 47-54, jun. 2003.

CAMARGO, E. C. G. **Geoestatística: fundamentos e aplicações**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. 36 p. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2012.

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

CERRI, C. C. et al. **Microbiologia do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. 15 p.

CHENG, W. Rhizosphere feedback in elevated CO₂. **Tree Physiology**, Victoria, v. 19, p. 313-320, 1999.

CHIG, L. A. et al. Distribuição espacial da granulometria, cor e carbono orgânico do solo ao longo de um transecto em microbacias na Amazônia meridional. **Revista Acta Amazônica**, Manaus, v. 38, n. 4, p. 715-722, dez. 2008.

COSTA, F. S. et al. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 323-332, out. 2008.

COTTA, M. K. et al. Quantificação de biomassa e geração de certificados de emissão reduzidas no consórcio seringueira-cacau. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 969-978, dez. 2008.

COUTINHO, R. P. **Estoques de carbono e emissão de N₂O no sistema solo-planta em região da Mata Atlântica**. 2009. 68 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2009.

COUTO, E. G.; KLAMT, E.; STEIN, A. Estimativa do teor de argila e do potássio trocável em solos esparsamente amostrados no sul do Estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 1, p. 129-140 jul. 2000.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1993. 900 p.

EHRENFELD, J.; KALDOR, E.; PARMELEE, R. W. Vertical distribution of roots along a soil toposequence in the New Jersey Pinelands. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 22, p. 1929-1936, Sept. 1992.

FEARNSIDE, P. M. Biomassa das florestas amazônicas brasileiras. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQUESTRO DE CO₂: UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1., 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p. 95-124.

FEREZ, A. P. C. **Efeito de práticas silviculturais sobre as taxas iniciais de sequestro de carbono em plantios de restauração da Mata Atlântica**. 2010. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010.

FERNANDES, T. J. G. et al. Quantificação do carbono estocado na parte aérea e raízes de *Hevea* sp. aos 12 anos de idade, na Zona da Mata Mineira. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 4, p. 657-665, ago. 2007.

FONSECA FILHO, C. A. Árvores do Brasil. **Chácaras e Quintais**, Rio de Janeiro, v. 101, n. 4, p. 406-409, mar. 1960.

FREITAS, T. A. S.; BARROSO, D. G.; CARNEIRO, J. G. A. Dinâmica de raízes de espécies arbóreas: visão da literatura. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 1, p. 133-142, mar. 2008.

GAUDARD, D. M. **A origem do mercado de crédito do carbono**. Disponível em: <<http://www.conpet.gov.br/artigos>>. Acesso em: 2 mar. 2010.

GENÚ, A. M. **Geoestatística multivariada**. São Paulo: USP, 2004. Trabalho apresentado à disciplina de análise multivariada.

GONÇALVES, E. O. et al. Nutrição de mudas de angico-vermelho (*Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) Brenan) submetidas a doses de N, P, K, Ca e Mg. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 2, p. 219-228, abr. 2012.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia: UFU, 2004. 77 p. Apostila.

GUTIÉRREZ, V. H.; LOPERA, G. J. Flujo de carbono y respuesta a diferentes estrategias de manejo en plantaciones tropicales de *Pinus patula*. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL: MEDICIÓN Y MONITOREO DE CARBONO EM ECOSISTEMAS FORESTALES, 1., 2001, Valdivia. **Anales...** Valdivia: Universidad Nacional de Colombia, 2001. p. 1-20.

HANSON, A. C.; ANDRÉN, O.; STEEN, E. Root production of four arable crops in Sweden and its effects on abundance of soil organisms. In: ATKINSON, D. (Ed.). **Plant root growth: an ecological perspective**. London: Blackwell Scientific, 1991. p. 247-253.

HENDRICK, R.; PREGITZER, K. The dynamics of fine root length, biomass and nitrogen content in two northern hardwood ecosystem. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 23, p. 2507-2520, July 1993.

HOUGHTON, R. A. As florestas e o ciclo de carbono global: armazenamento e emissões atuais. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQUESTRO DE CO₂: UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1., 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p. 38-76.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2001: the scientific basis**. Geneva, 2001. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/pub/un/ipccwgl.pdf>>. Acesso em: 1 jan. 2012.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 600 p.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistics**. London: Academic, 1978. 600 p.

KHANDEKAR, M. L.; MURTY, T. S.; CHITTIBABU, P. The global warming debate: a review of the state of science. **Pure and Applied Geophysics**, Basel, v. 162, n. 8/9, p. 1557-1586, Jan. 2005.

KOEHLER, H. S. et al. Fontes de erros nas estimativas de biomassa e carbono fixado na Floresta Ombrófila Mista. **Biomassa e Energia**, Viçosa, MG, v. 2, n. 1, p. 69-77, ago. 2005.

KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. p. 251-264.

KOHLMAIER, G. H. et al. Future development of the carbon cycle: the role of the biota/forests within the IPCC stabilization scenarios. In: _____. **Carbon dioxide mitigation in forestry and wood industry**. New York: Springer, 1998. p. 269-291.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, Johannesburg, v. 52, n. 6, p. 119-139, Dec. 1951.

LEWIS, G. et al. **Legumes of the world**. Kew: Richmond, 2005. 592 p.

LOPES, V. G. **Quantificação das raízes finas em um povoamento de *Pinus taeda* L., na região do Campos de Cima da Serra, RS**. 2009. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil**. 2. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 1998. 384 p.

_____. _____. 4. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2002. 368 p.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 329-334, abr. 2005.

MACIEL, C. V. et al. Crédito de carbono: comercialização a partir de projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo. **Revista de Informação Contábil**, Recife, v. 3, n. 1, p. 89-112, mar. 2009.

MAESTRI, R. et al. Viabilidade de um projeto florestal de *Eucalyptus grandis* considerando o sequestro de carbono. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 3, p. 347-360, dez. 2004.

MAFRA, A. L. et al. Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 217-224, abr. 2008.

MARCENE, E. A. et al. Variação nos teores e estoques individuais de carbono fixado com o crescimento de *Gmelina arborea* Roxb. na região litorânea do Paraná, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 71, p. 55-63, ago. 2006.

MARTINS, J. R. et al. Ação de extratos aquosos de serapilheira de angico vermelho sobre a germinação e desenvolvimento de plântulas de alface. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE ECOLOGIA, 3., 2009, São Lourenço. **Anais...** São Lourenço: CLAE, 2009. 1 CD-ROM.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables**. Paris: École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1971. 211 p. (Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleu, 5).

_____. **Traité de géostatistique appliquée**: mémoires du bureau de recherches géologiques et minières. Paris: Technip, 1963. v. 24, tome II.

MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. Fixação de carbono em reflorestamentos de matas ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brazil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 71, p. 149-154, ago. 2006.

MIRANDA, D. L. C. **Modelos matemáticos de estoque de biomassa e carbono em áreas de restauração florestal no sudoeste paulista**. 2008. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MONTEIRO, J. M. et al. Teor de taninos em três espécies medicinais arbóreas simpátricas da Caatinga. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 6, p. 999-1005, dez. 2005.

MORIM, M. P. Leguminoseae arbustiva e arbóreas da floresta Atlântica do Parque Nacional do Itatiaia, Sudeste do Brasil: padrões de distribuição. **Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 57, n. 1, p. 27-45, dez. 2005.

MULLER, M. D. et al. Estimativa de acúmulo de biomassa e carbono em sistema agrossilvipastoril na Zona da Mata Mineira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 60, p. 11-17, dez. 2009. Edição especial.

NISHI, M. H. et al. Influência dos créditos de carbono na viabilidade financeira de três projetos florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 2, p. 263-270, jan. 2005.

NOVAES FILHO, J. P. et al. Distribuição espacial de carbono em solo sob floresta primária na Amazônia Meridional. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 1, p. 83-92, fev. 2007.

OLIVEIRA, F. H. T. et al. Fertilidade do solo no sistema de plantio direto. In: ALVAREZ, V. H. et al. (Ed.). **Tópicos em ciências do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2000. v. 2, p. 393-486.

OLIVEIRA, R. R. Ação antrópica e resultantes sobre a estrutura e composição da Mata Atlântica na Ilha Grande, RJ. **Revista Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 53, n. 82, p. 33-58, jan. 2002.

PACHECO, M. R. P. S.; HELENE, M. E. M. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 4, n. 9, p. 204-220, ago. 1990.

PAIVA, A. O.; REZENDE, A. V.; PEREIRA, R. S. Estoque de carbono em Cerrado *Sensu stricto* do Distrito Federal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 3, p. 527-538, abr. 2011.

PAIXÃO, F. A. A. et al. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 3, p. 411-420, abr. 2006.

PAULA, T. A.; VALLE, C. M. Quantificação do estoque de carbono no solo e a mitigação da mudança climática. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 2., 2007, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: UFPB, 2007. 1 CD-ROM.

PÉLLICO NETTO, S. et al. Estimativa do potencial de neutralização de dióxido de carbono no programa Vivat Neutracarbo em Tijucas do Sul, Agudos do Sul e São José dos Pinhais, PR. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, São José dos Pinhais, v. 6, n. 2, p. 293-306, jun. 2008.

RIBEIRO, S. C. **Quantificação do estoque de biomassa e análise econômica da implementação de projetos visando à geração de créditos de carbono em pastagem, capoeira e floresta primária**. 2007. 139 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

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

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. 1995. 99 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1995.

ROCHA, M. T. O aquecimento global e os instrumentos de mercado para a solução do problema. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. p. 1-34.

RUFINO, A. M. M. **Estoque de carbono em solos sob plantios de eucalipto e fragmento de cerrado**. 2009. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

RYLTER, R. M. **Fine root production and carbon and nitrogen allocation in basket willows**. 1997. 107 p. Thesis (Doctor in Agricultural Sciences) - University of Agricultural Sciences, Uppsala, 1997.

SAINJU, U. M.; GOOD, R. E. Vertical root distribution in relation to soil properties in New Jersey Pinelands forests. **Plant and Soil**, Bethlehem, v. 150, n. 1, p. 87-97, Sept. 1993.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: _____. **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. p. 119-140.

SANTOS, G. R. et al. Krigagem simples versus krigagem universal: qual o preditor mais preciso? **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 26, n. 2, p. 49-55, jul. 2011.

SANTOS, Z. M. **Avaliação da durabilidade natural da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden em ensaios de laboratório**. 1991. 192 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1991.

SCARPINELLA, G. A. **Reflorestamento no Brasil e o Protocolo de Quioto**. 2002. 182 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SILVA, R. F. et al. Projeção do estoque de carbono e análise da geração de créditos em povoamentos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 979-992, dez. 2008.

SILVA, R. M. G. et al. Potencial alelopático de extrato etanólico de *Anadenanthera macrocarpa* e *Astronium graveolens*. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 4, p. 632-637, ago. 2010.

SOARES, A. **Geoestatística para ciência da terra e do ambiente**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2000. 206 p.

SWIFT, R. S. Sequestration of carbon by soil. **Soil Science**, Philadelphia, v. 166, n. 11, p. 858-871, Nov. 2001.

TORRES, C. M. M. E. et al. Biomass and carbon stock on *Jatropha curcas* L. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 3, p. 353-359, set. 2011.

TORTORELLI, L. A. **Maderas y bosques argentinos**. Buenos Aires: Acme, 1956. 910 p.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Essential background**. Disponível em: <http://unfccc.int/essential_background/items/2877.php>. Acesso em: 15 out. 2010.

VIEIRA, A. H. **Estudo dendrológico e anatômico das principais madeiras nativas utilizadas pelas serrarias na microrregião de Viçosa, Minas Gerais**. 1986. 142 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1986.

VIEIRA, G. et al. Teores de carbono em espécies vegetais da caatinga e do cerrado. **Revista Acadêmica, Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 145-155, jun. 2009.

VIEIRA, R. F. et al. Estratégias conservação e manejo de recursos genéticos de plantas medicinais e aromáticas. In: REUNIÃO TÉCNICA EMBRAPA/IBAMA/CNPq, 1., 2002, Brasília. **Anais...** Brasília: EMBRAPA; IBAMA; CNPq, 2002. 1 CD-ROM.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVARES, V. H.; SCHAEFFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

VOGT, K. A.; GRIER, C. C.; VOGT, D. J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above and belowground detritus of world forests. **Advances in Ecological Research**, London, v. 15, p. 303-377, 1986.

WATZLAWICK, L. F. et al. Teores de carbono em espécies da Floresta Ombrófila Mista. In: SANQUETTA, C. R.; BALBIONOT, R.; ZILLOTTO, M. A. (Ed.). **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba: UFPR, 2004. p. 95-109.

WINK, C. **Estoque de carbono em plantações de *Eucalyptus* sp. implantados em campo nativo**. 2009. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solo para fins de mapeamento de fertilidade do solo**. 2001. 114 p. Tese (Livre Docência em Ciências Agrônômicas) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

CAPÍTULO 2

Espacialização do estoque de carbono presente no fuste em um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar a dependência espacial do carbono armazenado no fuste em um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp., localizado no câmpus da Universidade Federal de Lavras, bem como estimar o estoque de carbono nesse local. Para a estimativa do volume das árvores foram utilizados dados de inventário florestal e cubagem rigorosa. A biomassa presente no fuste foi obtida pela relação densidade da madeira e volume e para obtenção do estoque de carbono utilizou-se o teor médio de 50%. Para a análise geoestatística foram considerados os pontos georreferenciados no centro de cada unidade amostral e os valores médios de estoque de carbono atribuídos a cada ponto. Após este estudo verificou-se que os dados apresentaram alta variabilidade, podendo ser explicada pela presença de *outliers*. Estimou-se uma média de estoque de carbono presente no fuste de 77,45 Mg ha⁻¹. Por meio dos estudos variográficos percebeu-se uma alta capacidade de dispersão na área, sendo ajustado o modelo gaussiano para a variável de estudo. Com base em tal modelo fez-se um mapa de krigagem no qual observou-se que estimativas de maior valor de estoque de carbono localizaram nas bordas da área, o que pode ser explicado pela presença das árvores com maior porte nesses locais.

Palavras-chave: *Anadenanthera* sp. Análise geoestatística. Fixação de carbono. CO₂. Espacialização.

ABSTRACT

This study aimed at analyzing the spatial dependence of the carbon stored in an *Anadenanthera* sp. predominating forest fragment located on the Universidade Federal de Lavras campus, and estimating the carbon stock in this location. To estimate the volume of trees data from forest inventory was used and cubage was conducted. The biomass in the stems was obtained by the ratio of wood density and volume and the carbon stock was found by using the average content of 50%. The georeferenced points in the center of each sampling unit were considered for the geostatistical analysis and the average carbon stock was assigned to each point. Results showed data high variability which can be explained by the presence of *outliers*. An average of 77,45 Mg ha⁻¹ of carbon stock in the stems was estimated. Variography studies showed a high dispersal capacity in the area and the gaussian model for the variable was adjusted. Based on this model, a kriging map was constructed which showed that the highest estimates of carbon were located at the edge of the area. This can be explained by the presence of large trees in those places.

Keywords: *Anadenanthera* sp. Geostatistical analysis. Carbon fixation. CO₂. Spatialization.

1 INTRODUÇÃO

O desequilíbrio ambiental causado pela ação antrópica nas últimas décadas, principalmente com relação ao aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, trouxe como consequência a intensificação do efeito estufa natural e as mudanças climáticas globais.

Entre os gases causadores da intensificação do efeito estufa (GEE), o CO₂ insere-se como responsável majoritário, uma vez que seu nível aumentou de 280 ppm em 1750 para 379 ppm em 2005 (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2011). As causas desse crescente aumento são decorrentes da queima de combustíveis fósseis por processos industriais e transportes e pelas mudanças no uso da terra.

Com objetivo de redução dos GEE, foi criado o Protocolo de Kyoto, que estabeleceu compromissos aos países do Anexo 1, determinando a redução de emissões de GEE para um nível médio de 5,2% inferior ao registrado em 1990, a serem cumpridos até 2012. O Protocolo de Kyoto previu mecanismos de flexibilização, dentre eles o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que possui entre os projetos elegíveis o sequestro e fixação de carbono por meio de atividades de florestamento e reflorestamento.

De acordo com Salomão, Nepstade e Vieira (1996), para viabilizar esses projetos é necessário estudar o estoque de carbono nos diversos compartimentos das árvores, compreender o sequestro e armazenamento de carbono pelas mesmas e entender os mecanismos de fluxo de carbono nos ecossistemas florestais.

As espécies florestais nativas têm sido bastante pesquisadas para reflorestamento, recuperação de áreas degradadas e também como fonte de madeira e produtos florestais não madeireiros. Dentre essas espécies destaca-se o gênero *Anadenanthera* com características favoráveis ao reflorestamento para

a geração de créditos de carbono, devido ao seu crescimento rápido e grande capacidade de regeneração natural.

O estoque de carbono presente nas florestas varia entre biomas e nos diferentes locais dentro dos biomas. Paiva, Rezende e Pereira (2011) estimaram o estoque de carbono aéreo em um cerrado *sensu stricto* e encontraram valor de 8,6 Mg ha⁻¹. Higuchi e Carvalho Júnior (1994) encontraram 177 Mg ha⁻¹ de carbono em 20 ha de floresta tropical úmida densa de terra firme. Considerando um povoamento de *Eucalyptus grandis* com 6 anos de idade, Paixão et al. (2006) obtiveram valores de 39,04 Mg ha⁻¹ de carbono presente no fuste com casca. Fernandes et al. (2007), estudando o estoque de carbono aéreo de *Hevea* sp. com 12 anos de idade, obtiveram valor de 62,10 Mg ha⁻¹.

