

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Carbono na parte aérea de plantios de *Eucalyptus* spp. – em nível de árvore
por amostragem destrutiva e para talhões inteiros após o ajuste de métricas
LiDAR**

Carlos Alberto Silva

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba
2013**

Carlos Alberto Silva
Engenheiro Florestal

Carbono na parte aérea de plantios de *Eucalyptus* spp. – em nível de árvore por amostragem destrutiva e para talhões inteiros após o ajuste de métricas LiDAR

Orientador:
Prof. Dr. **LUIZ CARLOS ESTRAVIZ RODRIGUEZ**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2013

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Silva, Carlos Alberto

Carbono na parte aérea de plantios de *Eucalyptus* spp. – em nível de árvore por amostragem destrutiva e para talhões inteiros após o ajuste de métricas LiDAR / Carlos Alberto Silva.- - Piracicaba, 2013.

152 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Biomassa 2. Inventário florestal 3. LiDAR 4. Estoque de carbono 5. *Eucalyptus*
I. Título

CDD 634.9734
S586c

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

À minha esposa **Carine**
À minha mãe **Sueli**
À minha irmã **Paula**

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

a Deus, pela força;

à minha família, por todo apoio, incentivo e carinho;

à minha esposa, por toda paciência, ajuda, incentivo e compreensão;

ao orientador Dr. Luiz Carlos Estraviz Rodriguez professor na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), pela confiança, profissionalismo e ensinamento;

aos pesquisadores Dr. Andrew T. Hudak e Dr. Robert J. Liebermann e demais membros do Rocky Mountain Reserach Station em Moscow/Idaho-USA, pela confiança, profissionalismo, ensinamento e por todo apoio e atenção quanto as técnicas de processamento e análises de dados LiDAR;

à prof.^a Dra. Marisa de Cássia Piccolo e ao técnico de laboratório Guilherme Furlan, ambos do CENA/USP, e à colega Julianne de Castro Oliveira da ESALQ/USP pelo apoio e suporte para a realização das análises de carbono;

ao técnico de Laboratório de Métodos Quantitativos LMQ/ESALQ Jefferson Lordello Polizel e aos demais colegas do LMQ e da ESALQ/USP;

ao colega Veraldo Liesenberg pelas dica e troca de conhecimentos sobre sensoriamento remoto;

à Fibria Celulose S/A por todo suporte e concessão dos dados LiDAR e de inventário florestal;

ao colega Samuel de Pádua Chaves e Carvalho pelo apoio na coleta de campo e pela transferência de dados LiDAR e de inventário;

aos colegas José Henrique Tertulino Rocha, Humberto Tadeu Menecheli Filho e Fredy Polo Villanueva pelo apoio na coleta de campo e processamento da biomassa aérea florestal em laboratório;

à Giovana, que me auxiliou sempre em cada dúvida e problema;

e à FAPESP pela bolsa e suporte concedido durante o período deste trabalho.

“Persistence is the shortest path to success”
(Charles Chaplin)

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	21
1 INTRODUÇÃO.....	23
Referências	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 Efeito estufa e as mudanças climáticas globais	31
2.1.1 Efeito estufa.....	31
2.1.2 Mudanças climáticas globais	32
2.2 O ciclo do carbono e as florestas	34
2.3 A importância das florestas na mitigação dos efeitos da concentração de carbono na atmosfera	35
2.4 Panorama geral do setor florestal brasileiro de florestas plantadas.....	36
2.5 Quantificação do estoque de carbono em florestas plantadas	39
2.5.1 Métodos diretos	39
2.5.2 Métodos indiretos	40
2.6 Referencial teórico da tecnologia LiDAR	41
2.6.1 O que é o LiDAR.....	41
2.6.2 Os princípios de funcionamento do LiDAR	42
2.6.3 Principais produtos obtidos pelo LiDAR	47
2.6.4 Principais aplicações da tecnologia LiDAR na área florestal.....	51
Referências	56
3 QUANTIFICAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO NA BIOMASSA ÁREA FLORESTAL EM PLANTAÇÕES COMERCIAIS DE <i>EUCALYPTUS</i> SPP.	63
Resumo	63
Abstract.....	63
3.1 Introdução.....	64
3.1.1 Objetivos.....	66
3.1.2 Hipótese.....	67
3.2 Material e métodos	67

3.2.1 Localização e caracterização da área de estudo	67
3.2.2 Coleta e processamento da biomassa aérea florestal	73
3.3 Resultados e Discussões.....	79
3.3.1 Análise do teor de carbono na biomassa aérea	79
3.3.2 Modelos ajustados para as estimativas do estoque de carbono em nível de árvores	85
3.4 Conclusões	90
Referências.....	91
4 ESTIMATIVAS DO ESTOQUE DE CARBONO NA BIOMASSA AÉREA FLORESTAL COM O USO DA TECNOLOGIA LIDAR.....	95
Resumo.....	95
Abstract	96
4.1 Introdução	96
4.1.1 Objetivos	97
4.1.2 Hipótese	98
4.2 Material e métodos.....	98
4.2.1 Localização e caracterização da área de estudo	98
4.2.2 Estimativa do estoque de carbono em campo	105
4.2.3 Estimativa do estoque de carbono via LiDAR.....	107
4.2.4 Modelagem do estoque de carbono através de dados LiDAR	113
4.2.5 Avaliação dos modelos construídos através de dados LiDAR	114
4.3 Resultados e discussão	116
4.3.1 Modelos preditivos do carbono pelo LiDAR.....	116
4.3.2 Estimativa do estoque de carbono e sua espacialização em área total aplicando os modelos LiDAR ajustados neste estudo.....	127
4.4 Conclusões	129
Referências.....	129
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	135
APÊNDICES.....	139

RESUMO

Carbono na parte aérea de plantios de *Eucalyptus* spp. – em nível de árvore por amostragem destrutiva e para talhões inteiros após o ajuste de métricas LiDAR

No âmbito das mudanças climáticas globais, a quantificação do estoque de carbono em povoamentos florestais tem recebido mais atenção, principalmente pelo fato das florestas exercerem um papel fundamental no equilíbrio do estoque de carbono global. Com o objetivo de contribuir para esse processo, a parte investigativa deste trabalho foi desenvolvida em duas etapas. A primeira etapa objetivou o ajuste de modelos alométricos para a estimativa do estoque de carbono presente na biomassa total (C_{total}), no lenho comercial (C_{leco}) e parte residual (C_{rds}) (casca, folhas e galhos) em plantações de *Eucalyptus* spp. em nível de árvores, através de uma amostragem destrutivas de árvores, análise elementar do carbono em laboratório e medidas convencionais de inventário. A medição do diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total das árvores em parcelas amostradas instaladas nos talhões onde as árvores foram coletadas para determinação direta de carbono também foi realizada. A segunda parte, consistiu na avaliação do uso da tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) aerotransportada (*Airborne LASER scanning*) como uma alternativa eficiente e versátil para a estimativa do estoque de carbono total (C_{total}), no lenho comercial de toras (C_{leco}) e no resíduo da árvore (C_{rds}) em nível de parcelas em plantações de *Eucalyptus* spp usando como base o estoque de carbono estimado na primeira fase. Os resultados obtidos encontram-se resumidos em dois artigos científicos. O primeiro artigo mostra que os modelos baseados no logaritmo do diâmetro à altura do peito (DAP) e da altura total da árvore (Ht) oferecem boas precisão e exatidão para estimar o estoque de carbono em nível de árvore. O segundo artigo, permitiu a determinação das melhores métricas LiDAR para o cálculo do teor total de carbono, tanto no carbono total, lenho comercial e nas partes residuais da árvore em nível de plantação. Esses resultados, bem como os indicadores estatísticos utilizados para avaliar a qualidade dos ajustes, são o cerne desta dissertação.