A determinação do estoque de carbono em povoamentos florestais depende do estudo das variáveis biomassa e teor de carbono, contudo esses estudos normalmente desconsideram a dependência espacial. A geoestatística apresenta-se como uma ferramenta eficaz para análise de dados distribuídos no espaço e tempo, pois favorece o conhecimento sobre a espacialização do atributo estudado, permitindo um manejo preciso da área. Trabalhos realizados por Bognola et al. (2007), Mello et al. (2006), Novaes Filho et al. (2007) e Ushizima, Bernardi e Landim (2003), comprovam essa afirmação.

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi quantificar o estoque de carbono pelo método *in situ* não destrutivo e analisar espacialmente o carbono armazenado no fuste em um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada no Câmpus da Universidade Federal de Lavras, município de Lavras, Minas Gerais, cujas coordenadas geográficas são 21° 14' 30" sul e 44° 00' 10" oeste, com altitude de 919 m, numa área experimental com predominância de *Anadenanthera* sp. (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2011). O clima do município de Lavras é do tipo Cwb de Köppen (mesotérmico com verões brandos e estiagem de inverno). As médias anuais de precipitação e temperatura são de 1.460 mm e 20,4 °C, com 66% de precipitação ocorrendo no período de Novembro a Fevereiro (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007; VILELA; RAMALHO, 1979).

O fragmento florestal abordado nesse estudo fez parte de um projeto de pesquisa da “Subestação Experimental de Lavras”. O projeto foi implantado no ano de 1943, com o objetivo do consórcio da cultura cafeeira com a espécie florestal *Anadenanthera* sp. para a verificação do efeito do sombreamento sobre a cultura do café, devido à ocorrência de geadas. A cultura do café também foi implantada em uma área a pleno sol para comparações posteriores. A área total desse experimento totalizou 7,56 ha. Após 35 anos, verificou-se que os cafezais a pleno sol apresentaram uma produção 40% maior que nas áreas sombreadas, e a área de consórcio foi abandonada, iniciando a regeneração natural e prevalecendo o fragmento florestal de *Anadenanthera* sp. (NASCIMENTO, 2006).

Atualmente, na área de estudo estão alocadas 105 unidades amostrais com dimensão de 10x10 m, totalizando uma área amostrada de aproximadamente 1,2 ha. O último inventário realizado na área ocorreu em março de 2010, no qual foram medidos o DAP (diâmetro à altura do peito) e altura das árvores.

Por meio dos dados desse inventário foi possível conhecer a distribuição diamétrica desse fragmento florestal e ajustar um modelo hipsométrico para estimar as demais alturas. O modelo linearizado de Curtis (Equação 1) foi escolhido com base no trabalho de Melo et al. (2010), porque este apresentou menor erro padrão da estimativa (Syx).

$$\text{Ln}H_i = 3,39343 - 0,68460 \times \frac{1}{\text{DAP}_i} \quad (1)$$

Em que:

H_i = Altura da árvore (m); DAP_i = Diâmetro à altura do peito, medido a 1,3 m para cada árvore (cm).

O modelo de Stoate (Equação 2) foi adotado para a estimativa do volume de cada árvore, sendo este ajustado por Carvalho et al. (2010) após cubagem rigorosa realizada no mesmo fragmento florestal desse estudo.

$$V_i = 0,01088 + 0,0002197\text{DAP}_i^2 - 0,003567H_{ci} + 0,00004518\text{DAP}_i^2 H_{ci} \quad (2)$$

Em que:

V_i = volume com casca de cada árvore (m^3); DAP = diâmetro à altura do peito, medido a 1,3 m, para cada árvore (cm); H_{ci} = altura comercial de cada árvore (m).

Os valores da biomassa de cada fuste foram obtidos pela relação da densidade básica da madeira (Equação 3). A densidade adotada para essa espécie foi a densidade básica média de $0,600 \text{ g/cm}^3$ obtida por Mori et al. (2003).

$$Db = \frac{m_s}{V_{\text{sat}}} \quad (3)$$

Em que:

Db = Densidade básica da madeira (g cm^{-3}); m_s = massa seca (g); V_{sat} = volume saturado (cm^3).

Considerando-se que a biomassa seca contém aproximadamente 50% de carbono, utilizou-se o fator 0,5 para a obtenção do estoque de carbono no fuste. A estimativa do estoque de carbono total do fuste foi obtida por meio do somatório do estoque de carbono de cada fuste.

Primeiramente, foi obtida a estatística descritiva para os dados de DAP, altura, volume, biomassa e estoque de carbono. Foram analisadas também a distribuição do estoque de carbono por classe diamétrica e unidade amostral.

Os resultados obtidos para o estoque de carbono foram analisados segundo a geoestatística por meio do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011), com o pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLE, 2001).

Para o georreferenciamento da área foi utilizado um plano cartesiano, visto que as unidades amostrais são contíguas e foram alocadas na área de maneira sistemática. O centro de cada unidade amostral foi considerado como ponto amostral e a variável de estudo considerada foi o estoque médio de carbono por unidade amostral. Foram considerados 105 pontos amostrais para esse estudo (Gráfico 1).

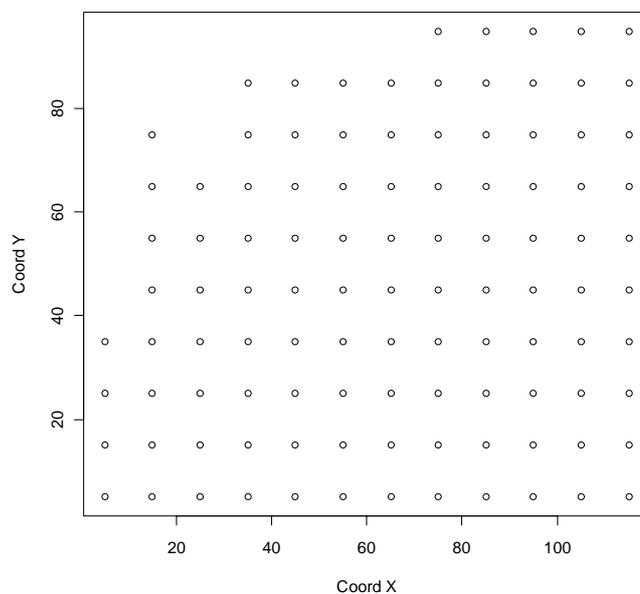


Gráfico 1 Distribuição dos pontos amostrados na área de estudo

Para o estudo da variabilidade espacial dos dados supõe-se que o processo estocástico é intrinsecamente estacionário e isotrópico, ou seja, que ele possui média constante com semivariograma definido e a análise realizada considera apenas uma direção.

Para a estimação do semivariograma utilizou-se o estimador robusto de Cressie e Hawkins (1980 citados por CRESSIE, 1993) (Equação 4). Esse estimador foi escolhido por ser pouco afetado por valores discrepantes. Pelo fato de se calcular primeiramente a média das raízes quadradas da diferença e depois elevar o resultado à quarta potência, o primeiro termo é pouco afetado por valores extremos se comparado com a média das diferenças quadráticas do estimador de Matheron (SCHABENBERGER; GOTWAY, 2005). Mingoti e

Rosa (2008) complementam que este estimador, além de ser eficiente contra *outliers*, é também eficiente à ausência de normalidade dos dados.

$$\tilde{\gamma}(h) = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{1}{|N(h)|} \sum_{N(h)} \left[|Z(x_i) - Z(x_i + h)|^2 \right] \right)^2 \right\} / \left(0.457 + \frac{0.494}{|N(h)|} \right) \quad (4)$$

Em que:

$N(h)$ é o número de pares na distância h ; $\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}$ é o incremento.

Após o cálculo das semivariâncias foi ajustado o modelo gaussiano (Equação 5), com base na visualização do comportamento dos dados pelo método dos mínimos quadrados ordinários.

$$\gamma(h) = C_0 + C[1 - e^{-3|h/a|^2}] \quad (5)$$

Em que:

$\gamma(h)$ = semivariância (Mg ha^{-1})²; h = distância entre pontos (m); C_0 = efeito pepita (Mg ha^{-1})²; $C_0 + C$ = patamar (Mg ha^{-1})²; a = alcance (m).

Após realizar o ajuste teórico no semivariograma, foi feita a krigagem ordinária para construção do mapa de predição do estoque de carbono. O estimador de krigagem na localização x_0 é dado por Wackernagel (2003) e Webster e Oliver (2007) (Equação 6).

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (6)$$

Em que:

λ_i é o peso de krigagem associado com a observação do local x_i e $Z(x_i)$ é o valor do atributo no local x_i .

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões obtidos nesse trabalho, de acordo com a literatura sobre o tema.

3.1 Análise descritiva do estoque de carbono presente no fuste de *Anadenanthera* sp.

A distribuição diamétrica do fragmento florestal está apresentada no Gráfico 2. Observou-se pelo gráfico que a distribuição dessa espécie segue o mesmo padrão J invertido comumente observado em florestas nativas em bom estado de conservação, evidenciando menor número de árvores nas maiores classes de diâmetro e muitas árvores nas menores classes.

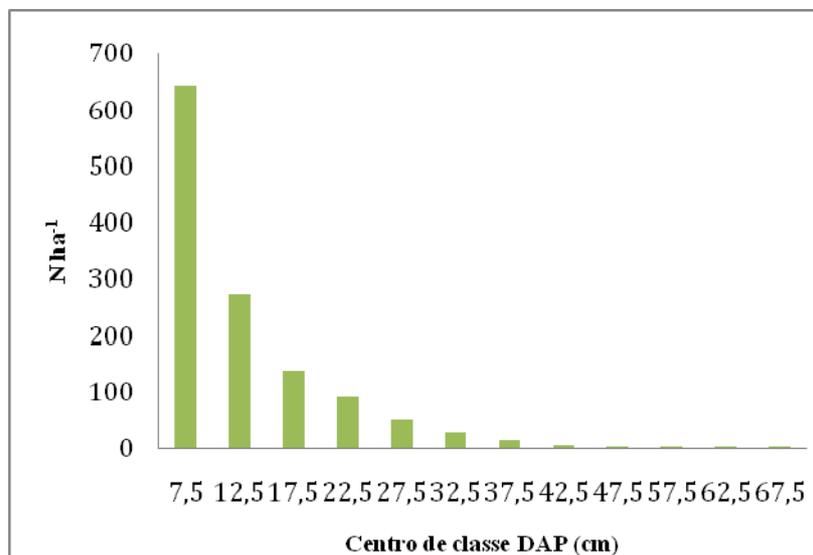


Gráfico 2 Distribuição diamétrica do fragmento florestal de *Anadenanthera* sp.

Na Tabela 1 encontram-se os resultados da análise estatística descritiva dos dados. Verificou-se que todas as variáveis biométricas apresentaram considerável variação, o que pode ser atribuído à presença de *outliers*. Analisando os *outliers* separadamente verificou-se que estes correspondiam à árvores cujos valores biométricos foram superiores à média.

Tabela 1 Análise descritiva das variáveis biométricas DAP, altura, volume, biomassa e estoque de carbono em um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp.

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Variância	Desvio padrão	CV (%)
DAP (cm)	5,0	65,0	12,6	61,1	7,8	62,0
altura (m)	5,2	29,0	13,0	25,8	5,0	38,8
volume (m ³)	0,0036	5,9967	0,2004	0,1863	0,4316	215,3
biomassa (Mg ha ⁻¹)	0,0018	3,0981	0,1035	0,0497	0,2230	215,3
carbono (Mg ha ⁻¹)	0,0009	1,5490	0,0517	0,0124	0,1114	203,0

O estoque de carbono total presente no fuste desse fragmento florestal foi de 77,45 Mg ha⁻¹. Figueiredo (2011), estudando a dinâmica do estoque de carbono do fuste das árvores de uma floresta estacional semidecidual, verificou que a espécie *Anadenanthera peregrina* foi uma das espécies que apresentou maior valor de estoque de carbono no fuste com 12,82 Mg ha⁻¹. A autora também destacou a família *Leguminosae* como representante majoritária do estoque de carbono nessa área, cujo valor foi em média de 31,30 Mg ha⁻¹.

O Gráfico 3 mostra o padrão de dispersão do estoque de carbono por unidade amostral. Observou-se que, na unidade amostral 11, o valor do estoque de carbono foi de 4,56 Mg ha⁻¹, enquanto na unidade amostral 27 esse valor foi de 2,01 Mg ha⁻¹, ou seja, o valor observado na unidade 11 foi 2 vezes maior em relação a unidade amostral 27. Porém, em relação à média (0,05 Mg ha⁻¹), ambos os resultados foram elevados. A superioridade do estoque de carbono em

algumas unidades amostrais está relacionada à presença de árvores com maiores diâmetro e altura, e conseqüentemente com maiores volume, biomassa e estoque de carbono.

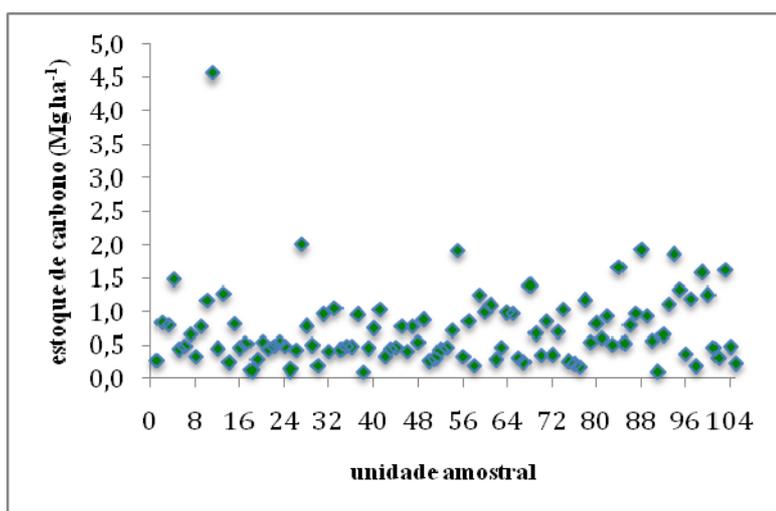


Gráfico 3 Padrão de dispersão do estoque de carbono (Mg ha^{-1}) por unidade amostral no fuste de *Anadenanthera* sp.

Observa-se, pelo Gráfico 4, que a distribuição diamétrica do estoque de carbono segue uma distribuição assimétrica à direita explicada pela baixa representatividade de indivíduos com maior porte. As maiores quantidades de biomassa e estoque de carbono foram observadas nas classes de 22,5 cm e 27,5 cm. Apesar da classe de 7,5 cm apresentar maior representação de indivíduos, estes possuem pequeno porte, apresentando baixo estoque de biomassa e carbono.

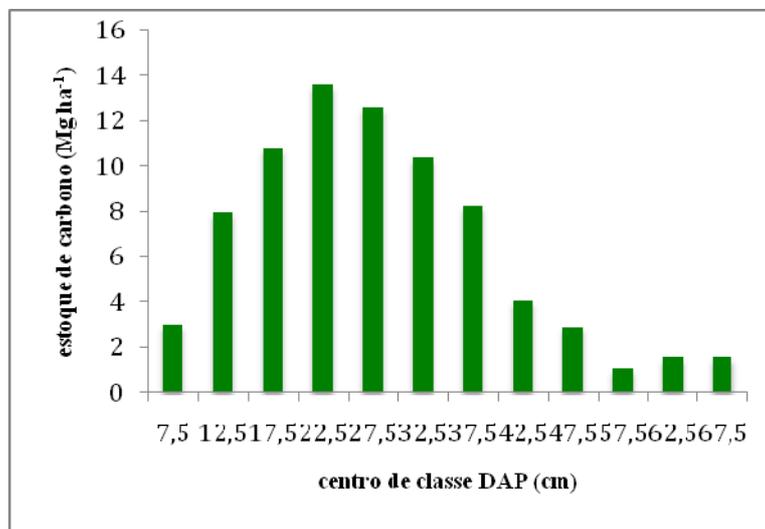


Gráfico 4 Distribuição por classe diamétrica do estoque de carbono no fuste de *Anadenanthera* sp.

3.2 Análise geoestatística do estoque de carbono presente no fuste de *Anadenanthera* sp.

Com base na avaliação dos gráficos e tabelas, observou-se a presença de *outliers*, o que justificou o uso do estimador robusto para a construção do semivariograma.

Considerando o semivariograma apresentado no Gráfico 5, observou-se o ajuste do modelo gaussiano para a variável estoque de carbono. A análise dos parâmetros do modelo apresentado na Tabela 2 mostrou dependência espacial forte para essa variável.

Apesar do ajuste de um modelo com patamar, o valor do alcance foi muito alto devido à tendência crescente da curva, significando que deve ser feita uma amostragem mais detalhada da área. O valor elevado do efeito pepita mostrou que existe dependência espacial a distâncias menores que a distância de 10 m utilizada nesse trabalho.

Tabela 2 Parâmetros do semivariograma do estoque médio de carbono no fuste de *Anadenanthera* sp.