Palavras-chave: Biomassa; Inventário florestal; LiDAR; Estoque de carbono; *Eucalyptus*

ABSTRACT

Aboveground carbon in *Eucalyptus* spp. plantations – at tree level by destructive sampling and for whole stands after adjusting LiDAR metrics

In the context of global climate change, the quantification of the carbon content in forest plantations have received great attention. This is because vegetation play an important role in the global carbon budget. This master thesis was developed in two main parts. The first part was to adjust allometric equations for the estimation of the carbon content at a tree level. This was performed for the above ground section (C_{total}), in commercial logs (C_{leco}) and residuals (C_{rds}) (e.g. bark, leaves and branches/twigs). The experiment was based on the destructive model of individual trees harvested in commercial plantations of *Eucalyptus* spp. The experiment encompasses both forest inventory and laboratory analyses procedures. Additionally, *in-situ* measurements such as the diameter at the breast height (DBH) and the total tree height were also performed. These sample plots were located in homogeneous forest units and close to the areas where the trees have been harvested. The second part of this master thesis was the evaluation of the airborne LiDAR technology as a tool for the retrieval of the above ground biomass (C_{total}), the carbon present in the commercial logs (C_{leco}) and residuals. This procedure was performed at the sample plots level. This procedure was based on the information provided in the first part. The results are presented as two scientific manuscripts. The first manuscript shows that allometric equations based on the log of the variables diameter at the breast height (DBH) and total tree height (Ht) were good predictors for the retrieval of the total carbon content at a tree level. The second manuscript allow the selection of the best LiDAR derived metrics for the retrieval of the total carbon content, either at above ground level, commercial logs and residual parts of the tree at a sample plots level. These results, as well as the statistical indicators for the adjustment of several statistical models is the core of this master thesis

Keywords: Biomass; Forest inventory; Light Detection and Ranging LiDAR; Carbon stock; *Eucalyptus*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - O ciclo do carbono. Estoques (109 MgC) e fluxos (109 MgC.ano-1). (Fonte: IPCC, 2000a).....	35
Figura 2 - Comparação da produtividade florestal de coníferas e de folhosas no Brasil e em países selecionados, 2011. (Fonte: ABRAF, 2012).....	38
Figura 3 - Componentes do sistema LiDAR aerotransportado. Fonte: McGaughey(2013).....	44
Figura 4 - Característica dos diferentes sistemas ALS, (A) sistema de ondas contínuas (full-waveform) e (B) sistema de pulsos (discrete echo). Fonte: Giongo et al. (2010).....	45
Figura 5 – Ilustração da emissão de pulsos laser “sistema de retornos discretos” e sinais de retornos. Fonte: Adaptado de JENSEN (2009).....	46
Figura 6 – Representação de diferentes modelos digitais de elevação (DEMs). A saber, modelo digital de superfície (DSM) a), modelo digital de terreno (DTM) b) e o modelo digital de altura copa (CHM) c). Fonte: Adaptado de Giongo (2010).....	48
Figura 7 - Ilustração da nuvem de pontos LiDAR e dos MDEs. A) nuvem de pontos na parcela, B) DTM, C) DSM e D) CHM. Fonte: Elaborado pelo autor.....	48
Figura 8 - Ilustração da região de estudo, com destaque as fazendas pertencentes aos municípios de Jacareí, imagem A (coordenadas UTM: 402982 m E; 7416869 m S), Paraibuna, imagem B (coordenadas UTM: 424939 m E; 7408151 m S) e São Luiz do Paraitinga, imagem C (coordenadas UTM: 459893 m E; 7432066 m S), estado de São Paulo.....	68
Figura 9 - Distribuição da temperatura do ar e da precipitação ao longo do ano no município de Jacareí, São Paulo. Fonte: Ajustado de CPA (2013).....	69
Figura 10 - Distribuição da temperatura do ar e da precipitação ao longo do ano no município de São Luiz do Paraitinga, São Paulo. Fonte: Ajustado de CPA (2013).....	69
Figura 11 - Distribuição da temperatura do ar e da precipitação ao longo do ano no município de Paraibuna, São Paulo. Fonte: Ajustado de CPA (2013).....	69
Figura 12 - Área de estudo, fazenda F987_Santa Terezinha VI. Fotografia aérea ortoretificada com delimitações dos talhões florestais.....	70
Figura 13 – Área de estudo, fazenda F986_Santa Terezinha V. Fotografia aérea ortoretificada com delimitações dos talhões florestais.....	71
Figura 14 - Área de estudo, fazenda F849_São José III. Fotografia aérea ortoretificada com delimitações dos talhões florestais.....	71
Figura 15 - Área de estudo, fazenda F948_Jataí. Fotografia aérea ortoretificada com delimitações dos talhões florestais.....	72
Figura 16 - Área de estudo, fazenda F634_Patzal do vale feliz. Fotografia aérea ortoretificada com delimitações dos talhões florestais.....	72

Figura 17 - Etapas do processo de quantificação da biomassa florestal. A) Corte e derrubada das árvores selecionadas; B) Retirada dos galhos secos e vivos; C) Separação dos galhos secos e vivos; D) e E) Retirada das folhas dos galhos vivos; F) Medição da altura do fuste; G) Corte dos discos a cada 1 metro do fuste; H) e I) Pesagem dos componentes da árvore (peso úmido); J) e M) Coleta das amostras dos componentes da árvore para moagem em laboratório; N) Amostras dos componentes da árvore para secagem, pesagem e moagem em laboratório. Fonte: Elaborado pelo autor, fotos obtidas do Programa Temático de Silvicultura e Manejo, PTSM –IPEF 74

Figura 18 - Ilustração do método de determinação do lenho comercial de um fuste. O fuste é dividido em toras de 6 metros, até a ponta mais fina atingir 5 cm. Considerando os valores observados no campo, observou-se um fator de conversão de lenho total no fuste para lenho comercial de 0,93 76

Figura 19 - Etapas do processamento em laboratório da biomassa florestal. A) Retirada das cascas e medições das circunferências dos discos em laboratório; B) Pesagem das cascas; C) Pesagem dos discos; D) Secagem das amostras dos componentes da árvore e em seguida as medições dos pesos secos; E) Moagem dos componentes da árvore para análise de C em laboratório e F) Amostras moídas prontas para as análises de C em laboratório. Fonte: Elaborado pelo autor, fotos obtidas do Programa Temático de Silvicultura e Manejo, PTSM – IPEF 77

Figura 20 - Percentual de carbono nos compartimentos arbóreos em povoamentos de *Eucalyptus* spp. em diferentes localidades ordenadas pela idade 82

Figura 21 - Percentual de carbono nos compartimentos arbóreos lenho comercial e parte residual em povoamentos de *Eucalyptus* spp. em diferentes localidades ordenadas pela idade 85

Figura 22 - Relação valores observados versus estimados para carbono total (N=52): a) carbono observado versus estimado; b) carbono estimado pelo modelo versus carbono estimado na validação cruzada; c) carbono observado versus carbono estimado pela validação cruzada e d) resíduos ordinários versus carbono estimado 88

Figura 23 - Relação valores observados versus estimados para carbono no lenho comercial (N=48): a) carbono observado versus estimado; b) carbono estimado pelo modelo versus carbono estimado na validação cruzada; c) carbono observado versus carbono estimado pela validação cruzada e d) resíduos ordinários versus carbono estimado 89

Figura 24 - Relação valores observados versus estimados para carbono nos componentes residuais da árvore (N=52): a) carbono observado versus estimado; b) carbono estimado pelo modelo versus carbono estimado na validação cruzada; c) carbono observado versus carbono estimado pela validação cruzada e d) resíduos ordinários versus carbono estimado 90

Figura 25 - Ilustração da região de estudo, com destaque às fazendas pertencentes aos municípios de Jacareí, imagem A (coordenadas UTM: 402982 m E; 7416869 m S), Paraibuna, imagem B (coordenadas UTM: 424939 m E; 7408151 m S) e São Luiz do Paraitinga, imagem C (coordenadas UTM: 459893 m E; 7432066 m S), estado de São Paulo 99

Figura 26 - Distribuição da temperatura do ar e da precipitação ao longo do ano no município de Jacareí, São Paulo. Fonte: Ajustado de CPA (2013) 100

- Figura 27 - Distribuição da temperatura do ar e da precipitação ao longo do ano no município de São Luiz do Paraitinga, São Paulo. Fonte: Ajustado de CPA (2013)..... 100
- Figura 28 - Distribuição da temperatura do ar e da precipitação ao longo do ano no município de Paraibuna, São Paulo. Fonte: Ajustado de CPA (2013) 100
- Figura 29 - Área de estudo, fazenda F987_Santa Terezinha VI. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais 101
- Figura 30 – Área de estudo, fazenda F986_Santa Terezinha V. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais 102
- Figura 31 - Área de estudo, fazenda F849_São José III. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais 102
- Figura 32 - Área de estudo, fazenda F184_Santa Cecília. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais 103
- Figura 33 - Área de estudo, fazenda F166_Santa Cruz do Sertãozinho. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais..... 103
- Figura 34 - Área de estudo, fazenda F984_Jataí. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais 104
- Figura 35 - Área de estudo, fazenda F634_Patzal do vale feliz. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais 104
- Figura 36 - Área de estudo, fazenda F950_Urutay do Vale Feliz. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais..... 105
- Figura 37 - Etapas do processamento de dados LiDAR para obtenção das métricas e mapas referentes à nuvem de pontos LiDAR. Os DTM, DSM e CHM, com resolução de 1 m x1m112
- Figura 38 - Relação do carbono total na parte aérea estimado versus observado (N=52). a) Carbono total na parte aérea observado versus estimado pelo modelo LiDAR ajustado, b) carbono total na parte aérea estimado pelo modelo LiDAR ajustado versus estimado pela validação cruzada LiDAR, c) carbono total na parte aérea observado versus estimado pela validação cruzada e d) gráfico de resíduos ordinários versus carbono total na parte aérea estimado. A linha indica a relação de 1:1 123
- Figura 39 - Relação do carbono total na parte aérea estimado versus observado (N=48). a) carbono no lenho comercial observado versus estimado pelo modelo LiDAR ajustado, b) carbono lenho comercial estimado pelo modelo LiDAR ajustado versus estimado pela validação cruzada LiDAR, c) carbono no lenho comercial observado versus estimado pela validação cruzada e d) gráfico de resíduos ordinários versus carbono no lenho comercial estimado. A linha indica a relação de 1:1 124
- Figura 40 - Relação do carbono total na parte aérea estimado versus observado (N=52). a) carbono no resíduo da árvore observado versus estimado pelo modelo LiDAR ajustado, b) carbono resíduo da árvore estimado pelo modelo LiDAR ajustado versus estimado pela validação cruzada LiDAR, c) carbono no resíduo da árvore observado versus estimado pela

validação cruzada e d) gráfico de resíduos ordinários versus carbono resíduo da árvore estimado. A linha indica a relação de 1:1 125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área de distribuição de plantios florestais com <i>Eucalyptus</i> nos estados do Brasil, 2011. (Fonte: ABRAF, 2012).....	37
Tabela 2 - Estatísticas referente à nuvem de pontos LiDAR (MCGAUGHEY, 2013).....	50
Tabela 3 - Uso e potencialidade da tecnologia LiDAR em aplicações florestais.....	51
Tabela 4 - Características das fazendas em estudo.....	70
Tabela 5 - Valores descritivos de parte das características biométricas da rede de parcelas inventariadas na área de estudo.....	73
Tabela 6 - Teor de carbono em porcentagem presente na biomassa seca dos compartimentos da árvore.....	79
Tabela 7 - Teor de carbono presente na biomassa área por classe diamétrica.....	80
Tabela 8 - Estoque de carbono na biomassa aérea em plantios de <i>Eucalyptus</i> spp.....	81
Tabela 9 - Estoque de carbono médio presente na biomassa seca do lenho comercial e parte residual em plantações de <i>Eucalyptus</i> spp.....	84
Tabela 10 - Estoque de carbono médio presente na biomassa seca do lenho comercial e parte residual em plantações de <i>Eucalyptus</i> spp. por classes diamétricas.....	84
Tabela 11 - Modelos de regressões ajustados para a estimativa do estoque de carbono total da parte aérea da árvore, lenho comercial e resíduo, baseado na coleta destrutiva de amostras em 56 árvores.....	85
Tabela 12 - Estatísticas para os coeficientes dos modelos empregados para a estimativa do carbono total e nos componentes da árvore pelo inventário convencional.....	86
Tabela 13-Teste de normalidade pelo método do Shapiro-Wilk e homogeneidade de variâncias pelo teste de Breusch-Pagan para os modelos ajustados.....	86
Tabela 14 - Estatísticas de posição referente ao carbono observado e estimado ($\text{kg}\cdot\text{árv}^{-1}$).	87
Tabela 15 - Características das fazendas em estudo.....	101
Tabela 16 - Valores descritivos de parte das características biométricas da rede de parcelas inventariadas na área de estudo.....	106
Tabela 17 - Modelos de regressão ajustados para a estimativa do estoque de carbono total da parte aérea da árvore, lenho comercial e resíduo, baseados na coleta destrutiva de amostras em 56 árvores.....	106
Tabela 18 – Resumo das estimativas de estoque de carbono total, lenho comercial e parte resíduo para as fazendas estudadas ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$).	107