Modelo	Efeito Pepita (C_0)	Patamar ($C+C_0$)	Alcance (m)	Relação (%)	DE
Gaussiano	9,49	20023,67	4170,29	0,047	FO

De acordo com Cambardella et al. (1994), a classificação da dependência espacial (DE) é estimada pela relação $[C_0/(C+C_0)] \times 100 < 25\%$ - forte (FO); entre 25 e 75% moderada (Mo) e $> 75\%$ - fraco (Fr); não ocorreu dependência espacial (N)

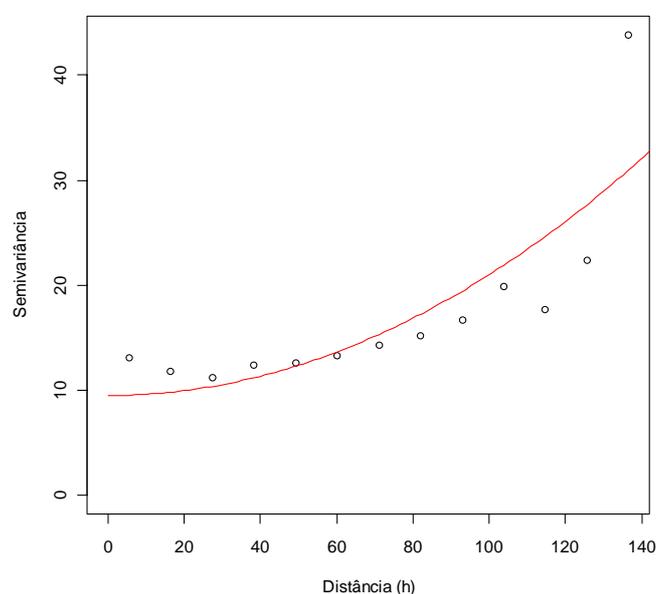


Gráfico 5 Semivariograma do estoque médio de carbono no fuste de *Anadenanthera* sp. (Mg ha^{-1})

O mapa de predição por krigagem apresentado no Gráfico 6 evidenciou que as estimativas de maior valor de estoque médio de carbono se localizaram nas bordas da área indicando que nesses locais há ocorrência de árvores com maiores diâmetros, o que pode ser reflexo da elevada radiação solar incidente nesses locais.

Ficou evidente nesse mapa que a maioria das áreas possui valores de carbono mais baixos, indicando a existência de árvores com menor diâmetro nas unidades amostrais e caracterizando assim a distribuição diamétrica típica de florestas nativas do tipo “J” invertido.

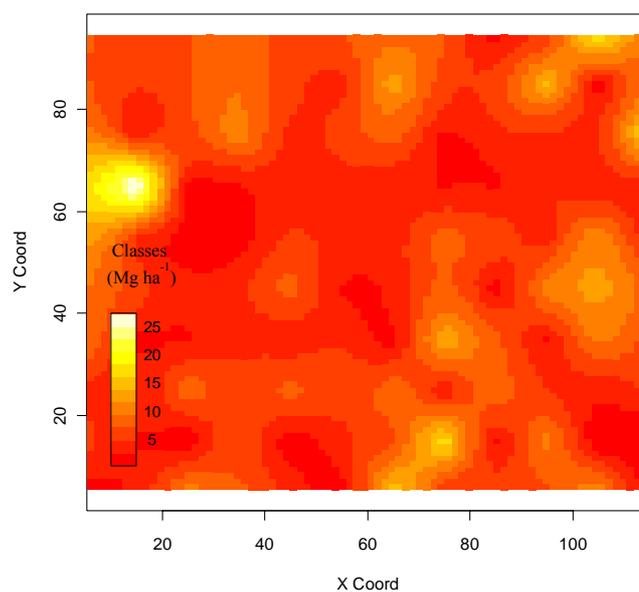


Gráfico 6 Interpolação por krigagem da variável estoque médio de carbono no fuste de *Anadenanthera* sp. (Mg ha^{-1})

Weber, Sanquetta e Fisfeld (2005), estudando o estoque de carbono em Floresta Ombrófila Mista, observaram um comportamento semelhante ao obtido nesse trabalho ao verificarem que a distribuição espacial do estoque de carbono dentro das unidades amostrais foi heterogênea, concentrando altos valores em indivíduos de grande porte ou em agrupamentos de várias árvores.

4 CONCLUSÕES

O fragmento florestal de *Anadenanthera* sp. apresentou estoque de carbono no fuste de $77,45 \text{ Mg ha}^{-1}$, sendo os maiores valores concentrados nas classes de diâmetro de 22,5 cm e 27,5 cm e na unidade amostral 11.

Considerando a espacialização do carbono, verificou-se dependência espacial forte com alta capacidade de dispersão na área. Os mapas de predição por krigagem mostraram uma elevada variabilidade de estoque de carbono nessa área, com maiores valores concentrados na borda, o que pode ser atribuído à presença de árvores de grande porte nesses locais.

O estoque de carbono presente em uma floresta é diretamente dependente da biomassa, que por sua vez depende de fatores que afetam os processos de fotossíntese e respiração, como características edafoclimáticas, espécie, estágio sucessional, competição, espaçamento e desbaste. Logo, estudos espaciais, juntamente com o conhecimento desses fatores, tornam-se indispensáveis para explicar o comportamento da variável carbono, além de contribuir para o maior conhecimento dessa variável considerada relevante no contexto atual de mudanças climáticas globais.

REFERÊNCIAS

BOGNOLA, I. A. et al. Modelagem uni e bivariada da variabilidade espacial de rendimento de *Pinus taeda* L. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, jun. 2007. Disponível em:

<<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/floresta/article/viewArticle/11632>>.

Acesso em: 15 abr. 2012.

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

CARVALHO, S. P. C. et al. Different strategies to estimate the commercial volume of *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 3, p. 399-406, set. 2010.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1993. 900 p.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, nov./dez. 2007.

FERNANDES, T. J. G. et al. Quantificação do carbono estocado na parte aérea e raízes de *Hevea* sp. aos 12 anos de idade, na Zona da Mata Mineira. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 4, p. 657-665, ago. 2007.

FIGUEIREDO, L. T. M. **Dinâmica do estoque de carbono do fuste das árvores de uma floresta estacional semidecidual**. 2011. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. A fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQUESTRO DE CARBONO: UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1., 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD/FBDS, 1994. p. 125-153.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 12 jul. 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: the physical basis**. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 15 out. 2011.

MELO, E. A. et al. Análise de modelos de regressão na relação hipsométrica para *Anadenanthera peregrina* (Benth.) Speg. In: INTERNATIONAL BIOMETRIC CONFERENCE, 1., 2010, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 2010. 1 CD-ROM.

MELLO, J. M. et al. Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, ago. 2006. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/floresta/article/viewArticle/6454>>. Acesso em: 10 abr. 2012.

MINGOTI, S. A.; ROSA, G. A note on robust and non-robust variogram estimators. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 61, n. 1, p. 87-95, mar. 2008.

MORI, C. L. S. O. et al. Caracterização da madeira de angico-vermelho (*Anadenanthera Peregrina* (Benth.) Speng.) para confecção de móveis. **Revista Brasil Florestal**, Brasília, v. 23, n. 77, p. 1-8, ago. 2003.

NASCIMENTO, G. A. **Florística, fitossociologia e heterogeneidade em um povoamento com predominância de *Anadenanthera peregrina* (Benth.) Speg.** 2006. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

NOVAES FILHO, J. P. et al. Distribuição espacial de carbono em solo sob floresta primária na Amazônia Meridional. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 1, p. 83-92, jan./fev. 2007.

PAIVA, A. O.; REZENDE, A. V.; PEREIRA, R. S. Estoque de carbono em Cerrado *Sensu stricto* do Distrito Federal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 3, p. 527-538, abr. 2011.

PAIXÃO, F. A. A. et al. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 3, p. 411-420, abr. 2006.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Version 2.6.1. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 10 mar. 2012.

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

SALOMÃO, R. P.; NEPSTAD, D. C.; VIEIRA, I. C. G. Como a biomassa de florestas tropicais influi no efeito estufa? **Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 123, p. 38-47, 1996.

SCHABENBERGER, O.; GOTWAY, C. A. **Statistical methods for spatial data analysis**. Boca Raton: Chapman & Hall, 2005. 512 p.

USHIZIMA, T. M.; BERNARDI, J. V. E.; LANDIM, P. M. B. Estudo da distribuição espacial do angico (*Anadenanthera peregrina*) na floresta estadual “Edmundo Navarro de Andrade”, Rio Claro, SP, Brasil, empregando metodologia geoestatística. **Holos Environment**, Porto Velho, v. 3, n. 1, p. 59-73, June 2003.

VILELA, E. A.; RAMALHO, M. A. P. Análise das temperaturas e precipitações pluviométricas de Lavras, Minas Gerais. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 3, n. 1, p. 71-79, 1979.

WACKERNAGEL, H. **Multivariate geostatistics**: an introduction with applications. New York: Springer-Verlag, 2003. 387 p.

WEBER, K. S.; SANQUETTA, C. R.; FISFELD, R. L. Variação volumétrica e distribuição espacial do estoque de carbono em Floresta Ombrófila Mista. **Revista Acadêmica**, Curitiba, v. 3, n. 2, p. 77-85, jun. 2005.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. **Geostatistics for environmental scientists**. 2nd ed. Chichester: J. Wiley, 2007. 315 p.

CAPÍTULO 3

**Distribuição espacial da biomassa, teor e quantidade de carbono presente
nas raízes de *Anadenanthera* sp.**

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi estudar a distribuição espacial da biomassa, teor e quantidade de carbono presente nas raízes de *Anadenanthera* sp., localizado no câmpus da Universidade Federal de Lavras. As raízes foram coletadas no centro de 52 unidades amostrais, em quatro profundidades diferentes. Para determinação da biomassa cada amostra foi seca em estufa a $60 \pm 2^\circ\text{C}$ e pesada em balança analítica. O teor de carbono foi determinado pelo analisador elementar CHN, possibilitando o conhecimento da quantidade de carbono em cada ponto e profundidade da área. Para a análise geoestatística foram adotados os pontos georreferenciados no centro da unidade amostral. Considerando as variáveis biomassa e a quantidade de carbono, observou-se que ocorreu dependência espacial somente na profundidade 60-80 cm, com grande dispersão dos dados, sendo possível o ajuste do modelo matern. Nas demais profundidades não foi observada dependência espacial. Por meio do mapa de predição por krigagem dessas variáveis observou-se que os maiores valores de biomassa e quantidade de carbono ocorreram nas bordas da área. Para a variável teor de carbono ocorreu dependência espacial nas profundidades 40-60 cm e 60-80 cm, possibilitando o ajuste dos modelos esférico e exponencial, enquanto nas profundidades 0-20 cm e 20-40 cm esse comportamento não foi observado. O mapa de predição por krigagem da profundidade 40-60 cm apresentou um padrão heterogêneo em que os menores teores de carbono das raízes se concentraram nas bordas, aumentando em direção ao interior da área. Para a profundidade 60-80 cm ocorreu um comportamento mais homogêneo de distribuição dos valores.

Palavras-chave: Biomassa. Quantidade de carbono. Krigagem. Predição.

ABSTRACT

The aim of this work was to study the spatial distribution of biomass, carbon content and amount of carbon present in *Anadenanthera* sp. roots, located on Universidade Federal de Lavras campus. Roots were collected in the center of 52 sampling unit at four different depths. For biomass determination each sample was dried in a stove at 60 ± 2 °C, and then weighed on an analytical balance. The amount of carbon content at each point and depth of the area was determined by using the CHN elemental analyzer. For the geostatistical analysis the georeferenced points in the center of the plot were considered. As to biomass and amount of carbon spatial dependence was noticed only at 60-80 cm deep, with data overdispersion being possible to adjust the matern model. At other depths no spatial dependence was noticed. The kriging prediction map made it possible to infer that the highest values of biomass and amount of carbon occurred on the edges of the area. As to carbon content the spatial dependence occurred at 40-60 and 60-80 cm depths, allowing adjustment of the spherical and exponential models, whereas at the 0-20 and 20-40 cm such behavior wasn't observed. The kriging prediction map of 40-60 cm depth showed an heterogeneous pattern in which the lowest root carbon content was concentrated at the edges, increasing towards the interior of the area. An homogeneous distribution of values occurred at the 60-80cm depth.

Keywords: Biomass. Amount of carbon. Krigin. Prediction.

1 INTRODUÇÃO

O Protocolo de Kyoto trouxe o conceito de sequestro de carbono cujo objetivo é conter e reverter o acúmulo de CO₂ na atmosfera, de modo a reduzir a intensificação do efeito estufa (CHANG, 2004). De acordo com o mesmo autor, a preservação de áreas florestais, recuperação de áreas degradadas, reflorestamento e implantação de sistemas agroflorestais tornam-se medidas eficientes para amenização desse fenômeno.

Para a efetivação do sequestro florestal de carbono e desenvolvimento de estratégias de combate ao aquecimento global é necessário que se conheça o estoque de carbono em todos os compartimentos, inclusive nas raízes que são estruturas importantes na ciclagem de nutrientes e na incorporação do carbono orgânico ao solo.

As florestas tropicais possuem uma alta biomassa de raízes finas, ocorrendo como um emaranhado de raízes sobre a superfície do solo ou concentrada nos 20 cm iniciais dos solos minerais, tanto na região úmida quanto na seca. Essas raízes desempenham importante papel na ciclagem de nutrientes por serem uma porção dinâmica da biomassa subterrânea (KUMMEROW; CASTELLANOS; MAAS, 1990). Sendo assim, a quantificação de carbono deve ser feita de maneira fidedigna também nas raízes.

Paiva e Faria (2007) estimaram o estoque de carbono da parte subterrânea em uma área de Cerrado *sensu strictu* e observaram que somente 7% do carbono estocado concentram-se nas raízes. Paiva, Rezende e Pereira (2011) obtiveram valores de 46,63 Mg ha⁻¹ de biomassa e 22,38 Mg ha⁻¹ de carbono presente nas raízes até uma profundidade de 2 m, em uma área de Cerrado *sensu strictu*. Os autores ressaltam que as raízes finas contribuíram com aproximadamente um terço da biomassa total de raízes.

Navroski et al. (2010) quantificaram a biomassa de raízes finas em um povoamento de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell e verificaram que metade da biomassa de raízes finas concentram-se nos primeiros 5 cm de solo, decrescendo gradativamente ao longo do perfil do solo. De acordo com Witschorek, Schumacher e Caldeira (2003), a maior densidade de raízes finas nas camadas superficiais do solo são atribuídas às taxas de crescimento, idade e sítio. Gonçalves (1994), estudando 17 sítios florestais de *Eucalyptus grandis* com idade média de 5,6 anos, verificou que quanto melhor o sítio e maior as taxas de crescimento das árvores menor era a densidade de raízes finas.

De acordo com Valcarcel et al. (2007), a concentração de raízes na camada superficial ocorre devido à presença da serrapilheira que possibilita um microambiente favorável, com maior retenção de água, arejamento e, conseqüentemente, maior disponibilidade de oxigênio e nutrientes procedentes de sua decomposição.

Sendo assim, a geoestatística insere-se nesse contexto como uma ferramenta de análise, possibilitando o conhecimento da distribuição espacial da biomassa e carbono presente nas raízes, permitindo a tomada de decisões para o seu manejo correto. Com isso, o presente trabalho teve como objetivo estudar a distribuição espacial da biomassa, teor e quantidade de carbono presente nas raízes de *Anadenanthera* sp. em quatro profundidades diferentes do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo compreende um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp., localizado no câmpus da Universidade Federal de Lavras, município de Lavras, Minas Gerais. Na área experimental existem 105 unidades amostrais permanentes com dimensão de 10x10 m, totalizando uma área amostrada de aproximadamente 1,2 ha.

As unidades amostrais para a coleta das raízes foram selecionadas alternadamente mediante croqui da área (Figura 1). Os pontos amostrais selecionados foram marcados no centro de cada unidade amostral, totalizando 52 pontos, sendo um ponto distante do outro em 20 m.

P52		P42		P28						
	P43		P37		P26		P14			
P51		P41		P29		P27				P6
	P44		P36		P25		P15		P7	
P50		P40		P30		P21		P13		P5
	P45		P35		P24		P16		P8	
P49		P39		P31		P20		P12		P4
	P46		P34		P23		P17		P9	P2
P48		P38		P32		P19		P11		P3
	P47		P33		P22		P18		P10	P1

Figura 1 Croqui da área de estudo

Os locais demarcados para a coleta tiveram toda vegetação removida e em seguida foi feito um furo de aproximadamente 20 cm de diâmetro até 80 cm de profundidade por meio de uma hélice acoplada a uma motosserra. Logo após, foi feita a marcação das distâncias na cavadeira para a coleta das raízes (Figura 2).



Figura 2 (A) Local da coleta após a limpeza; (B) Instrumento utilizado para a realização do furo; (C) Furo; (D) Profundidade do furo e marcação na cavadeira

Após a realização do furo, foi escolhida uma área de coleta lateral onde por meio de uma cavadeira coletaram-se as amostras em quatro profundidades diferentes, sendo estas 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm. Em seguida, cada amostra foi armazenada em sacos plásticos devidamente identificados.

A separação das raízes e solo foi feita com auxílio de duas peneiras com malha de 7,95 mm e 2,26 mm, respectivamente. Após a triagem, as amostras foram lavadas em água corrente para a retirada completa de solo. Em seguida, estas foram secas em estufa com circulação de ar à temperatura de $60 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante (Figura 3).