Tabela 19 - Atributos inerentes aos dados de voo, equipamento a laser e resolução espacial a serem utilizadas na coleta dos dados LiDAR.	107
Tabela 20 - Atributos inerentes aos dados de voo, equipamento a laser e resolução espacial a serem utilizadas na coleta dos dados LiDAR.	109
Tabela 21 - Matriz de correlação entre as métricas LiDAR não colineares.	117
Tabela 22 - Modelos de regressões lineares múltiplas ajustados para a estimativa do estoque de carbono total, no lenho comercial e no resíduo pós-colheita, obtido pelos modelos LiDAR.....	119
Tabela 23 - Modelos de regressões lineares múltiplas ajustados para a estimativa do estoque de carbono total, na tora comercial e no resíduo pós-colheita, obtido pelos modelos LiDAR.....	120
Tabela 24 - Estatísticas para os coeficientes dos modelos empregados para a estimativa do carbono total e nos compartimentos da árvore pelo inventário convencional..	121
Tabela 25 - Teste de normalidade pelo método do Shapiro – Wilk e de homogeneidade de variâncias pelo teste de Breusch Pagan para os modelos ajustados.	121
Tabela 26 - Resumo das estatísticas referente ao carbono observado e predito em valores transformados a escala original ($Mg.ha^{-1}$).	122
Tabela 27 - Exemplos de obras na literatura em que se verifica a presença das métricas LiDAR para estimativa de biométricas do inventário florestal, e as métricas LiDAR selecionadas neste trabalho.....	127
Tabela 28 – Estimativa do estoque de carbono presente na biomassa total aérea em plantios de <i>Eucalyptus</i> spp. pelo modelo LiDAR ajustado neste estudo.	128
Tabela 29 - Estimativa estoque de carbono no lenho comercial da presente biomassa aérea em plantios de <i>Eucalyptus</i> spp. pelo modelo LiDAR ajustado neste estudo.....	128
Tabela 30 - Estimativa estoque de carbono presente na parte residual biomassa aérea me plantios de <i>Eucalyptus</i> spp. pelo modelo LiDAR ajustado neste estudo.....	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAD	Average Absolute Deviation (Desvio Médio Absoluto)
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
AICc	Akaike Information Criterion (Critério de Informação de Akaike corrigido)
ALS	Airborne LASER scanning (Perfilhamento Laser Aerotransportado)
ASPRS	Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
Cc	Carbono na casca
CENA	Centro de Energia Nuclear na Agricultura
CFC	Cloro Flúor Carboneto
CH ₄	Metano
CHM	Modelo Digital de Altura (Canopy Height Model)
CO ₂	Dióxido de carbono
CPA	CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura)
DAP	Diâmetro a Altura do Peito
DEM	Modelo Digital de Elevação (Digital Elevation Model)
DSM	Modelo Digital de Superfície (Digital Surface Model)
DTM	Modelo Digital de Terreno (Digital Terrain Model)
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Fo	Folha
Ga	Galho
GEE	Gases do Efeito Estufa
GIECC	Grupo Intergovernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático
GPS	Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)
Ht	Altura total das árvores
IMA	Incremento Médio Anual
IMU	Unidade de Sistema Inercial
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPEF	Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais
IPIECA	International Petroleum Industry Environmental Conservation Association
IR	Infravermelho
Jpg	Joint Photographic Experts Group
LAI	Leaf Area Index (Índice de Área Foliar)
LDV	Visualização de dados LiDAR (LiDAR Data Visualization)
LiDAR	Detecção de Luz e Distância (Light Detection and Ranging)
LM	Algoritmo de locais máximos
LULUCF	Land Use Change and Forestry
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
Mg.ha ⁻¹	Megagrama por hectare
Mm	Mililitro
N ₂ O	Óxido nitroso
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
O ₃	Ozônio
°C	Grau Celsius
PK	Protocolo de Kyoto
Ps	Peso Seco
PTSM	Programa Temático
Pu	Peso Úmido

R ²	Coeficiente de determinação
R	Correlação de Pearson
RGB	Red, Green e Blue
RMSE	Raiz quadrada do erro médio
RMSE%	Raiz quadrada do erro médio em porcentagem
Sd	Desvio padrão
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SLICER	Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery
SO ²	Dióxido de Enxofre
SP	São Paulo
SPOT5	Satélite SPOT5
SVIs	Índice espectrais de vegetação
Tiff	Tagged Image File Format
Tr	Tronco
U	Umidade
USA	United States of America (Estados Unidos da América)
USDA	United States Department of Agriculture
USP	Universidade de São Paulo
W.m ⁻²	Watt por metro quadrado

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera e suas consequências sobre o meio ambiente vêm despertando a atenção da sociedade e sendo abordados como uma questão de polêmica mundial (INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2000a,2000b). A elevada concentração de CO₂ na atmosfera é preocupante, por gerarem o aumento do efeito estufa, e provocando, conseqüentemente, aquecimento global.

O efeito estufa é o principal regulador do aquecimento global. Este é um fenômeno de ocorrência natural, e de essencial importância para a sobrevivência e manutenção da vida na terra. Entre os principais gases do efeito estufa (GEE) destaca-se o CO₂. Sendo um fenômeno de ocorrência natural, o problema está em seu desequilíbrio, decorrente por exemplo das atividades industriais e a queima de combustíveis fósseis são as principais fontes humanas emissoras CO₂ na atmosfera.

Em resposta à questão do aquecimento global e suas possíveis e prováveis consequências à humanidade, realizaram-se importantes movimentos internacionais, cujos temas destinaram-se aos aprofundamentos das questões e fatores relacionados às mudanças climáticas globais. O Protocolo de Kyoto (PK), estabelecido em 1997 em Kyoto no Japão, foi um importante tratado entre países signatários da Organização das Nações Unidas (ONU) que procurou estabelecer metas e prazos para a redução das emissões de GEE's. Dentre os mecanismos de mitigação estabelecidos no PK, destaca-se o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Este foi um programa estabelecido com o intuito de reduzir as emissões de GEEs nos países em desenvolvimento, através do financiamento de projetos de redução de emissões ou sequestro de carbono por parte dos países desenvolvidos. As atividades que resultam em sequestro de carbono, de acordo com critérios do MDL, são as atividades relacionadas ao Uso da Terra e Mudança no Uso da Terra e Floresta (do inglês – Land Use Change and Forestry – LULUCF). Os reflorestamentos e florestamentos são exemplos de atividades que se enquadram em projetos de MDL.

As áreas florestais exercem papel relevante no ciclo global de carbono. As árvores, através da fotossíntese, absorvem o CO₂ atmosférico e o armazenam na sua biomassa. Segundo Ketterings et al. (2001), a estimativa de biomassa acima do solo é imprescindível aos estudos do balanço global de carbono, e de acordo com Cerri et al. (2001), o carbono estocado em ecossistemas tropicais (solo e vegetação) representa cerca de 20 a 25 % do carbono terrestre mundial.

As plantações florestais com espécies do gênero *Eucalyptus* são as mais extensas no Brasil, com 4,87 milhões de hectares, correspondendo a 74,8% da área total reflorestada do país (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2012). Essas espécies apresentam rápido crescimento, rusticidade e facilidade de adaptação a ambientes diversos, proporcionando uma rápida e eficiente absorção do carbono atmosférico (STAPE et al., 2008). Neste contexto, a quantificação do estoque de carbono total na floresta, assim como de cada segmento de uma árvore (raiz, tronco, folha, galhos e casca) em florestas de rápido crescimento tem recebido mais atenção, tanto pela possibilidade de elas emitirem CO₂ quanto o potencial de servirem como reservatórios de carbono e/ou sumidouros desse gás (CASTRO, 1996; YU, 2004).

A empresa de base florestal, além de almejar a produtividade máxima da floresta, busca também a sustentabilidade ambiental dos ecossistemas naturais. A prática de cultivo mínimo na qual há uma elevada presença de carbono pela cobertura morta, é um exemplo de atividade que busca atingir a produção ótima e a conservação ambiental pelo mínimo, impacto possível produzido ao solo durante o período de implantação, assim como pelos resíduos deixados pós-colheita. Esses resíduos atuam como fonte de nutrientes e proteção ao solo, por atenuarem a velocidade da água da chuva, minimizando o processo de erosão. A quantificação do carbono sequestrado na parte aérea e radicular em florestas de rápido crescimento é de grande interesse para as empresas florestais. Conhecer a quantidade de carbono que está saindo do campo pelas toras comerciais com destino à indústria de celulose, bem como a quantidade que fica no campo pelos resíduos pós-colheita (folhas, galhos, casca, cepa e raízes) e serapilheira são importante informações que buscam compreender as emissões de GEE associadas ao ciclo de vida dos produtos florestais.