Figura 3 (A) Separação das raízes; (B) Raiz de *Anadenanthera* sp.; (C) Lavagem das raízes; (D) Amostras acondicionadas na estufa

Após a secagem, as amostras foram pesadas para a determinação da massa seca. Em seguida, elas foram trituradas em moinho Willey e classificadas em peneiras com malhas de 200 e 270 mesh, respectivamente, sendo utilizado a alíquota que ficou retida da peneira de 270 mesh (Figura 4). Posteriormente, o material foi seco em estufa convencional à temperatura de 65°C, por 24 horas, para realização da análise elementar no CHN.



Figura 4 (A) Pesagem das amostras em balança; (B) Trituração das amostras em moinho Wiley; (C) Amostra após trituração; (D) Classificação das amostras em peneiras de 200 e 270 mesh

A determinação do teor de carbono em cada amostra foi realizada no Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira da Universidade Federal de Lavras. Foi utilizado um analisador elementar CHN (Vario Micro Cube), cujo princípio básico é a combustão do material para determinação dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e por diferença oxigênio. Para isso, foram pesadas 2 mg de cada amostra em balança analítica, com sensibilidade de 0,01 mg, sendo estas acondicionadas em cápsulas de estanho e levadas em seguida para o analisador elementar (Figura 5). Os valores de carbono foram obtidos em porcentagem.

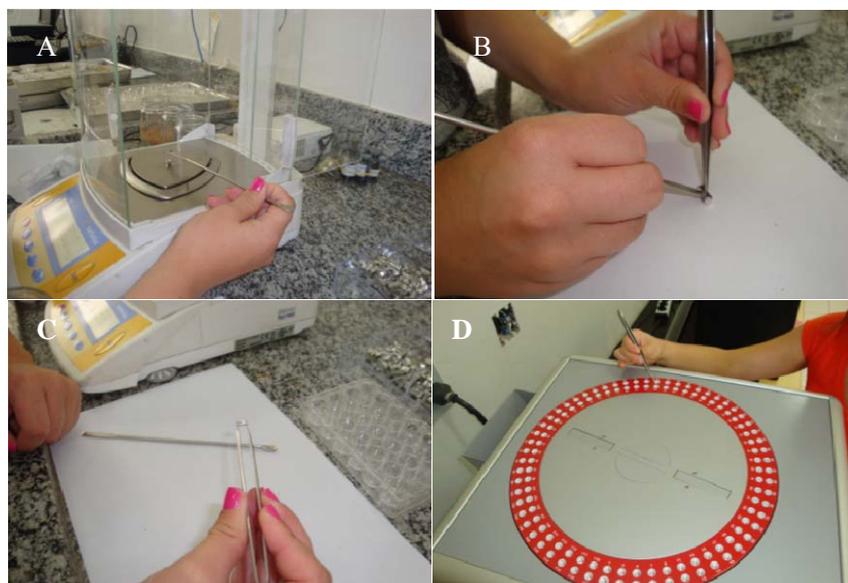


Figura 5 (A) Pesagem de 2 mg de amostra em porta-amostra de estanho; (B) Fechamento do porta-amostra; (C) Amostra pronta para análise; (D) Colocação das amostras no carrossel do CHN para análise elementar

Após essas etapas foi possível obter a quantidade de carbono pela multiplicação do teor de carbono pela biomassa seca das raízes, conforme a Equação 1.

$$CC = BS \times \frac{C}{100} \quad (1)$$

Em que:

CC = quantidade de carbono (g); BS = biomassa seca (g); C = teor de carbono da raiz (%).

Para o georreferenciamento da área foi utilizado um plano cartesiano, onde o centro de cada unidade amostral foi considerado como ponto amostral e as variáveis aleatórias estudadas foram a biomassa, teor e quantidade de carbono observados em cada ponto e profundidade da área de estudo (Gráfico 1).

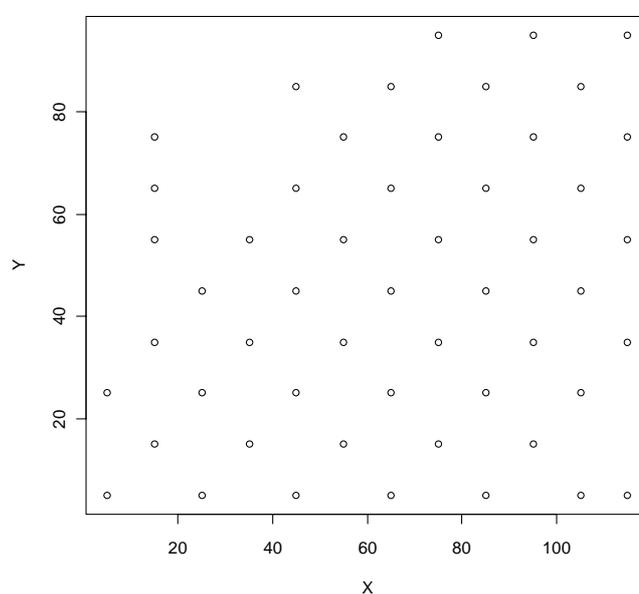


Gráfico 1 Distribuição dos pontos amostrados na área de estudo

Foi realizada a estatística descritiva e geoestatística para análise dos resultados de biomassa, teor e quantidade de carbono. O estudo geoestatístico foi feito por meio do pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLE, 2001) instalado no software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

A primeira etapa do estudo consistiu na construção de um semivariograma para verificação da dependência espacial das variáveis. Para o

estudo da variabilidade espacial dos dados supõe-se que o processo estocástico é intrinsecamente estacionário e isotrópico.

O estimador de Cressie e Hawkins (1980 citados por CRESSIE, 1993) foi utilizado para a estimação do semivariograma (Equação 2):

$$\tilde{\gamma}(h) = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{1}{|N(h)|} \sum_{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \right)^4 / \left(0.457 + \frac{0.494}{|N(h)|} \right) \right\} \quad (2)$$

Em que:

$N(h)$ é o número de pares na distância h ; $\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}$ é o incremento.

Os modelos de semivariogramas ajustados foram os modelos esférico (Equação 3), exponencial (Equação 4) e matern (Equação 5), pelo método dos mínimos quadrados ordinários.

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C [1 - e^{-\alpha(h/a)}] \quad (4)$$

$$\gamma(h) = \left(\frac{1}{(2^{2\nu-1})\Gamma(\nu)} \right) \left(\frac{h}{a} \right)^\nu \left(K_\nu \left(\frac{h}{a} \right) \right) \quad (5)$$

Em que:

$\gamma(h)$ = semivariância (g^2 ou $\%^2$); h = distância entre pontos (m); C_0 = efeito pepita (g^2 ou $\%^2$); $C_0 + C$ = patamar (g^2 ou $\%^2$); a = alcance (m); ν = parâmetro de ordem; $\Gamma(\nu)$ = função gama; k_ν = função Bessel.

Após realizar o ajuste teórico no semivariograma, foi feita a krigagem ordinária para construção do mapa de predição da biomassa, teor de carbono e estoque de carbono. O estimador de krigagem na localização x_0 é dado por Wackernagel (2003) e Webster e Oliver (2007):

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (6)$$

Em que:

λ_i é o peso de krigagem associado com a observação do local x_i e $Z(x_i)$ é o valor do atributo no local x_i .

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados referentes a esse capítulo, assim como as discussões sobre o tema, de acordo com a literatura disponível.

3.1 Distribuição espacial da biomassa das raízes de *Anadenanthera* sp.

A análise descritiva apresentada na Tabela 1 evidenciou um comportamento decrescente para a biomassa das raízes, sendo que os maiores valores de biomassa concentraram-se nas camadas superficiais do solo. Paiva e Faria (2007), estudando a biomassa das raízes em uma área de cerrado *sensu stricto*, observaram que as camadas mais superficiais do solo concentraram a maior parte da biomassa radicular. De acordo com Laclau et al. (2004), a aglomeração das raízes finas no horizonte orgânico representa uma estratégia para adquirir nutrientes em solos inférteis, onde há limitação de nutrientes.

Tabela 1 Análise descritiva da biomassa (g) das raízes de *Anadenanthera* sp. nas diferentes profundidades estudadas

Profundidade (cm)	Mínimo (g)	Máximo (g)	Média (g)	Variância (g ²)	CV (%)
0-20	1,32	97,79	12,14	242,72	128,38
20-40	0,09	65,20	9,54	187,38	143,54
40-60	0,09	41,55	5,62	80,48	159,57
60-80	0,05	31,19	2,53	32,48	225,20

Com base na tabela 1 verificou-se que o valor médio da biomassa foi de 29,83 g. Observou-se também grande amplitude nos dados e alta variabilidade, evidenciado pelo coeficiente de variação alto. A presença de *outliers* evidenciada nos gráficos de dispersão (Gráfico 2) explica a alta variabilidade dos resultados. Os *outliers* compreendem os pontos amostrais em que os valores

de biomassa foram maiores do que a média observada, como por exemplo no ponto 45 localizado na profundidade 0-20 cm, onde foi observado um valor de 97,79 g de biomassa.

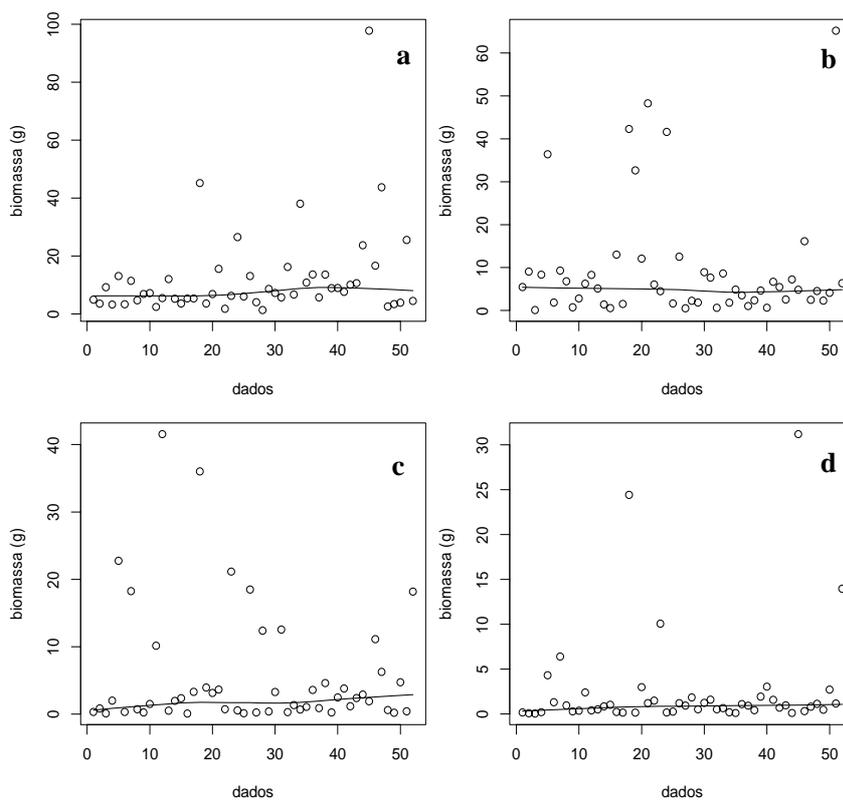


Gráfico 2 Análise de dispersão dos dados de biomassa (g) das raízes de *Anadenanthera* sp. nas profundidades a: 0-20; b: 20-40; c: 40-60; d: 60-80 cm

Os parâmetros dos semivariogramas da biomassa das raízes de *Anadenanthera* sp. estão apresentados na Tabela 2. Observou-se que ocorreu dependência espacial forte somente para a profundidade 60-80 cm, com valor

baixo de efeito pepita e valores elevados de patamar e alcance, caracterizando uma tendência crescente da curva (Gráfico 3 – d)

Tabela 2 Parâmetros dos semivariogramas para a variável biomassa (g) das raízes de *Anadenanthera* sp. nas diferentes profundidades estudadas

Profundidade (cm)	Modelo	Efeito Pepita (C₀)	Patamar (C+C₀)	Alcance (m)	Relação (%)	DE
0-20	pepita puro	77,82	77,82	0	100	N
20-40	pepita puro	65,15	65,15	0	100	N
40-60	pepita puro	30,39	30,39	0	100	N
60-80	matern	2,51	14674,94	335657,92	0,017	FO

De acordo com Cambardella et al. (1994), a classificação da dependência espacial (DE) é estimada pela relação $[C_0/(C+C_0)] \times 100 < 25\%$ - forte (FO); entre 25 e 75% moderada (Mo) e $> 75\%$ - fraco (Fr); não ocorreu dependência espacial (N)

Pelo Gráfico 3 verificou-se que a biomassa apresentou efeito pepita puro nas profundidades 0-20, 20-40 e 40-60 cm, significando que a distância de 20 m considerada nesse estudo não foi suficiente para detectar a variabilidade espacial desse atributo. Sendo assim, o ajuste dos dados experimentais a um modelo teórico fica comprometido devido à ausência de dependência espacial. A aleatoriedade verificada nos semivariogramas pode ser explicada pela descontinuidade da ocorrência de matéria orgânica e das características físicas e de fertilidade do solo.

Na profundidade 60-80 cm ocorreu uma “superdispersão” do semivariograma evidenciando a necessidade do uso de um modelo sem patamar para modelagem da dependência espacial da biomassa. O comportamento da curva mostrou que existe dependência espacial a distâncias menores que 20 m, que foi a distância utilizada nesse trabalho. Assim, ajustou-se o modelo matern.

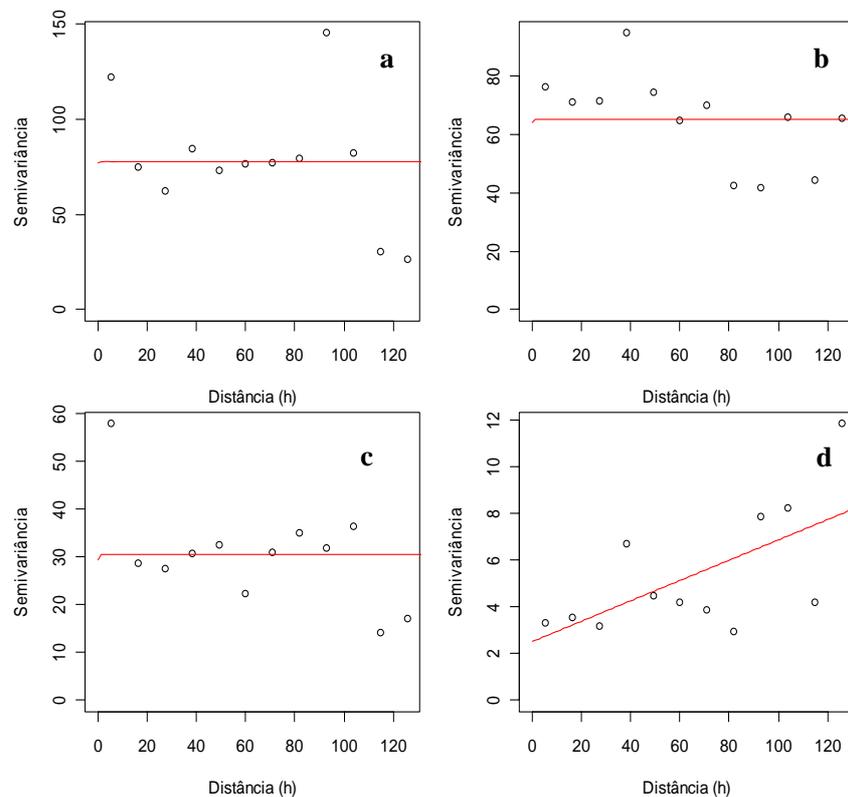


Gráfico 3 Semivariogramas da biomassa (g) das raízes de *Anadenanthera* sp. nas profundidades a: 0-20; b: 20-40; c: 40-60; d: 60-80 cm

Após o ajuste do modelo matern para a profundidade 60-80 cm, foi possível fazer a interpolação por krigagem linear ordinária (Gráfico 4). O mapa de krigagem mostrou uma homogeneidade dos valores de biomassa para a profundidade 60-80 cm, porém há alguns pontos da área em que a biomassa das raízes de *Anadenanthera* sp. está mais concentrada. Por tratar-se de um local onde a concentração de matéria orgânica é menor, a maior concentração da

biomassa de raízes nesses locais e nessa profundidade pode significar presença de solo intemperizado e estratégia para absorção de nutrientes.