As técnicas existentes para mensurar o estoque de carbono em plantações florestais, atualmente são limitadas por questões orçamentárias e temporais. As metodologias usadas atualmente baseiam-se em dados de inventário florestal, empregando-se fatores e equações de carbono que transformam os parâmetros biométricos da floresta, tais como diâmetro a altura do peito (DAP) e altura (Ht) dos indivíduos, em estimativa do estoque de carbono contido na biomassa aérea florestal (SOMOGYI et al., 2007). Convencionalmente, esse processo demanda de uma análise destrutiva da floresta, com o intuito de obter-se um valor preciso do estoque de carbono contido em todos os compartimentos de uma árvore, tais como folhas, galhos, troncos, casca e raízes (WATZLAWICK et al., 2002). Isso torna esse processo oneroso, uma vez que necessita de tempo e recursos financeiros.

Recentemente as técnicas de sensoriamento remoto, combinadas aos sensores ópticos, têm se apresentado como uma alternativa viável para a estimativa do estoque de carbono em florestas plantadas e naturais (HUDAK et al., 2009a, 2000b, 2012; OMASA et al., 2003). Dentre as técnicas de sensoriamento remoto atuais, o perfilhamento a laser, também conhecido por LiDAR (*Light Detection and Raging*) aerotransportado (*Airborne LASER scanning*), tem surgido com destaque no cenário florestal (HUDAK et al., 2009a, 2000b, 2012; JENSEN, 2009; LEFSKY et al., 1999, 2000, 2002; NÆSSET 1997, 2002, 2004a, 2004b, 2007; NÆSSET et al., 2001; VIERLING et al., 2011).

O LiDAR é um sistema ativo, e seu princípio consiste na emissão de um pulso laser, que após interagir com um objeto na superfície terrestre, retorna para o sensor em um dado intervalo de tempo. A diferença de tempo entre a emissão e recepção permite reproduzir, em três dimensões, feições da superfície do terreno e das estruturas verticais presentes na superfície terrestre (HUDAK et al., 2009a, 2009b; NOAA, 2012).

O uso do LiDAR para avaliação da vegetação tem sido foco de inúmeros estudos aplicados ao inventário e manejo florestal (D'OLIVEIRA et al., 2012; HUDAK et al., 2009a, 2009b, 2012; JENSEN, 2009; LEFSKY et al., 1999, 2000, 2002; MACEDO, 2009; MALTAMO, 2006, 2012; MEANS et al., 1999; NÆSSET 2002, 2004a, 2004b, 2007; PACKALÉN, 2006; RIAÑO et al., 2004; VIERLING et al., 2011; WULDER et al., 2008). A tecnologia possibilita reproduzir, de forma acurada, Modelos Digitais de Terreno (DTM, modelos que permitem descrever a elevação do terreno livre de objetos), Modelos Digitais de Superfícies (DSM, modelos que permitem descrever a elevação do terreno incluindo os objetos presentes), e Modelos Digitais de Altura (CHM, modelos que descrevem a altura de todos os objetos, tendo os pontos da nuvem referente ao solo normalizados a zero). Além da obtenção dos modelos mencionados, o processamento dos dados LiDAR nos permite, também, a obtenção de informações estatísticas (medidas de posição máxima, mínima, média, mediana, moda, quartil, percentil, variância, desvio padrão e coeficiente de variação) que refletem medidas referente aos objetos presentes na nuvem de pontos tridimensional. As informações estatísticas são, posteriormente, correlacionadas com métricas medidas em campo pelo inventário convencional para estimação precisa de parâmetros biométricos da floresta, tais como o estoque de carbono contido na biomassa aérea florestal.

A tecnologia LiDAR tem grande potencial para oferecer estimativas a extensas áreas, que se comparadas com métodos convencionais, apresentam alta precisão em pouco tempo e a um baixo custo (HUDAK et al., 2012; LIM et al., 2003; NÆSSET et al., 2007; REUTEBUCH et al., 2005). No Brasil, a utilização da tecnologia começou a se disseminar

mais recentemente com os trabalhos pioneiros de Macedo (2009), Rodriguez et al. (2010), Zandoná (2006) e Zonete et al. (2010), que avaliaram potencial da tecnologia aerotransportada para estimativas de parâmetros biométricos em povoamentos florestais.

Apesar da tecnologia LiDAR ser uma alternativa eficiente, e bastante aplicada ao inventário florestal em países como Estados Unidos, Finlândia e Suécia, existem ainda obstáculos para o seu uso em outros países, como o Brasil. As limitações não são derivadas do funcionamento da tecnologia em si, mas principalmente pelo fato de ainda ser uma tecnologia emergente no Brasil. A elaboração de metodologias de processamento voltadas às necessidades brasileiras ainda é recente, e neste aspecto se justifica a execução deste trabalho, principalmente pela busca de um avanço técnico científico que proporcione a elaboração de rotinas que auxiliem nos processos de aquisição e processamentos de dados LiDAR. Buscando, assim, atingir com eficiência as estimativas do estoque de carbono total e compartimentados em partes das árvores em florestas plantadas.

1.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral desse estudo foi estimar o estoque de carbono na parte aérea de plantios clonais de eucalipto no estado de São Paulo pela análise destrutiva da biomassa e avaliar o potencial da tecnologia LiDAR de estima-lo também. Como objetivos específicos:

(i) determinar o teor de carbono em compartimentos da biomassa, tais como lenho, casca, galhos e folhas;

(ii) obter por regressão estatística os parâmetros de modelos alométricos para estimação do estoque de carbono total, no lenho comercial e na parte residual existente na biomassa aérea;

(iii) avaliar o ajuste de modelos de regressão baseados em métricas LiDAR para a estimativa do estoque de carbono total, no lenho comercial e na parte residual existente na biomassa aérea;

O presente trabalho está estruturado em quatro capítulos. Os dois primeiros capítulos, incluindo este, correspondem a uma introdução ao tema, passando pelos objetivos gerais, e por uma breve revisão dos temas relacionados ao efeito estufa e às mudanças climáticas globais, como ciclo do carbono, a importância das florestas na mitigação dos efeitos da concentração de CO₂ na atmosfera, o panorama atual do setor florestal brasileiro de florestas plantadas, os métodos atuais aplicados para a estimativa do estoque de carbono, bem como

uma introdução do sensoriamento remoto através da tecnologia LiDAR, os princípios físicos e as aplicações dessa nova tecnologia na área florestal.

Os capítulos três e quatro correspondem ao cerne do trabalho. Nestes serão abordados temas específicos sobre determinação do teor carbono, quantificação do estoque de carbono, ajuste de modelos para a estimativa do estoque de carbono em árvores individuais através da análise destrutiva da biomassa florestal e a utilização da tecnologia LiDAR para estimação do estoque de carbono florestal em nível de talhão, com aplicação das equações ajustadas pela análise destrutiva e métricas LiDAR.

Por fim, no capítulo cinco ocorre o desfecho do trabalho, destacando os principais apontamentos levantados nas discussões, bem como as sugestões para trabalhos futuros, propondo melhorias na acurácia das estimativas de carbono, e promovendo créditos para a viabilidade do uso desta tecnologia para o inventário florestal e na elaboração de projetos de MDL.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011**. 7. ed. Brasília, 2012. 150 p.

CASTRO, E.A. de. **Biomass, nutrient pools and response to fire in the Brazilian Cerrado**. 1996. 128 p. Thesis (Master of Science) – Oregon State University, Oregon, 1996.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; CARVALHO, M.C.S.C.; VOLKOFF, B. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: Emissões e remoções de dióxido de carbono pelos solos por mudanças de uso da terra e calagem**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2001. 41 p.

D'OLIVEIRA, M.V.N.; REUTEBUCH, S.E.; MCGAUGHEY, R.J.; ANDERSEN, H.E. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning LiDAR in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 124, p. 479-491, Sept. 2012.

HUDAK, A.T.; EVANS, J.S.; SMITH, A.M.S. Review: LiDAR utility for natural resource managers. **Remote Sensing**, Basel, v. 1, p. 934–951, Nov. 2009.

HUDAK, A.T.; LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; BERTERRETICHE, M. Integration of LiDAR and Landsat ETM+ data for estimating and mapping forest canopy height. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 82, p. 397–416, Apr. 2009. Tirar a e b no texto

HUDAK, A.T.; STRAND, E.K.; VIERLING, L.A.; BYRNE, J.C.; EITEL, J.U.H.; MARTINUZZI, S.; FALKOWSKI, M.J. Quantifying aboveground forest carbon pools and fluxes from repeat LiDAR surveys. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 82, p. 397–416, Aug. 2012.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Land use, land use change, and forestry special report.** Summary for Policymakers. (Based on Watson, R. et al. as Core Writing Team). Montreal, 2000a. 388 p.

_____. Special report, emissions scenarios. Summary for Policymakers. (Based on Nebojsa Nakicenovic et al. as Core Writing Team). Montreal, 2000b. 570 p.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

KETTERINGS, Q.M.; COE, R.; NOORDWIJK, M. van.; AMBAGAU, Y.; PALM, C. A. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 146, n. 1/3, p. 199-209, June 2001.

LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; SPIES, T.A. An evaluation of alternate remote sensing products for forest inventory, monitoring, and mapping of Douglas-fir forests in western Oregon. **Canadian Journal of Forest Research**, Toronto, v. 31, n. 3, p. 78–87, Dec. 2000.

LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; ACKER, S.A.; PARKER, G.G.; SPIES, T.A.; HARDING, D. LiDAR Remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-Fir Western Hemlock Forests. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 70, n. 3, p. 339–361, Dec. 1999.

LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; HARDING, D.J.; PARKER, G.G.; ACKER, S.A.; GOWER, S.T. LiDAR remote sensing of above-ground biomass in three biomes. **Global Ecology and Biogeography**, Edinburgh, v. 11, p. 393–399, Sept. 2002.

LIM, K.; TREITZ, P.; WULDER, M.; STONGE, B.; FLOOD, M. LiDAR remote sensing of forest structure. **Progress in Physical Geography**, London, v. 27, n. 1, p. 88–106, Mar. 2003.

MACEDO, R.D.C. **Estimativa volumétrica de povoamento clonal de *Eucalyptus* spp. através de laser scanner aerotransportado.** 2009. 143 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

MALTAMO, M.; EERIKÄINEN, K.; PACKALÉN, P.; HYYPPÄ, J. Estimation of stem volume using laser scanning-based canopy height metrics. **Forestry**, Oxford, v. 79, n. 2, p. 217-229, Feb. 2006.

MALTAMO, M.; MEHTÄTALO, L.; VAUHKONEN, J.; PACKALÉN, P. Predicting and calibrating tree attributes by means of airborne laser scanning and field measurements. **Canadian Journal of Forest Research**, Toronto, v. 42, p. 1896–1907, Oct. 2012.

MEANS, J.E.; ACKER, S.A.; HARDING, D.J.; BLAIR, J.B.; LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; HARMON, M.E.; MCKEE, W. Scanning airborne LiDAR to estimate forest stand characteristics. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 67, n. 3, p. 298-308, Mar. 1999.

NÆSSET, E. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 61, n. 3, p. 246–253, Nov. 1997.

_____. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 80, n. 1, p. 88-99, Apr. 2002.

_____. Estimation of above- and below-ground biomass in boreal forest ecosystems. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Freiburg, v. 36, n. 8, p. 145-148, Oct. 2004a.

_____. Practical large-scale forest stand inventory using a small footprint airborne scanning laser. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Oslo, v. 19, n. 2, p. 164–179, Mar. 2004b.

_____. Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: Status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Oslo, v. 22, n. 5, p. 433–442, Oct. 2007.

NÆSSET, E.; BJERKNES, K.O. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 78, p. 328-340, Dec. 2001.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION COASTAL SERVICES CENTER. **Lidar 101: an introduction to Lidar technology, data, and applications**. Charleston: NOAA Coastal Services Center, 2012. 72 p.

OMASA, K.; QIU, G.Y.; WATANUKI, K.; YOSHIMI, K.; AKIYAMA, Y. Accurate estimation of forest carbon stocks by 3-D remote sensing of individual trees. **Environmental Science & Technology**, Iowa, v. 37, n. 6, p. 1198-201, Mar. 2003.

PACKALÉN, P. **Using airborne laser scanning data and digital aerial photographs to estimate forest growing stock**. 2006. 30p. Licentiate thesis (Master in Forest Planning and Economics) - Faculty of Forestry, University of Joensuu, Joensuu. 2006.

REUTEBUCH, S.E.; ANDERSEN, H.E.; MCGAUGHEY, R.J. Light detection and ranging (LIDAR): an emerging tool for multiple resource inventory. **Journal of Forestry**, Maryland, v. 103, n. 6, p. 286–292, Sept. 2005.

RIAÑO, D.; VALLADARES, F.; CONDÉS, S.; CHUVIECO, E. Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (LiDAR) in two contrasting forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 124, n. 3/4, p. 269–275, Aug. 2004.

RODRIGUEZ, L.C.E.; POLIZEL, J.L.; FERRAZ, S.F.B.; ZONETE, M.F.; FERREIRA, M.Z. Inventário florestal com tecnologia laser aerotransportada de plantios de *Eucalyptus* spp. no Brasil. **Ambiência**, Guarapuava, v. 6, p. 67-80, jul. 2010.

SOMOGYI, Z.; CIENCIALA, E.; MÄKIPÄÄ, R.; MUUKKONEN, P.; LEHTONEN, A.; WEISS, P. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. **European Journal of Forest Research**, Freising, v. 126, n. 2, p. 197–207, Apr. 2007.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Production and carbon allocation in a clonal Eucalyptus plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 3/4, p. 920–930, Sept. 2008.

VIERLING, L.A.; MARTINUZZI, S.; ASNER, G.P.; STOKER, J.; JOHNSON, B.R. LiDAR: providing structure. **Frontiers in Ecology and the Environment**, Washington, v. 9, p. 261–262, 2011.

WATZLAWICK, L.F.; KIRCHNER, F.F.; SANQUETTA, C.R.; SCHUMACHER, M.V. O papel do sensoriamento remoto nos estudos de carbono. In: SANQUETTA, C.R.; WATZLAWICK, L.F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M.A.B.; GOMES. **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, Imprensa Universitária, 2002. v. 1, p. 215-235.

WULDER, M.A.; BATER, C.W.; COOPS, N.C.; HILKER, T.; WHITE, J.C. The role of LiDAR in sustainable forest management. **The Forestry Chronicle**, Ontario, v. 84, n. 6, p. 807–826, Nov./Dec. 2008.

YU, C.M. **Sequestro florestal do carbono no Brasil: dimensões políticas socioeconômicas e ecológicas**. São Paulo: Annablume; IEB, 2004. 280 p.

ZANDONÁ, D.F. **Potencial do uso de dados laser scanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas**. 2006. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

ZONETE, M. F.; RODRIGUEZ, L. C. E.; PACKALÉN, P. Estimación de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia : uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 225-235, jun. 2010.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma revisão dos conceitos sobre as mudanças climáticas, efeito estufa, sequestro de carbono e métodos de quantificação de carbono em floresta, é apresentada neste capítulo com o objetivo de fundamentar o estudo e rever resultados encontrados em estudos semelhantes.