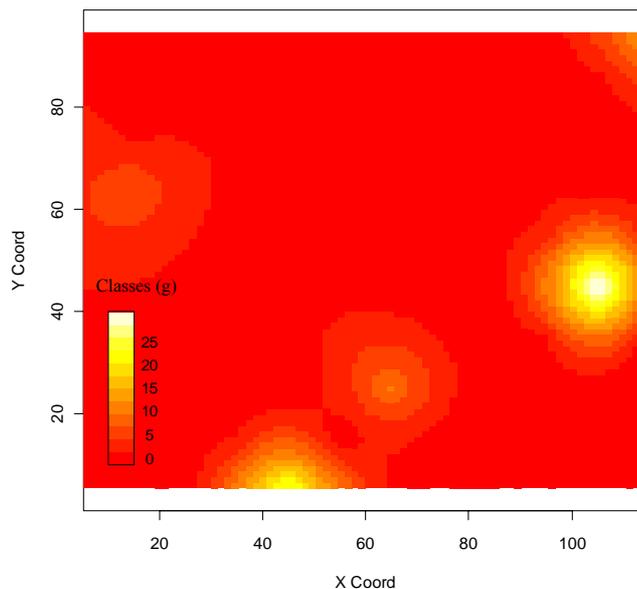


Gráfico 4 Interpolação por krigagem da variável biomassa (g) das raízes de *Anadenanthera* sp. na profundidade 60-80 cm

3.2 Distribuição espacial do teor de carbono presente nas raízes de *Anadenanthera* sp.

De acordo com a Tabela 3, observou-se amplitude e variabilidade baixos para o teor de carbono das raízes de *Anadenanthera* sp., sendo evidenciados por valores baixos de coeficiente de variação.

Tabela 3 Análise descritiva do teor de carbono (%) das raízes de *Anadenanthera* sp. nas diferentes profundidades

Profundidade (cm)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Média (%)	Variância (%²)	CV (%)
0-20	29,32	49,03	43,41	11,33	7,75
20-40	24,24	50,28	42,99	16,73	9,51
40-60	36,69	51,31	44,34	12,28	7,90
60-80	25,05	51,94	43,91	23,93	11,14

O teor médio de carbono presente nas raízes de *Anadenanthera* sp. foi de 43,66%. Dallagnol et al. (2008), estudando o teor de carbono na raiz de *Araucaria angustifolia*, *Eucalyptus grandis*, *Mimosa scabrella*, *Pinus taeda* e *Populus deltoides*, encontraram valores de 43,35%, 42,20%, 43,92%, 43,98% e 43,3% respectivamente. Os resultados obtidos pelos autores foram similares aos observados nesse estudo.

Com base no Gráfico 5 percebeu-se a ocorrência de *outliers* nas profundidades estudadas, contudo estes parecem exercer pouca influência na variabilidade dos dados.

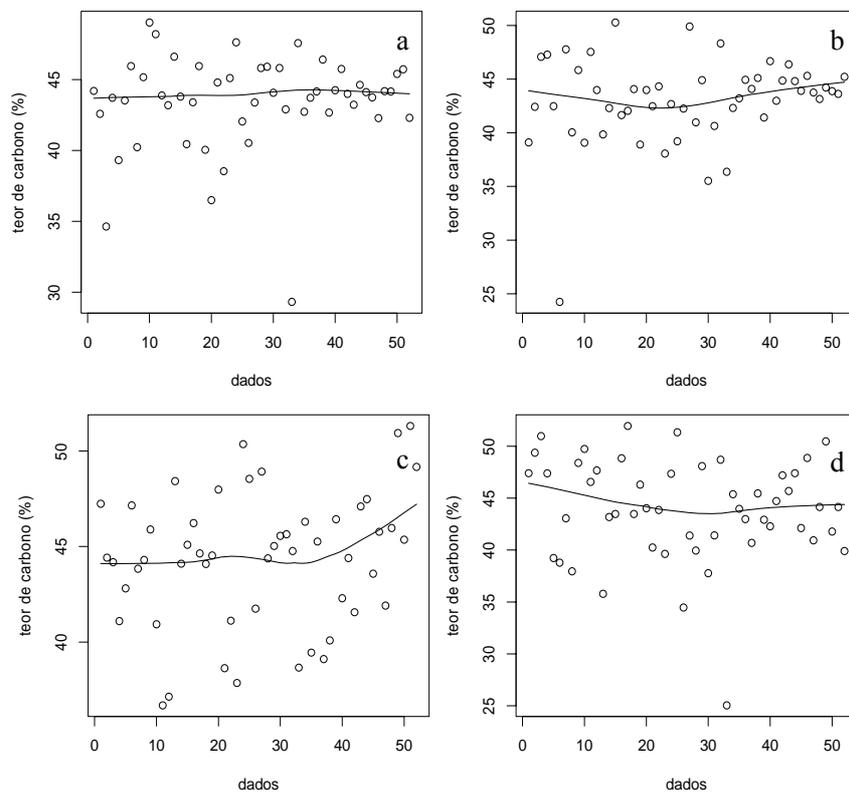


Gráfico 5 Análise de dispersão dos dados de teor de carbono (%) da raízes de *Anadenanthera* sp. nas profundidades a: 0-20; b: 20-40; c: 40-60; d: 60-80 cm

Os parâmetros dos semivariogramas do teor de carbono das raízes de *Anadenanthera* sp. estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 Parâmetros dos semivariogramas para a variável teor de carbono (%) das raízes de *Anadenanthera* sp. nas diferentes profundidades estudadas

Profundidade (cm)	Modelo	Efeito Pepita (C₀)	Patamar (C+C₀)	Alcance (m)	Relação (%)	DE
0-20	pepita puro	7,40	7,40	0	100	N
20-40	pepita puro	15,62	15,62	0	100	N
40-60	esférico	0	12,43	16,84	0	FO
60-80	exponencial	5,76	22,42	12,87	25,69	MO

De acordo com Cambardella et al. (1994), a classificação da dependência espacial (DE) é estimada pela relação $[C_0/(C+C_0)] \times 100 < 25\%$ - forte (FO); entre 25 e 75% moderada (Mo) e $> 75\%$ - fraco (Fr); não ocorreu dependência espacial (N)

O estudo dos parâmetros do modelo esférico ajustados para os valores de semivariância da variável teor de carbono na profundidade 40-60 cm mostrou dependência espacial forte com alcance de 16,84 m, representando que dentro desse limite a maior parte da variabilidade pode ser explicada pelo componente espacial (Gráfico 6 – c). De acordo com Vieira (1995), o alcance de 16,84 m significa que todos os vizinhos situados dentro de um círculo com esse raio podem ser usados para estimar valores para qualquer ponto entre eles.

O efeito pepita nulo evidenciou que a distância de 20 m adotada foi suficiente para o estudo espacial do teor de carbono da raiz na profundidade 40-60 cm. Trangmar, Yost e Uehara (1985) ressaltam que a nulidade do efeito pepita indica que o erro experimental é praticamente nulo e que não existe variação significativa a distâncias menores que a amostrada.

Analisando a relação do efeito pepita com o patamar observou-se que esta foi praticamente nula. Vieira (1997) ressalta que, quanto menor for a relação entre o efeito pepita e o patamar, menores serão as diferenças entre os valores das amostras vizinhas, ocorrendo uma maior continuidade espacial do fenômeno, com baixos valores de variância da estimativa e consequentemente com uma maior confiabilidade no estudo espacial.

Considerando o teor de carbono para a profundidade 60-80 cm, observou-se que ocorreu dependência espacial moderada. O efeito pepita de 5,76% revelou uma descontinuidade do semivariograma para distâncias menores que 20 m. Sendo assim, o modelo que obteve melhor ajuste aos dados de semivariância foi o modelo exponencial (Gráfico 6 – d).

Pelo Gráfico 6 pôde-se observar que nas profundidades 0-20 cm e 20-40 cm ocorreram efeito pepita puro, significando que não ocorreu dependência espacial para a variável de estudo nessas profundidades.

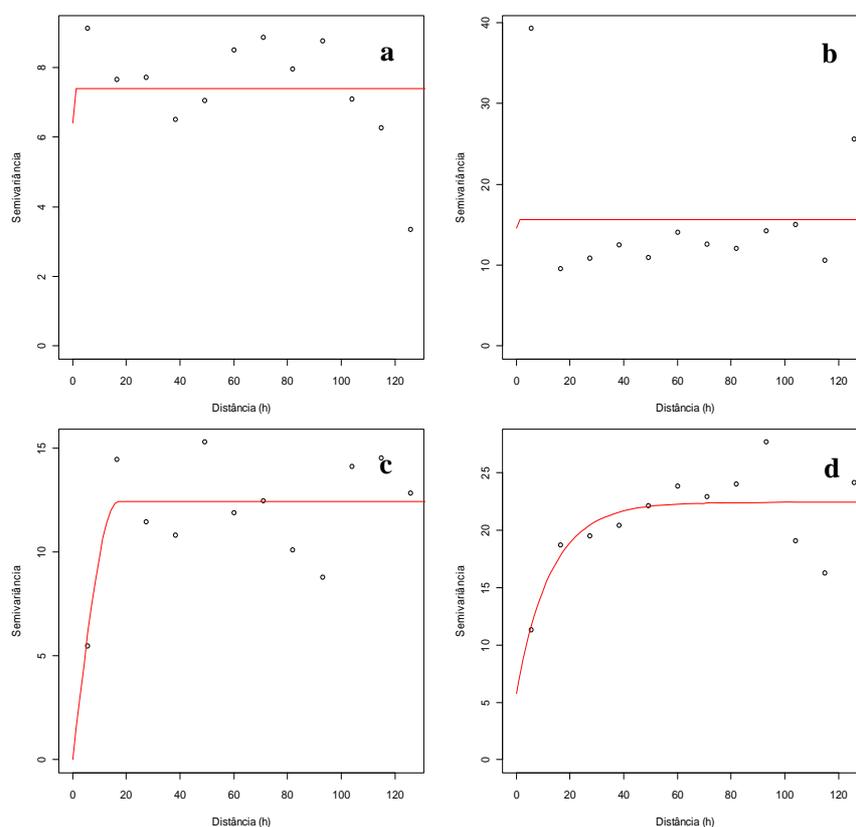


Gráfico 6 Semivariogramas do teor de carbono (%) das raízes de *Anadenanthera* sp. nas profundidades a: 0-20; b: 20-40; c: 40-60; d: 60-80 cm

Após a verificação da dependência espacial para as profundidades 40-60 cm e 60-80 cm foi possível fazer a interpolação por krigagem linear ordinária. Observou-se, pelo Gráfico 7, uma distribuição heterogênea do teor de carbono das raízes de *Anadenanthera* sp. Em alguns pontos da área o teor de carbono apresentou valores abaixo de 40%, porém os valores entre 45% e 50% foram os mais observados na área.

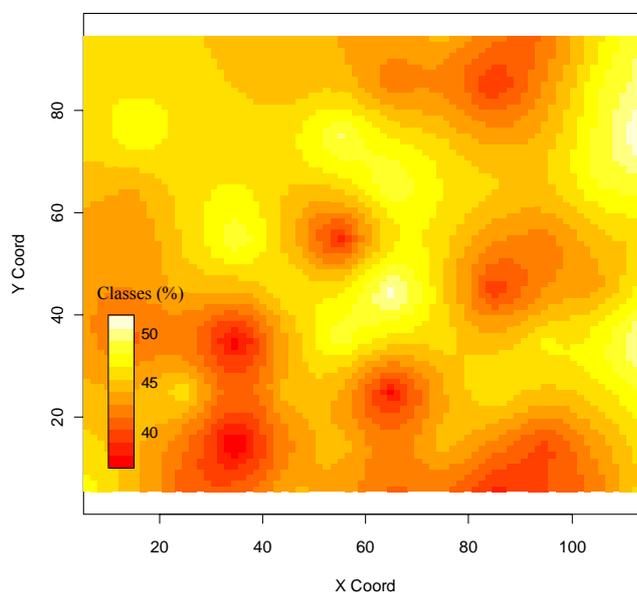


Gráfico 7 Interpolação por krigagem da variável teor de carbono (%) das raízes de *Anadenanthera* sp. na profundidade 40-60 cm

O mapa de krigagem para a profundidade 60-80 cm (Gráfico 8) apresentou maior homogeneidade se comparado com a profundidade 40-60 cm, o qual observou-se uma predominância dos valores de teor de carbono entre 40% e 50% e a ocorrência de valores abaixo de 30% em alguns pontos da área.

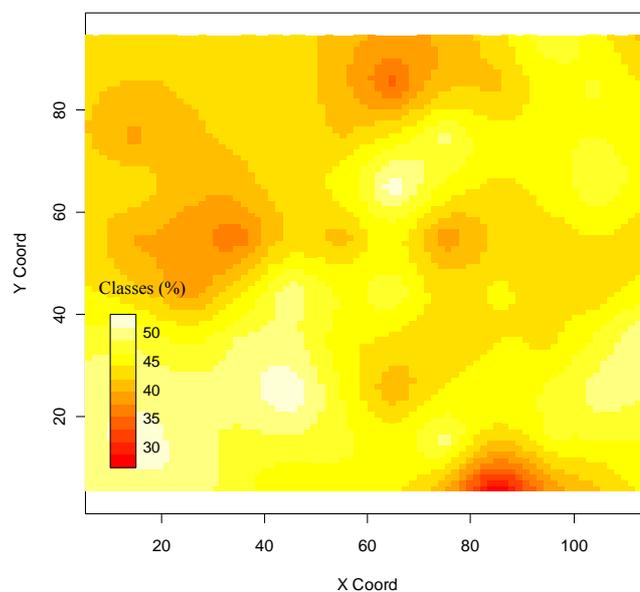


Gráfico 8 Interpolação por krigagem ordinária da variável teor de carbono (%) das raízes de *Anadenanthera* sp. na profundidade 60-80 cm

3.3 Distribuição espacial da quantidade de carbono presente nas raízes de *Anadenanthera* sp.

A análise estatística apresentada na Tabela 5 evidenciou grande amplitude nos dados e alta variabilidade inerente. Observou-se a ocorrência de um gradiente decrescente de estoque de carbono da superfície para as demais profundidades. Esse comportamento está diretamente relacionado com o gradiente decrescente de concentração da biomassa radicular no perfil do solo. A quantidade média de carbono encontrada nas raízes desse fragmento florestal foi de 12,87 g.

Tabela 5 Análise descritiva da quantidade de carbono (g) das raízes de *Anadenanthera* sp. nas diferentes profundidades estudadas

Profundidade (cm)	Mínimo (g)	Máximo (g)	Média (g)	Variância (g²)	CV (%)
0-20	0,60	43,14	5,34	48,55	130,47
20-40	0,04	28,44	4,07	34,59	144,53
40-60	0,04	15,88	2,39	13,72	154,88
60-80	0,03	13,13	1,07	5,79	225,99

A presença de *outliers* também foi observada pelos gráficos de dispersão apresentados no Gráfico 9, o que justificou a alta variabilidade dos dados.

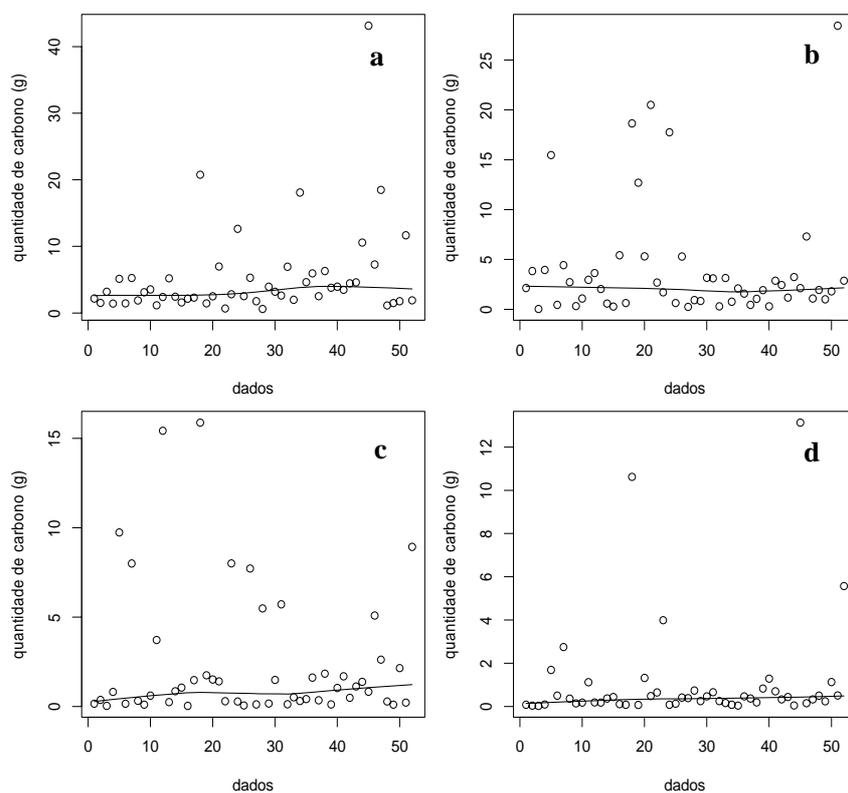


Gráfico 9 Análise de dispersão dos dados da quantidade de carbono (g) das raízes de *Anadenanthera* sp. nas profundidades a: 0-20; b: 20-40; c: 40-60; d: 60-80 cm

De acordo com os parâmetros dos semivariogramas do teor de carbono das raízes de *Anadenanthera* sp., apresentados na Tabela 6, observou-se que ocorreu dependência espacial forte somente na profundidade 60-80 cm, porém o alcance atingiu valor elevado, evidenciando uma superdispersão com tendência crescente dessa curva. Sendo assim, para a modelagem dessa variável foi necessário o uso do modelo matern, que é um modelo robusto e sem patamar (Gráfico 10 – d).

Nas profundidades 0-20, 20-40 e 40-60 cm ocorreu efeito pepita puro com alcance nulo, significando a ausência de dependência espacial (Gráfico 10). O efeito pepita pode ser explicado por erros de medição ou pela ineficiência da distância de amostragem em detectar as variações estudadas.

Tabela 6 Parâmetros dos semivariogramas para a variável quantidade de carbono (g) das raízes de *Anadenanthera* sp. nas diferentes profundidades estudadas

Profundidade (cm)	Modelo	Efeito Pepita (C₀)	Patamar (C+C₀)	Alcance (m)	Relação (%)	DE
0-20	pepita puro	14,78	0	0	N	N
20-40	pepita puro	12,25	0	0	N	N
40-60	pepita puro	5,57	0	0	N	N
60-80	matern	0,51	1029,56	163657,62	0,049	FO

De acordo com Cambardella et al. (1994), a classificação da dependência espacial (DE) é estimada pela relação $[C_0/(C+C_0)] \times 100 < 25\%$ - forte (FO); entre 25 e 75% moderada (Mo) e $> 75\%$ - fraco (Fr); não ocorreu dependência espacial (N)

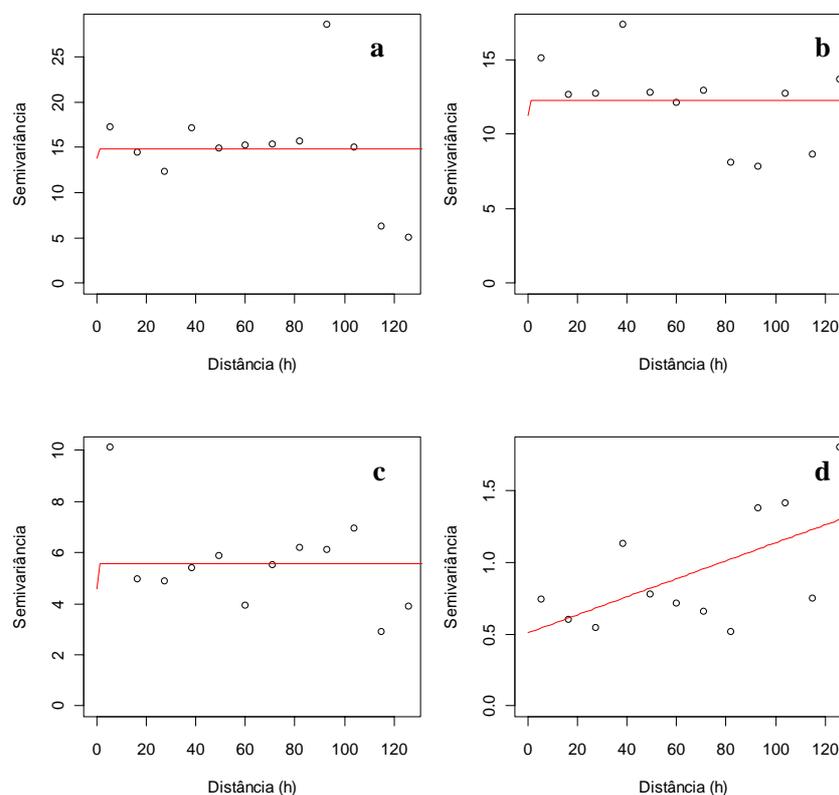


Gráfico 10 Semivariogramas da quantidade de carbono (g) da raiz de *Anadenanthera* sp. nas profundidades a: 0-20; b: 20-40; c: 40-60; d: 60-80 cm

A partir do modelo matern ajustado para o semivariograma na profundidade 60-80 cm (Gráfico 10 – d) fez-se a interpolação por krigagem linear ordinária (Gráfico 11). O mapa evidenciou um padrão homogêneo da quantidade de carbono das raízes de *Anadenanthera* sp., com a presença de alguns pontos nas bordas da área cujos valores foram maiores. Considerando a predição por krigagem feita para a biomassa das raízes observou-se o mesmo comportamento, visto que são variáveis diretamente relacionadas.

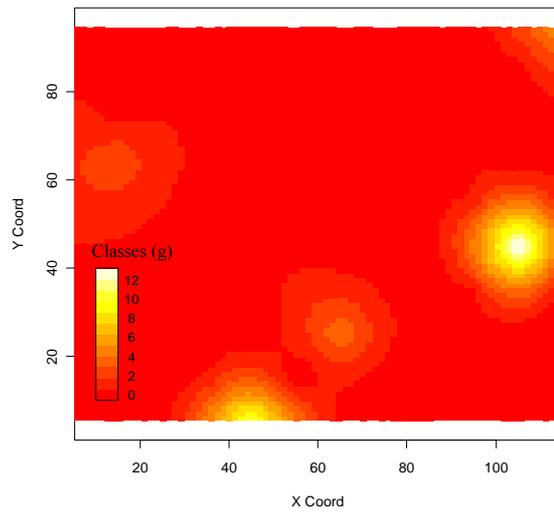


Gráfico 11 Interpolação por krigagem da variável quantidade de carbono (g) das raízes de *Anadenanthera* sp. na profundidade 60-80 cm

4 CONCLUSÕES

De modo geral, ocorreu grande amplitude e alta variabilidade para a biomassa e quantidade de carbono das raízes de *Anadenanthera* sp. Tal fato pode ser explicado pela presença de *outliers*, que compreendem dados discrepantes com alta variabilidade inerente, provindo de erros de amostragem ou características relacionadas ao comportamento típico do atributo.

Ocorreu um gradiente decrescente da distribuição da biomassa e quantidade de carbono nas raízes de *Anadenanthera* sp., da superfície para as camadas mais profundas. Esse fenômeno pode ser justificado pela maior disponibilidade de nutrientes nas camadas superficiais do solo.

Observou-se, por meio dos semivariogramas, a ocorrência de dependência espacial forte e o ajuste de diferentes modelos para algumas profundidades em relação às variáveis estudadas. No entanto, verificou-se a ocorrência de efeito pepita puro, que pode ser explicado por erros de medição ou pela ineficiência da distância de amostragem em representar a variabilidade espacial da biomassa, teor e quantidade de carbono nesse estudo. Os mapas de krigagem apresentaram-se de maneira homogênea para a distribuição espacial da biomassa e quantidade de carbono, enquanto para o teor de carbono este apresentou-se de maneira heterogênea.

Os fatores responsáveis pelo padrão de distribuição da biomassa, teor e quantidade de carbono nas raízes das espécies florestais estão diretamente relacionados com a distribuição do sistema radicular ao longo do perfil do solo e às variações inter e intraespecíficas. Tal distribuição depende também das condições edafoclimáticas e do manejo realizado na área. Logo, há necessidade de estudos mais detalhados correlacionando essas características à distribuição espacial do carbono e biomassa das raízes em povoamentos florestais.

REFERÊNCIAS

- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.
- CHANG, M. Y. **Sequestro florestal do carbono no Brasil: dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas**. 2004. 276 p. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1993. 900 p.
- DALLAGNOL, F. S. et al. Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus compartimentos. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 4, p. 410-416, dez. 2008.
- GONÇALVES, J. L. M. **Características do sistema radicular de absorção do *Eucalyptus grandis* sob diferentes condições edáficas**. 1994. 84 f. Tese (Livre Docência em Solos e Nutrição Florestal) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1994.
- KUMMEROW, J.; CASTELLANOS, J.; MAAS, M. Production of fine roots and the seasonality of their growth in a mexican deciduous dry forest. **Vegetation**, Dordrecht, v. 90, n. 1, p. 73-80, feb. 1990.
- LACLAU, J. P. et al. The function of the superficial root mat in the biogeochemical cycles of nutrients in Congolese *Eucalyptus* plantations. **Annals of Botany**, London, v. 93, p. 249-261, Jan. 2004.
- NAVROSKI, M. C. et al. Quantificação de biomassa e comprimento de raízes finas em povoamento de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 5, n. 4, p. 535-540, dez. 2010.

PAIVA, A. O.; FARIA, G. E. Estoque de carbono do solo sob cerrado *sensu stricto* no Distrito Federal, Brasil. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, Chapadinha, v. 1, n. 1, p. 59-65, abr. 2007.

PAIVA, A. O.; REZENDE, A. V.; PEREIRA, R. S. Estoque de carbono em Cerrado *Sensu stricto* do Distrito Federal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 3, p. 527-538, abr. 2011.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Version 2.6.1. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 2 jun. 2012.

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

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, n. 1, p. 45-93, Jan. 1985.

VALCARCEL, R. et al. Avaliação da biomassa de raízes finas em área de empréstimo submetida a diferentes composições de espécies florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 923-930, set./out. 2007.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. Campinas: IAC, 1995. 61 p.

_____. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo roxo de Campinas. **Bragantia**, Campinas, v. 56, n. 1, p. 181-190, 1997.

WACKERNAGEL, H. **Multivariate geostatistics: an introduction with applications**. New York: Springer-Verlag, 2003. 387 p.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. **Geostatistics for environmental scientists**. 2nd ed. Chichester: J. Wiley, 2007. 315 p.

WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do comprimento de raízes finas em *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake no município de Santa Maria, RS. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 177-183, Jan. 2003.

CAPÍTULO 4

**Continuidade espacial do teor e estoque de carbono presente no solo em
uma fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp.**

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi estudar a continuidade espacial do teor e estoque de carbono presente no solo em um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp., localizado no câmpus da Universidade Federal de Lavras, bem como estimar o estoque de carbono presente no solo desse fragmento florestal. As amostras de solo foram coletadas no centro de 52 unidades amostrais permanentes até 80 cm de profundidade, divididos em 4 camadas. Foi realizada a análise elementar das amostras para a obtenção do teor de carbono e as estimativas do estoque de carbono foram obtidas por meio de uma equação com as variáveis densidade do solo, teor de carbono e espessura da camada considerada. A análise dos resultados foi realizada segundo a estatística descritiva e geoestatística, sendo considerados como pontos amostrais os pontos georreferenciados no centro de cada unidade amostral. A estimativa do estoque de carbono no solo para esse fragmento florestal foi de 169,11 Mg ha⁻¹. Considerando a análise espacial das variáveis teor e estoque de carbono, observou-se, pelos semivariogramas, que nas profundidades 0-20 cm e 60-80 cm não houve dependência espacial, enquanto para as profundidades 20-40 cm e 40-60 cm ocorreram dependência espacial sendo ajustados os modelos matern e esférico. O mapa de predição por krigagem para as profundidades 20-40 cm e 40-60 cm mostrou que o teor e estoque de carbono variaram de maneira heterogênea na área, sendo que os maiores valores ocorreram nas bordas da área e os menores valores no interior.

Palavras-chaves: Mudanças climáticas. Estoque de carbono. Geoestatística.

ABSTRACT

The objective of this work was to study contents spatial continuity and carbon stock in the soil in an *Anadenanthera* sp. predominating stand, located on the Federal University of Lavras campus, as well as to estimate the carbon stock in that stand. Soil samples were collected in the center of 52 permanent sampling units up to 80 cm depth, and then divided into four layers. The elemental analysis of the samples was performed for carbon content and the estimates of carbon stocks were obtained by means of an equation with density, carbon content and thickness of the layer considered. The analysis of results was performed according to descriptive statistics and geostatistics. The sampling points were considered as georeferenced points in the center of each sample unit. The estimate of carbon stock in soil for this stand was 169,11 Mg ha⁻¹. As to the spatial analysis for both carbon content and carbon stock the semivariogram showed that at 0-20 cm and 60-80 cm depths there was no spatial dependence. However, spatial dependence occurred at 20-40 cm and 40-60 cm depths and both matern and spherical models were fitted. The kriging prediction map for 20-40 and 40-60 cm depth showed that both carbon content and carbon stocks varied heterogeneously in the area, with the highest values occurring at the edges of the area and the lowest ones inside it.

Keywords: Climate change. Carbon stock. Geoestistics.

1 INTRODUÇÃO

O estoque de carbono nos solos constitui-se como uma opção para mitigar as crescentes concentrações atmosféricas de CO₂ e as mudanças climáticas globais, devido à capacidade do solo em armazenar cerca de duas vezes a quantidade de carbono da biomassa vegetal (LAL, 2004; PRENTICE, 2001; STEINBEISS; TEMPERTON; GLEIXNER, 2008; STEVENSON, 1994).

De acordo com Steinbeiss, Temperton e Gleixner (2008), vários estudos mostram que o estoque de carbono orgânico nos solos é determinado pelo uso da terra. Mafra et al. (2008) ressaltam que a dinâmica do solo é influenciada por fatores como clima, tipo de solo, cobertura vegetal e práticas de manejo. Resck et al. (2008) acrescentam a influência das propriedades intrínsecas do solo como textura, mineralogia e estrutura.

As espécies florestais possuem maior capacidade de ciclagem de nutrientes em relação às plantas de ciclo anual, em virtude do sistema radicular permanente e profundo que absorve elementos de camadas subsuperficiais, retornando-os à superfície pela deposição de serapilheira (HAAG, 1985). Segundo Baddeley et al. (2004), os ecossistemas naturais dos trópicos úmidos, como a Floresta Amazônica e a Mata Atlântica, têm altas produtividades devido ao calor e a umidade que favorecem a decomposição da matéria orgânica do solo, além da ausência de perturbação física que permite que se formem grandes estoques de carbono.

Segundo Costa et al. (2008), o balanço de carbono no solo é dependente da relação entre as adições de carbono fotossintetizado pelas plantas e as perdas de carbono para a atmosfera resultantes da oxidação microbiana do carbono orgânico a CO₂.

Um estudo realizado por Cunha et al. (2009) em dois fragmentos florestais de Mata Atlântica, com objetivo de quantificar o estoque de carbono

no solo, na profundidade 0-80 cm, mostrou que não houve diferença significativa entre os dois fragmentos, sendo encontrados os valores de 134 Mg ha⁻¹ e 130 Mg ha⁻¹. Gatto et al. (2010) avaliaram o estoque de carbono no solo sob povoamentos de eucalipto em diferentes classes de solo, até 100 cm de profundidade e encontraram o valor máximo de 251,61 Mg ha⁻¹ para a região de Sabinópolis e valor mínimo de 186,84 Mg ha⁻¹ na região de Rio Doce. Por meio desse estudo, os autores observaram que as condições edafoclimáticas, altitude, déficit hídrico e teores de argila e alumínio influenciaram diretamente no estoque de carbono em cada região e tipo de solo estudado.

Considerando o estudo de uso do solo e comparações de paisagens de ecossistemas, Stein e Ettema (2003) evidenciaram a importância da aplicação de estatísticas não clássicas, principalmente no caso de interpolação de variáveis espacialmente dependentes. Trangmar, Yost e Uehara (1985) afirmam que no modelo estatístico clássico, as variações são aleatórias, além de não ser levada em consideração a correlação espacial relativa aos locais das amostras.

Diante do exposto, fica clara a necessidade da determinação do estoque de carbono existente nos diferentes tipos de solo e nos diferentes ecossistemas, bem como estudos relacionados à dinâmica desse elemento. Sendo assim, os objetivos desse estudo foram estimar o estoque de carbono presente no solo sob um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp., assim como analisar a continuidade espacial do teor e estoque de carbono no solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Essa pesquisa foi conduzida em um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp., localizada no câmpus da Universidade Federal de Lavras, município de Lavras, Minas Gerais. O clima do município de Lavras é do tipo Cwb de Köppen (mesotérmico com verões brandos e estiagem de inverno). As médias anuais de precipitação e temperatura são de 1.493 mm e 19,3 °C, com 66% de precipitação ocorrendo no período de Novembro a Fevereiro (VILELA; RAMALHO, 1979).

A área total do experimento corresponde a aproximadamente 1,2 ha onde estão alocadas 105 unidades amostrais permanentes com dimensão de 10x10 m. De acordo com Carvalho et al. (2010), tal área é bastante heterogênea, com árvores de diferentes idades e predominância do gênero *Anadenanthera* sp.

A coleta das amostras de solo foi realizada em 52 unidades amostrais de maneira alternada mediante croqui da área. Os pontos foram marcados no centro das unidades amostrais, distando um do outro em 20 m (Figura 1).

P52		P42		P28					
	P43		P37		P26		P14		
P51		P41		P29		P27			P6
	P44		P36		P25		P15		P7
P50		P40		P30		P21		P13	P5
	P45		P35		P24		P16		P8
P49		P39		P31		P20		P12	P4
	P46		P34		P23		P17		P9
P48		P38		P32		P19		P11	P3
	P47		P33		P22		P18		P10
									P1

Figura 1 Croqui da área de estudo

Os locais demarcados para a coleta tiveram sua vegetação removida, em seguida foi feito um furo de 80 cm de profundidade e 20 cm de diâmetro, por meio de uma hélice acoplada a uma motosserra. As amostras de solo foram coletadas nas profundidades 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 cm, por meio de uma cavadeira. Cada amostra foi armazenada em sacos plásticos devidamente identificados sendo realizada em seguida a separação das raízes e solo por meio de peneiras com malha de 7,95 mm e 2,26 mm.

As amostras de solo foram secas ao ar livre e, em seguida, foram classificadas em peneiras com malha de 200 e 270 Mesh respectivamente. O material foi seco em estufa à temperatura de $60 \pm 2^\circ\text{C}$ para realização da análise elementar.

A análise elementar de carbono foi realizada no Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira da Universidade Federal de Lavras, por meio do analisador elementar CHN. Foram pesadas 2 mg de cada amostra, sendo estas acondicionadas em cápsulas de estanho e levadas em seguida para o aparelho.