2.1 Efeito estufa e as mudanças climáticas globais

Nas duas últimas décadas, o aquecimento global vem se tornando cada vez mais alvo de preocupação de cientistas e líderes mundiais. Nos últimos 100 anos, observa-se um aumento de pouco menos de 1 grau Celsius na temperatura média da Terra (YU, 2004). A complexidade de se entender exatamente as causas e efeitos diretos do que provoca o aquecimento global ainda geram inúmeros debates entre cientistas e torna-se alvo de muitas pesquisas e discussões. Especula-se que o principal agravante do aquecimento é a exagerada emissão de gases do chamado efeito estufa (GEE), derivada de atividades humanas, tais como as que promovem a queima de petróleo e carvão.

2.1.1 Efeito estufa

O efeito estufa é um processo natural e intrínseco do meio ambiente, onde a perda de radiação infravermelha (calor) emitida pelo planeta Terra é reduzida pela presença de gases na atmosfera (AREVALO et al., 2002). Dessa forma o planeta se mantém aquecido em consequência do calor que é retido.

Os gases mais abundantes na atmosfera são o argônio (Ar), o nitrogênio (N) e o oxigênio (O₂). Além destes gases predominantes, há uma pequena quantidade de outros gases e estes são capazes de absorver a radiação infravermelha: CO₂ (gás carbônico), CH₄ (metano), N₂O (óxido nitroso), O₃ (ozônio) e vapor d'água (VEIGA, 2008), ou também denominados como “gases do efeito estufa” (GEE). A capacidade de absorção do calor pelos GEE's é atribuída ao fato de suas moléculas possuírem modos de vibração e rotação nas mesmas bandas de frequência que a radiação infravermelha. Provocam o esfriamento da estratosfera (topo) ao minimizar a quantidade de energia emitida pela superfície para o espaço. Consequentemente, como forma de manter o equilíbrio térmico, a temperatura da troposfera

(parte mais baixa da atmosfera) e da superfície do planeta aumenta, compensando a redução da emissão nas bandas de absorção.

Cada tipo de gás que compõe o grupo dos GEE apresenta uma característica particular. O CO₂, o CH₄ e o N₂O influenciam em longo prazo no clima por permanecerem dezenas de anos na atmosfera. A queima de combustíveis fósseis e mudanças do uso da terra (corte de florestas) foram os fatores que mais contribuíram para aumento na concentração de CO₂ em um século e meio (PACHECO; HELENE, 1990; SALATI, 1994). De concentração muito variável e dependente da temperatura, o vapor d'água é um poderoso GEE. O SO₂ e CO têm pouca influência no clima por serem removidos rapidamente do ar. O O₃ tem dupla funcionalidade, de maneira que ele age como influente no processo de aquecimento da Terra quando na troposfera; na estratosfera sua síntese consome radiação ultravioleta, minimizando a incidência deste sobre a superfície terrestre. Além destes, um grupo de gases sintéticos, os clorofluorcarbonos (CFCs) conferem uma forte influência no efeito estufa, mesmo anos depois de sua redução e proibição.

O aumento da concentração dos GEE na atmosfera pode ser indicativo da influência humana sobre este meio durante a era industrial (início no século XVIII). Em um estudo desenvolvido, Grupo Intergovernamental de Expertos sobre el Cambio Climático GIECC (2001) detectou que três gases do efeito estufa, em escala mundial, apresentaram comportamento semelhante (do tipo exponencial), a partir do ano de 1800 quando submetidos a uma análise temporal entre os anos 1000 a 2000. No ano 1000, segundo o autor, a taxa de CO₂ na atmosfera era de aproximadamente 280 ppm, alcançando cerca de 360 ppm no ano 2000. No mesmo período, o CH₄, de 750 ppm passou a 1750 ppm, e o N₂O de 270 ppm passou a 310 ppm em 2000.

2.1.2 Mudanças climáticas globais

O tema mudanças climáticas é atual e tem sido constantemente discutido pela comunidade científica ao longo destes últimos anos. As mudanças climáticas globais se referem à variação do clima em escala global ou dos climas regionais da Terra ao longo do tempo, e atualmente representam um dos maiores desafios para a humanidade. Estudos científicos aceitos pela sociedade embasam o conceito de mudança climática, e demonstram ser um processo inevitável, porém pode ser reduzido em parte caso algumas iniciativas sejam adotadas pelo setor público e privado, de modo que reduzam a emissão dos GEE (FUJIHARA; LOPES, 2009). Para os especialistas da área florestal, ainda se discute quais

ação seria mais eficiente quanto à minimização das mudanças climáticas. Há quem defenda, de forma prioritária, a ideia de interromper os desmatamentos em áreas tropicais em vez do reflorestamento. A redução do desmatamento poderá contribuir consideravelmente para a redução do ritmo de emissão dos GEE (cerca de 1,6 bilhões de toneladas de carbono por ano) (YU, 2004), além de possibilitar outros benefícios, como a conservação dos solos e da biodiversidade. Caso não ocorra um consenso e iniciativas de modo rápido e eficaz para que medidas sejam executadas, mudanças radicais estão previstas no panorama global, tanto ambiental e econômica, como social (GIECC, 2001).

De acordo com as conclusões do relatório do IPCC de 2001 (IPCC, 2001), alguns efeitos benéficos e maléficis são previstos em função das mudanças climáticas. Em síntese, as consequências benéficas seriam:

- i) Aumento da produtividade agrícola em algumas regiões de latitude média no caso de aumento de alguns graus na temperatura média;
- ii) Aumento da disponibilidade de água em algumas regiões carentes deste recurso, por exemplo, em partes do sudoeste da Ásia;
- iii) Diminuição da mortalidade, no inverno, em regiões de média e alta latitude;
- iv) Potencial aumento do suprimento global de madeira advindo de florestas manejadas.

Os malefícios em função da mudança do clima seriam:

- i) Diminuição da disponibilidade de água em regiões carentes deste recurso, em especial em terras áridas e semiáridas em regiões subtropicais;
- ii) Redução de produtividade agrícola: a) nos trópicos e subtropicais para quase qualquer aquecimento e b) nas latitudes médias para aquecimento maior que alguns poucos graus;
- iii) Mudança na produtividade e composição de sistemas ecológicos, com florestas e recifes de corais sendo os mais vulneráveis;
- iv) Aumento do risco de inundações, deslocamento/mudança de milhões de pessoas devido ao aumento do nível do mar e a eventos de chuvas fortes, especialmente em pequenos estados insulares e em deltas de rios de baixa altitude;
- v) Aumento, em especial nas regiões tropicais e subtropicais, da incidência da mortalidade por “estresse gerado pelo calor” e do número de pessoas expostas a doenças transmissíveis por vetores, como malária e dengue, e pela água, como cólera.

2.2 O ciclo do carbono e as florestas

O carbono é considerado um dos elementos mais abundantes no Universo, e pode ser encontrado tanto na sua forma orgânica, presente nos organismos vivos e mortos, não decompostos, bem como na forma inorgânica, presente nas rochas. O carbono no planeta Terra circula através dos oceanos, da atmosfera, da terra e dos organismos, se fazendo presente através de um grande ciclo biogeoquímico, que pode ser dividido em ciclo geológico e ciclo biológico.

As florestas estão presentes no ciclo biológico do carbono e desempenham papel importante para o equilíbrio do estoque de carbono global. Segundo relatório do IPCC (2000a) as plantas e os solos armazenam mais carbono do que o existente atualmente na atmosfera. As florestas estão ligadas ao ciclo de carbono global pela fotossíntese, respiração e decomposição. Segundo Martinelli e Camargo (1996), a forma pela qual as florestas estão intimamente ligadas ao ciclo do carbono pode ser vista pela equação abaixo:

$$\Delta\text{CO}_2 = \text{CF} + \text{UT} + \text{OC} \pm \text{FO} \quad (1)$$

onde,

ΔCO_2 = variação na concentração de CO_2 na atmosfera;

CF = quantidade de CO_2 lançado na atmosfera devido à queima de combustível fóssil;

UT = quantidade de CO_2 lançada na atmosfera devido às mudanças no uso da terra;

OC = quantidade de CO_2 "absorvida" pelo oceano e finalmente;

FO = balanço entre fotossíntese e respiração.