A determinação da densidade do solo foi feita mediante coleta de amostras em cinco pontos representativos da área e nas quatro profundidades estudadas, sendo utilizado para isso um anel volumétrico com volume de 98,174 cm³. As amostras foram levadas à estufa a temperatura de $105 \pm 2^\circ\text{C}$ para determinação da massa seca. Com os dados de volume e massa seca foi possível conhecer a densidade média do solo para cada profundidade.

Para a determinação do estoque de carbono total do solo em cada ponto amostral e profundidade foi utilizada a expressão de Veldkamp (1994) (Equação 1).

$$\text{Est C} = (\text{CO} * \text{Ds} * e) \quad (1)$$

Em que:

Est C = estoque de carbono orgânico em cada ponto e profundidade (Mg ha^{-1});
CO = teor de carbono orgânico total nos pontos e profundidades amostradas
(%); Ds = Densidade do solo em cada profundidade (g cm^{-3}); e = espessura da
camada considerada (cm).

Para a análise dos resultados realizou-se primeiramente a estatística descritiva e, em seguida, a análise geoestatística por meio do pacote geo R (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLE, 2001) do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011). Para o estudo da variabilidade espacial dos dados supõe-se que o processo estocástico é intrinsecamente estacionário e isotrópico.

Os semivariogramas foram construídos para verificação da dependência espacial com base no estimador de Cressie e Hawkins (1980 citados por CRESSIE, 1993) (Equação 2):

$$\tilde{\gamma}(h) = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{1}{|N(h)|} \sum_{N(h)} \left[|Z(x_i) - Z(x_i + h)|^2 \right] \right)^2 \right\} / \left(0.457 + \frac{0.494}{|N(h)|} \right) \quad (2)$$

Em que:

$N(h)$ é o número de pares na distância h ; $\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}$ é o incremento.

Os modelos esférico (Equação 3) e matern (Equação 4) foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados ordinários.

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad (3)$$

$$\gamma(h) = \left(\frac{z}{(2^{2\nu-1})\Gamma(\nu)^2} \right) \left(\frac{h}{a} \right)^\nu \left(K_\nu \left(\frac{h}{a} \right) \right) \quad (4)$$

Em que:

$\gamma(h)$ = semivariância ((Mg ha⁻¹)² ou %²); h = distância entre pontos (m); C_0 = efeito pepita ((Mg ha⁻¹)² ou %²); $C_0 + C$ = patamar ((Mg ha⁻¹)² ou %²); a = alcance (m); ν = parâmetro de ordem; $\Gamma(\nu)$ = função gama; k_ν = função Bessel.

Em seguida, com base nos modelos de semivariogramas ajustados foi feito o mapa de predição do teor e estoque de carbono por krigagem ordinária. O estimador de krigagem na localização x_0 é dado por Wackernagel (2003) e Webster e Oliver (2007) (Equação 5):

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (5)$$

Em que:

λ_i é o peso de krigagem associado com a observação do local x_i e $Z(x_i)$ é o valor do atributo no local x_i .

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguem abaixo os resultados obtidos nesse capítulo, juntamente com as discussões baseadas na literatura disponível.

3.1 Teor e Estoque de carbono no solo sob fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp.

Na Tabela 1 encontram-se os valores médios da densidade do solo, teor e estoque de carbono em cada profundidade estudada, sob fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp.

Tabela 1 Valores médios da densidade, teor e estoque de carbono do solo sob fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp.

Profundidade (cm)	Densidade do solo (g cm ⁻³)	Teor de carbono (%)	Estoque de carbono (Mg ha ⁻¹)
0-20	0,888	3,09	54,97
20-40	1,106	2,01	44,56
40-60	1,094	1,69	36,93
60-80	1,070	1,53	32,65
TOTAL			169,11

Observou-se pela Tabela 1 um aumento da densidade do solo em relação à camada 0-20 cm e pequena variabilidade para as demais profundidades. O menor valor de densidade observado na profundidade 0-20 cm pode ser explicado pela presença de matéria orgânica nesse local.

Com relação ao teor de carbono verificou-se uma diminuição desses valores à medida que houve um aumento da profundidade. De acordo com Gatto et al. (2010), os elevados teores de carbono orgânico na camada superficial do solo ocorrem devido à presença da manta orgânica formada pela queda das folhas, galhos e casca das árvores e devido a maior densidade de raízes finas.

Mafra et al. (2008) ressaltam que a adição de material orgânico proveniente da serrapilheira é responsável pelo acúmulo de carbono na camada superficial do solo, à medida que vai sendo humificada.

Paiva e Faria (2007), estudando o teor de carbono do solo sob cerrado *sensu stricto*, observaram que os teores de carbono na camada de 20-40 cm foram maiores em relação às camadas de 0-10 cm e 10-20 cm de profundidade. Os autores, porém, verificaram a tendência de maior teor de carbono na camada de 0-10 cm de profundidade e ressaltam que os maiores teores de carbono na camada de 20-40 cm de profundidade pode ser atribuído em parte à ciclagem e rizodeposição das raízes de espécies vegetais presentes nesse bioma. Em contrapartida, Lima (2004) verificou que o teor de carbono sob mata nativa foi maior nas camadas mais superficiais do solo, sendo esse resultado similar ao observado nesse estudo.

O estoque de carbono evidenciou um padrão decrescente ao longo do perfil do solo. Um comportamento semelhante foi observado por Balbinot et al. (2003) ao estimarem o estoque de carbono no solo sob um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos no RS. Os autores encontraram valores de 83,9; 63,9; 47,6 e 19,6 Mg ha⁻¹ de estoque de carbono para as profundidades 0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm respectivamente.

Vital et al. (2004) ressaltam que a ciclagem de nutrientes é predominante nas partes superiores do perfil, pois nesses locais os principais processos de troca são mais intensos, sendo alimentados pela deposição da serrapilheira na superfície do solo.

Novaes Filho et al. (2007) afirmam que o maior estoque de carbono nas primeiras camadas do solo é um comportamento esperado, devido aos horizontes superiores sofrerem maior influência da matéria orgânica depositada pela floresta. Os autores, porém, observaram, em um estudo realizado no solo sob floresta primária na Amazônia Meridional que, apesar do teor de carbono

decrecer com a profundidade, o estoque de carbono não seguiu essa tendência com a mesma intensidade, o que foi explicado pelo aumento da densidade aparente do solo com a profundidade que compensou a diminuição do teor.

O estoque de carbono total no solo sob esse fragmento florestal foi de 169,11 Mg ha⁻¹. Caldeira et al. (2003) estimaram um estoque de carbono no solo de 101,5 Mg ha⁻¹ sob um povoamento de *Acacia mearnsii* com 6 anos de idade. Balbinot et al. (2003), estudando o carbono orgânico no solo até 100 cm de profundidade sob um povoamento de *Pinus taeda* com 5 anos de idade, estimaram um estoque de carbono de 227,8 Mg ha⁻¹. Logo, conclui-se que as diferenças de estoque de carbono no solo observadas nesses trabalhos estão relacionadas ao tipo de bioma, assim como às condições edafoclimáticas de cada área.

3.2 Continuidade espacial do teor de carbono presente no solo sob um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp.

Pela Tabela 2 verificou-se variabilidade moderada para o teor de carbono nas profundidades estudadas. Ocorreu um padrão decrescente do teor de carbono com relação às camadas do solo, sendo a camada 0-20 cm a que apresentou maior teor de carbono. A maior concentração de carbono na superfície está relacionada à presença de matéria orgânica, influência da serrapilheira e distribuição do sistema radicular no perfil do solo.

Tabela 2 Análise descritiva do teor de carbono (%) do solo sob fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. nas diferentes profundidades estudadas

Profundidade (cm)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Média (%)	Variância (%²)	CV (%)
0-20	1,41	5,58	3,09	0,84	29,56
20-40	1,30	3,43	2,01	0,21	22,79
40-60	0,93	3,08	1,69	0,18	25,36
60-80	0,84	2,63	1,53	0,15	25,21

Com base no Gráfico 1 observou-se a presença de *outliers* nas profundidades estudadas. Os *outliers* correspondem aos pontos onde os valores de teor de carbono foram maiores, como por exemplo na profundidade 0-20 cm, no ponto 36 onde o valor do teor de carbono foi de 5,58%, enquanto no ponto 8 esse valor foi de 1,41%, ocorrendo o mesmo comportamento para as demais profundidades estudadas.

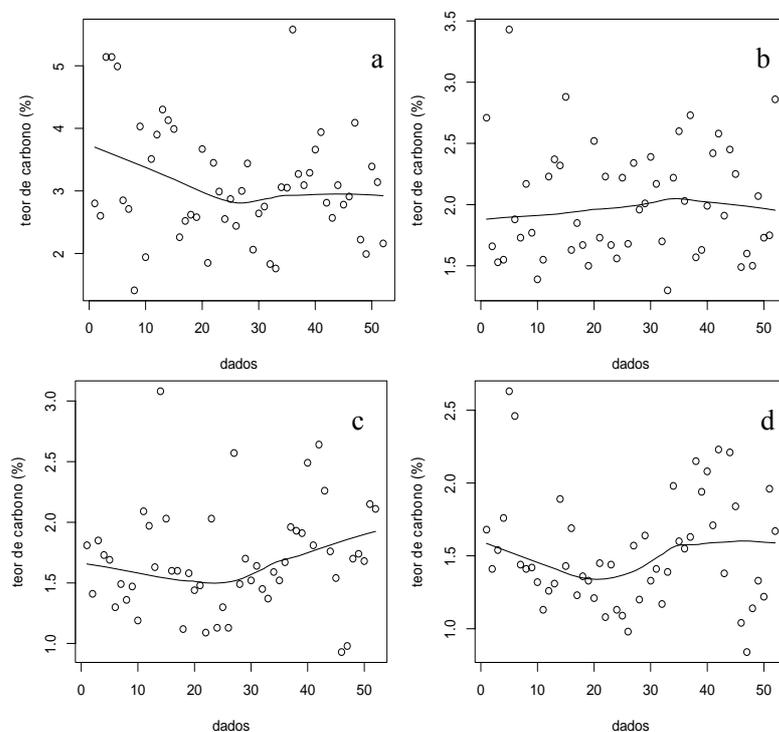


Gráfico 1 Análise de dispersão dos dados de teor de carbono do solo (%) sob fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. nas profundidades a: 0-20; b: 20-40; c: 40-60; d: 60-80 cm

Os parâmetros dos semivariogramas da variável teor de carbono do solo estão apresentados na Tabela 3. Por meio da classificação de Cambardella et al. (1994) observou-se uma dependência espacial forte para a profundidade 20-40 cm. O Gráfico 2 (b) evidenciou a ocorrência de uma superdispersão dos dados, caracterizada por um valor de alcance elevado. Com isso, fez-se o ajuste do modelo matern.

A análise espacial da profundidade 40-60 cm mostrou dependência espacial moderada e ajuste do modelo esférico. Observou-se pelo Gráfico 2 (c)

que o efeito pepita foi baixo, indicando que o erro experimental foi praticamente nulo e que não existe variação significativa a distâncias menores que a amostrada. O alcance de 95,35 m foi superior à distância de amostragem desse trabalho, corroborando a hipótese de aleatoriedade dos dados. Novaes Filho et al. (2007) obtiveram resultados semelhantes a esse trabalho ao estudar a distribuição espacial do carbono em solo sob floresta primária na Amazônia Meridional. Os autores ajustaram o modelo exponencial para a profundidade 0-60 cm e obtiveram um alcance de 185,4 m, evidenciando a dependência espacial a uma distância maior que 20 m.

Com relação às profundidades 0-20 cm e 60-80 cm, observou-se a ocorrência de efeito pepita puro, com alcance nulo, significando a possibilidade de ocorrência de erros de amostragem ou ineficiência da distância de 20 m adotada nesse estudo.

Tabela 3 Parâmetros dos semivariogramas para a variável teor de carbono (%) encontrado no solo sob fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. nas diferentes profundidades estudadas

Profundidade (cm)	Modelo	Efeito Pepita (C_0)	Patamar ($C+C_0$)	Alcance (m)	Relação (%)	DE
0-20	pepita puro	0,81	0,81	0	100	N
20-40	matern	0,10	157,04	68936,28	0,063	FO
40-60	esférico	0,08	0,20	95,35	40	MO
60-80	pepita puro	0,51	0,51	0	100	N

De acordo com Cambardella et al. (1994), a classificação da dependência espacial (DE) é estimada pela relação $[C_0/(C+C_0)] \times 100 < 25\%$ - forte (FO); entre 25 e 75% moderada (Mo) e $> 75\%$ - fraco (Fr); não ocorreu dependência espacial (N)

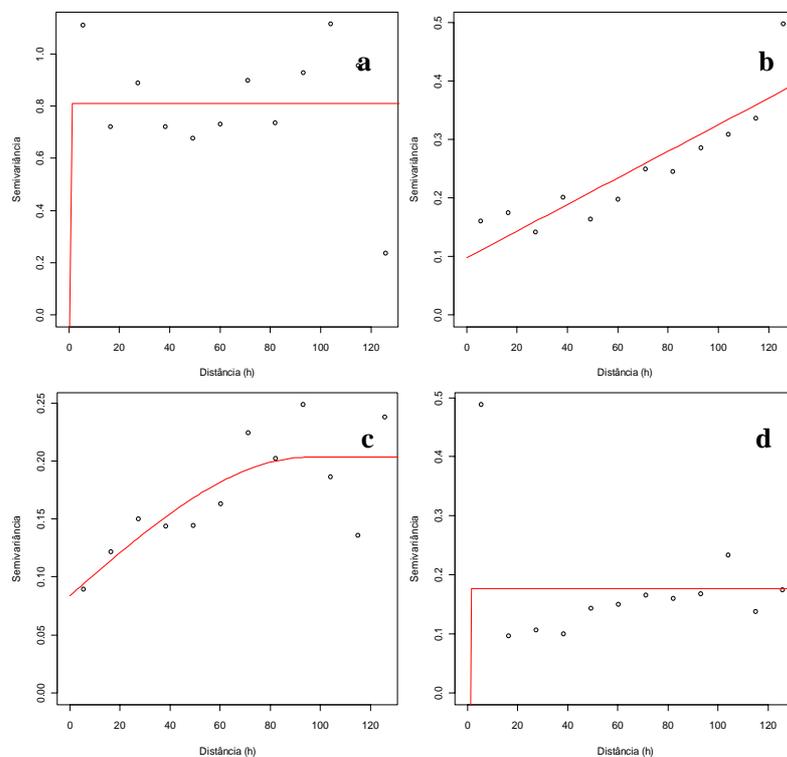


Gráfico 2 Semivariogramas do teor de carbono no solo (%) em um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. nas profundidades a: 0-20; b: 20-40; c: 40-60; d: 60-80 cm

Considerando os ajustes dos modelos dos semivariogramas para as profundidades 20-40 cm e 40-60 cm, foi possível fazer a interpolação por krigagem linear ordinária.

O mapa de krigagem apresentado no Gráfico 3 mostrou uma heterogeneidade no teor de carbono, sendo que os maiores teores de carbono ocorreram em alguns pontos da área, sem uma conformação definida. Essa distribuição pode ser explicada pela maior concentração de matéria orgânica e maior ciclagem de nutrientes nesses locais.

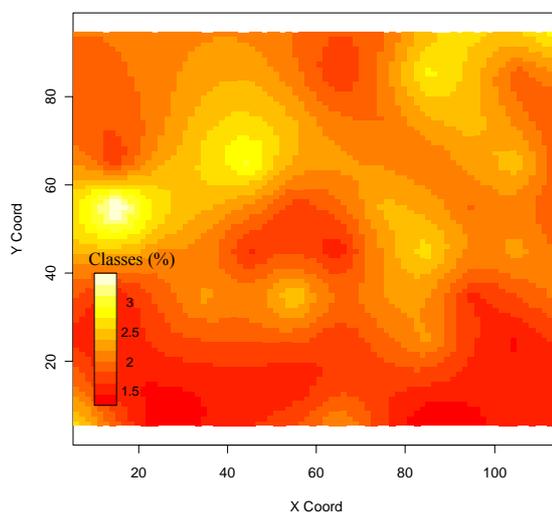


Gráfico 3 Interpolação por krigagem da variável teor de carbono do solo (%) sob um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. na profundidade 20-40 cm

Observou-se pelo mapa de krigagem apresentado no Gráfico 4 que houve uma concentração dos maiores teores de carbono na borda superior da área, evidenciando que para essa profundidade e nesses locais há uma presença maior de matéria orgânica.

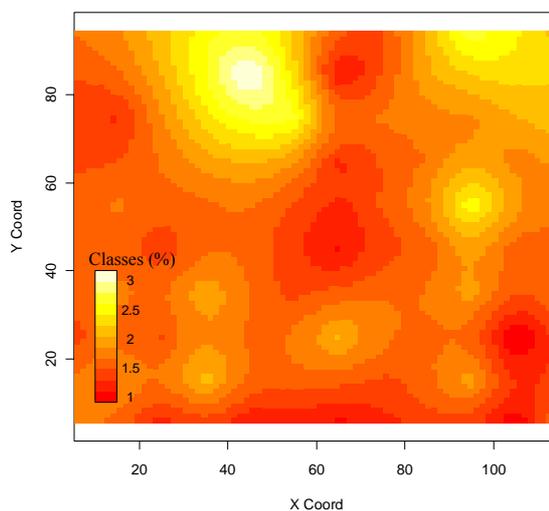


Gráfico 4 Interpolação por krigagem da variável teor de carbono do solo (%) sob um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. na profundidade 40-60 cm

Novaes Filho et al. (2007), estudando a distribuição espacial de carbono em solos sob floresta primária na Amazônia Meridional, verificaram dependência espacial desse atributo no horizonte superficial e subsuperficial. Os autores concluíram que a concentração de carbono varia de acordo com a fitofisionomia vegetal, posição topográfica da paisagem e características intrínsecas do solo, como a textura.

Scurlock e Hall (1998 citados por ADUAN; VILELA; KLINK, 2003) estudaram a espacialização do teor de carbono no ecossistema de savana e concluíram que este possui distribuição espacial irregular, onde os maiores teores de carbono encontram-se sob as árvores.

3.3 Continuidade espacial do estoque de carbono presente no solo sob um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp.

Pela Tabela 4 verificou-se variabilidade moderada para todas as profundidades estudadas. Observou-se um gradiente decrescente do estoque de carbono, sendo que os maiores estoques de carbono estão localizados nas primeiras camadas, o que está diretamente relacionado com a maior presença de matéria orgânica nesses locais.

Tabela 4 Análise descritiva do estoque de carbono (Mg ha^{-1}) do solo sob um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. nas diferentes profundidades estudadas

Profundidade (cm)	Mínimo (Mg ha^{-1})	Máximo (Mg ha^{-1})	Média (Mg ha^{-1})	Variância (Mg ha^{-1})²	CV (%)
0-20	25,06	99,19	54,97	264,07	29,56
20-40	28,78	75,92	44,56	103,13	22,79
40-60	20,36	67,43	36,93	87,69	25,36
60-80	17,99	56,32	32,65	67,74	25,21

Com base no Gráfico 5 observou-se a presença de *outliers*, contudo, estes possuem influência moderada sobre os dados. Os *outliers* correspondem aos pontos amostrais e às profundidades onde ocorreram maior estoque de carbono nesse fragmento florestal. Considerando as profundidade estudadas, observaram-se valores máximos de estoque de carbono de 99,19; 75,92; 67,43 e 56,32 Mg ha^{-1} para as unidades amostrais 36, 5, 14 e 5 respectivamente.

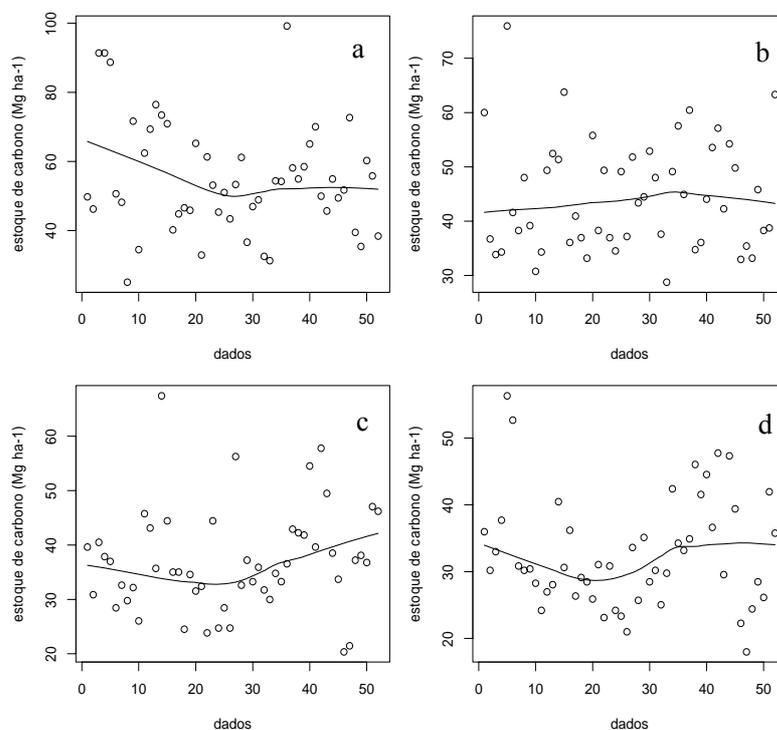


Gráfico 5 Análise de dispersão dos dados de estoque de carbono presente no solo (Mg ha^{-1}) sob fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. nas profundidades a: 0-20; b: 20-40; c: 40-60; d: 60-80 cm

Analisando os parâmetros dos semivariogramas do estoque de carbono apresentados na Tabela 5, observou-se um grau de dependência alto para a profundidade 20-40 cm e moderado para a profundidade 60-80 cm. Em contrapartida a esse estudo, Chaves e Farias (2008) estudando a variabilidade espacial de estoque de carbono em solo cultivado com cana de açúcar, observaram que o estoque de carbono na camada superficial do solo apresentou moderado grau de dependência espacial, enquanto nas camadas subsuperficiais ocorreu um grau de dependência forte. Cambardella et al. (1994) afirmam que a

dependência espacial forte pode ser explicada por propriedades do solo, enquanto a dependência espacial fraca é influenciada por fatores externos.

Tabela 5 Parâmetros dos semivariogramas para o estoque de carbono (Mg ha^{-1}) encontrado no solo sob fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. nas diferentes profundidades estudadas

Profundidade (cm)	Modelo	Efeito Pepita (C_0)	Patamar ($C+C_0$)	Alcance (m)	Relação (%)	DE
0-20	pepita puro	256,00	256,00	0	100	N
20-40	matern	48,66	3995164,19	3621406,83	0,001	FO
40-60	esférico	40,23	97,42	95,37	41,29	MO
60-80	pepita puro	81,28	81,28	0	100	N

De acordo com Cambardella et al. (1994), a classificação da dependência espacial (DE) é estimada pela relação $[C_0/(C+C_0)] \times 100 < 25\%$ - forte (FO); entre 25 e 75% moderada (Mo) e $> 75\%$ - fraco (Fr); não ocorreu dependência espacial (N)

Observa-se no Gráfico 6 que nas profundidades 0-20 cm e 60-80 cm ocorreram efeito pepita puro. Nas profundidades 20-40 cm e 40-60 cm foram ajustados o modelo matern e modelo esférico respectivamente.

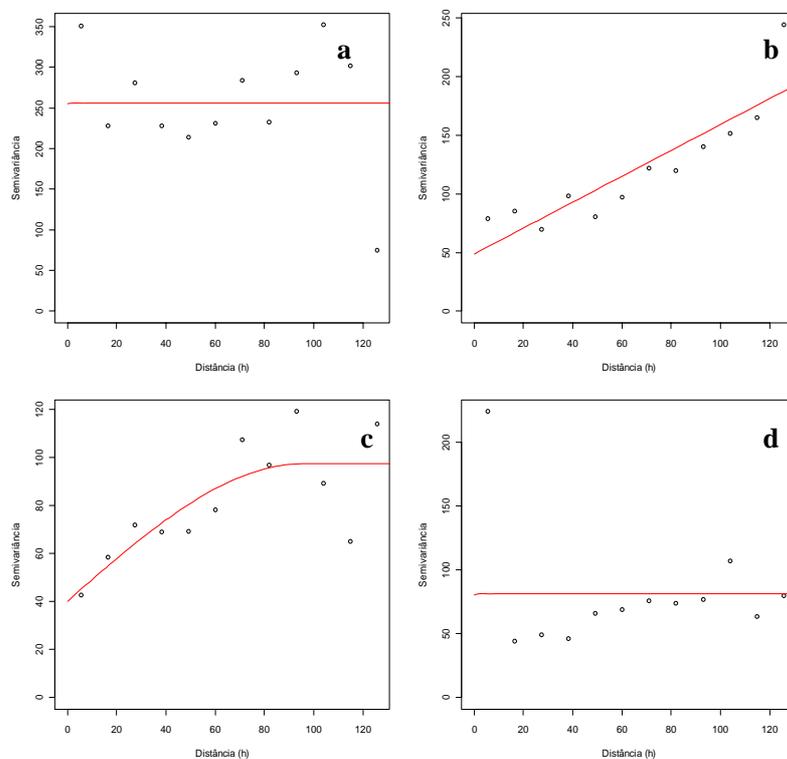


Gráfico 6 Semivariogramas do estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}) sob um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. nas profundidades a: 0-20; b: 20-40; c: 40-60; d: 60-80 cm

Por meio dos ajustes dos semivariogramas para as profundidades 20-40 cm e 40-60 cm foi possível fazer a interpolação por krigagem linear ordinária.

O Gráfico 7 evidenciou um padrão heterogêneo de distribuição de estoque de carbono no solo. Observou-se maior estoque de carbono nas bordas superiores e no centro da área, o que pode ser justificado pela maior presença de matéria orgânica nesses locais.

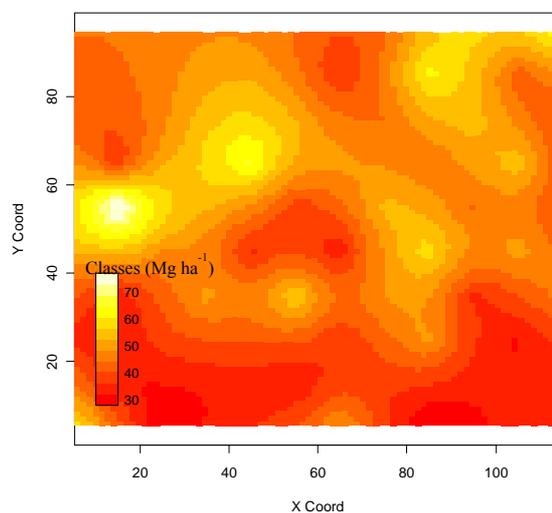


Gráfico 7 Interpolação por krigagem da variável estoque de carbono presente no solo (Mg ha^{-1}) sob um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. na profundidade 20-40 cm

Por meio do Gráfico 8 detectou-se uma variabilidade heterogênea no estoque de carbono para a profundidade 40-60 cm. Uma maior concentração do estoque de carbono foi observada nas bordas da área, o que pode ser explicado por fatores inerentes ao solo, visto que essa é uma camada que está menos sujeita a intemperizações e efeitos de manejo do solo.

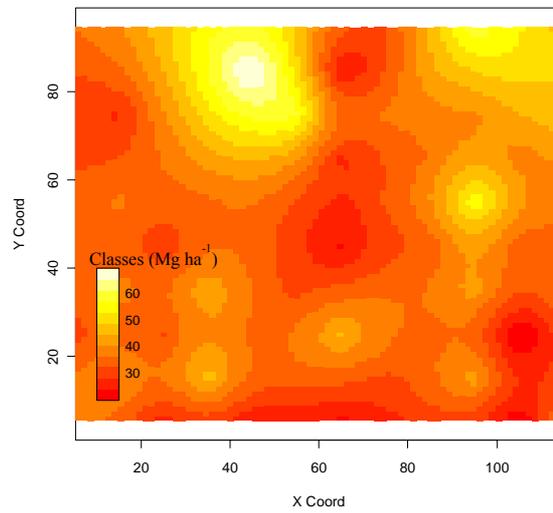


Gráfico 8 Interpolação por krigagem da variável estoque de carbono presente no solo (Mg ha^{-1}) sob um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. na profundidade 40-60 cm

4 CONCLUSÕES

O estoque de carbono no solo presente nesse fragmento florestal foi de 169,11 Mg ha⁻¹. O teor e estoque de carbono tiveram um padrão decrescente em relação ao perfil do solo. Esse fenômeno pode ser explicado pela maior ciclagem de nutrientes nas camadas superiores do solo, e conseqüentemente pela elevada concentração de matéria orgânica.

Observou-se a ocorrência de dependência espacial forte e moderada para as variáveis teor e estoque de carbono nas profundidades 20-40 cm e 40-60 cm, respectivamente, sendo possível o ajuste dos modelos matern e esférico. O mapa de predição por krigagem mostrou heterogeneidade na distribuição espacial do teor e estoque de carbono, fato que pode ser explicado pelas características intrínsecas do solo, assim como fatores externos como relevo, clima, pluviosidade e ação antrópica.

Para as profundidades 0-20 cm e 20-40 cm ocorreu efeito pepita puro, evidenciando a não dependência espacial. Entre as causas desse fenômeno estão a ineficiência da distância de amostragem e erros de medição.

Esse estudo evidenciou que há dependência espacial para o teor e estoque de carbono no solo, porém devem ser realizados estudos posteriores que abordem as variáveis inerentes ao solo que estejam correlacionadas ao carbono, facilitando com isso o entendimento da distribuição espacial desse elemento.

REFERÊNCIAS

ADUAN, E. A.; VILELA, M. F.; KLINK, C. A. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres: o caso do cerrado brasileiro**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2003. 30 p.

BADDEY, R. M. et al. **Sequestro de carbono em solos sob sistemas agropecuários produtivos**. Seropédica: EMBRAPA; Centro Nacional de Pesquisa de Agrobiologia, 2004. 3 p.

BALBINOT, R. et al. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 59-68, jun. 2003.

CALDEIRA, M. V. W. et al. Determinação de carbono orgânico em povoamentos de *Acacia mearnsii* de Wild. plantados no Rio Grande do Sul. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 1, n. 2, p. 47-54, jun. 2003.

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

CARVALHO, S. P. C. et al. Different strategies to estimate the commercial volume of *Anadenanthera colubrine* (Vell.) Brenan. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 3, p. 399-406, set. 2010.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos Tabuleiros Costeiros da Paraíba: solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 1, p. 20-25, mar. 2008.

COSTA, F. S. et al. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 323-332, out. 2008.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley, 1993. 900 p.

CUNHA, G. M. et al. Biomassa e estoque de carbono e nutrientes em florestas Montana da Mata Atlântica na região norte do estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 33, n. 5, p. 1157-1185, set./out. 2009.

GATTO, A. et al. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, n. 4, p. 1069-1079, jul./ago. 2010.

HAAG, H. P. **Ciclagem de nutrientes em florestas tropicais**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 144 p.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1, p. 1-22, feb. 2004.

LIMA, A. M. N. **Estoques de carbono e frações da matéria orgânica do solo sob povoamentos de eucalipto no Vale do Rio Doce, MG**. 2004. 131 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

MAFRA, A. L. et al. Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 217-224, mar./abr. 2008.

NOVAES FILHO, J. P. et al. Distribuição espacial de carbono em solo sob floresta primária na Amazônia Meridional. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 1, p. 83-92, jan./fev. 2007.

PAIVA, A. O.; FARIA, G. R. Estoque de carbono do solo sob cerrado *sensu stricto* no Distrito Federal, Brasil. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, Chapadinha, v. 1, n. 1, p. 59-65, ago. 2007.

PRENTICE, I. C. Interactions of climate change and the terrestrial biosphere. In: BENGTTSSON, L. O.; HAMMER, C. U. (Ed.). **Geosphere-biosphere interactions and climate**. Cambridge: Cambridge University, 2001. p. 176-198.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Version 2.6.1. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 10 mar. 2012.

RESCK, D. V. S. et al. Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 359-418.

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

STEIN, A.; ETTEMA, C. An overview of spatial sampling procedures and experimental design of spatial studies for ecosystem comparisons. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 94, p. 31-47, Jan. 2003.

STEINBEISS, A.; TEMPERTON, V. M.; GLEIXNER, G. Mechanisms of short-term soil carbon storage in experimental grasslands. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 40, p. 2634-2642, Jan. 2008.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition and reactions**. 2nd ed. New York: Willey, 1994. 496 p.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, n. 1, p. 45-94, Jan. 1985.

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 1, p. 175-180, 1994.

VILELA, E. A.; RAMALHO, M. A. P. Análise das temperaturas e precipitações pluviométricas de Lavras, Minas Gerais. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 3, n. 1, p. 71-79, 1979.

VITAL, A. R. T. et al. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 793-800, nov./dez. 2004.

WACKERNAGEL, H. **Multivariate geostatistics: an introduction with applications**. New York: Springer-Verlag, 2003. 387 p.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. **Geostatistics for environmental scientists**. 2nd ed. Chichester: J. Wiley, 2007. 315 p.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Comparando o estoque de carbono presente na parte aérea e solo sob o fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp., observou-se a superioridade do valor do estoque de carbono no solo de 169,11 Mg ha⁻¹ em relação ao fuste de 77,45 Mg ha⁻¹. Esse resultado confirma a superioridade do solo em armazenar cerca de duas vezes a quantidade de carbono presente na biomassa vegetal.

Com esse trabalho ficou clara a importância dos estudos das raízes, pois estas desempenham papel importante no cálculo do estoque de carbono total em uma floresta, além de exercerem papel fundamental na incorporação de matéria orgânica ao solo.

A geoestatística apresentou-se como uma ferramenta eficiente para análise da espacialização do carbono presente nos diferentes compartimentos de uma floresta, facilitando as tomadas de decisões com relação ao correto manejo da área, além de possibilitar comparações com áreas afins.

A *Anadenanthera* sp. é uma espécie muito atrativa pois permite a obtenção de múltiplos produtos, como madeira para construção civil e indústria moveleira; carvão, taninos, fármacos, além de ser uma espécie potencial para reflorestamentos e enriquecimento de mata nativa com objetivo de obtenção de créditos de carbono. Portanto, além do serviço ambiental oferecido pelo sequestro florestal de carbono de *Anadenanthera* sp., este pode se tornar uma fonte alternativa de renda.