Para a equação apresentada, se o balanço for positivo, a respiração seria maior que a fotossíntese e CO_2 estaria sendo lançado na atmosfera. Por outro lado, em casos que a fotossíntese fosse maior que a respiração, o CO_2 estaria sendo retirado da atmosfera. Desta forma, os processos de fotossíntese, respiração, assim como decomposição e combustão são os principais meios de troca do carbono entre a atmosfera e entre os sistemas ecológicos terrestres (HOEN; SOLBERG, 1994). A emissão de CO_2 provocada pelo desmatamento na região dos trópicos corresponde cerca de 20% do total de emissões provocadas pelas ações antrópicas nestas regiões (IPCC, 2000b).

2.3 A importância das florestas na mitigação dos efeitos da concentração de carbono na atmosfera

As florestas exercem um papel importante na mitigação dos efeitos da concentração de carbono na atmosfera. Segundo IPCC (2000a), o CO₂, o principal gás causador do efeito estufa, circula entre os quatro principais estoques de carbono: a atmosfera, os oceanos, os depósitos de combustíveis fósseis e as plantas terrestres e o solo (Figura 1). O sistema planta é responsável pelo armazenamento de 500×10^9 MgC do total de carbono presente na natureza. No sistema solo, devido à decomposição da matéria prima vegetal, é onde se encontra a maior parte do carbono terrestre; estima-se que o valor estocado possa chegar a 2.000×10^9 MgC. A quantidade de carbono estocado no sistema solo e planta correspondem dois terços do carbono total estocado na superfície terrestre (YU, 2004).

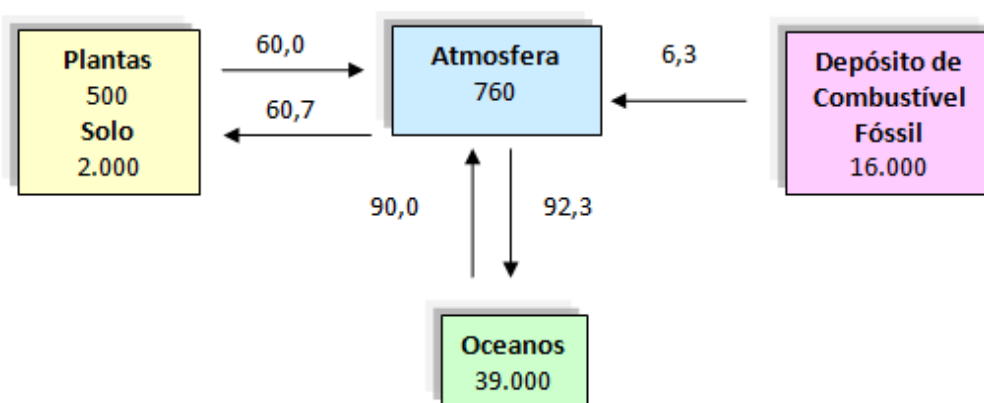


Figura 1 - O ciclo do carbono. Estoques (10⁹ MgC) e fluxos (10⁹ MgC.ano⁻¹). (Fonte: IPCC, 2000a)

O carbono pode ser estocado de diferentes formas, como já visto na Figura 1. Os sistemas planta e solo apresentam a maior capacidade terrestre de estocagem do carbono, sendo este fixado pelas plantas através do processo de fotossíntese e no solo após processo de decomposição, retornando à atmosfera pela respiração, decomposição, erosão e combustão (PACHECO; HELENE, 1990; YU, 2004).

As florestas são importantes para o equilíbrio do ciclo global do carbono, pois apresentam a capacidade tanto de fixação como de emissão desse gás. A fixação corresponde ao incremento de biomassa em árvores vivas decorrente do processo de fotossíntese e a emissão representa a liberação de carbono por respiração e decomposição da biomassa recorrente da morte natural de indivíduos vegetais ou a combustão deste material (PACHECO; HELENE, 1990; YU, 2004). Quando está ocorrendo à absorção de carbono em

um ponto de estoque, este é chamado de “dreno ou sumidouro” (*sink*), e do contrário, quando um estoque está liberando carbono este é denominado como “fonte” (*source*). Desta forma, as áreas florestais são classificadas como “drenos” de carbono (*carbon sinks*), pois captam o carbono atmosférico (TOTTEN, 2000). Entretanto, quando as florestas são derrubadas e queimadas, nestas áreas há emissão de CO₂ e essas passam de “dreno” para “fonte”.

Em escala global, as florestas poderiam captar cerca de 12 a 15% do que é emitido de carbono por combustíveis fósseis, nos próximos 50 anos (BROWN et al., 2001). Esta hipótese seria válida caso fosse estabelecida em 700 milhões de hectares de florestas no mundo novas práticas florestais. A região dos trópicos responderia pelo maior potencial de captação do carbono, aproximadamente 80%, por meio de reflorestamentos e florestamentos (16,4 GtC), sistemas agroflorestais (6,3 GtC), regeneração florestal (cerca de 20 GtC) e ações que impeçam o desmatamento (16 GtC).

Previstos no Protocolo de Kyoto (PK) (1997), projetos de estabelecimento de sistemas agroflorestais, assim como de reflorestamento, florestamento e substituição de combustíveis fósseis) são uma boa alternativa de incentivo para pequenos produtores, quando há uma pretensão de obter as chamadas cartas de crédito de carbono. Estas cartas podem ser vendidas para países desenvolvidos, quando devidamente avaliada e comprovada a redução da emissão de carbono e/ou o sequestro deste (MATHEUS et al., 2012; RESENDE et al., 2001)

2.4 Panorama geral do setor florestal brasileiro de florestas plantadas

Nos últimos 100 anos, a demanda por matéria prima e produtos de origem florestal tem aumentado continuamente, por causa do crescimento populacional e da elevação de renda da população, promovendo, portanto o aumento das atividades industriais. As florestas nativas, primeiros alvos destinados a suprir a demanda de produtos florestais e seus derivados, foram intensamente exploradas, e em algumas regiões de asiáticas, as florestas nativas estão seriamente degradadas e correm o risco de desaparecerem (SANTOS, 2010).

As florestas plantadas com espécies exóticas surgiram no Brasil há mais de um século, e em meados da década de 70, com as políticas de incentivos fiscais para o reflorestamento, os povoamentos equiâneos de *Eucalyptus* e *Pinus* se tornaram uma alternativa viável para o suprimento da demanda por matéria prima e derivados florestais, pois concomitantemente auxiliavam na redução da pressão do desmatamento provocado em florestas nativas remanescentes.

Atualmente, o setor de florestas plantadas no Brasil é considerado um dos mais competitivos a nível mundial. Observa-se nos últimos anos um crescente reconhecimento da sociedade por sua contribuição ao desenvolvimento econômico, social e ambiental do país. Além de abastecer diversos segmentos industriais da cadeia produtiva da madeira, industrialização e comercialização, tais como celulose e papel, as florestas plantadas também contribuem na geração de bens e serviços, agregação de valor aos produtos florestais, para a geração de empregos, tributos, rendas e promoção do desenvolvimento sustentável.

As florestas plantadas no Brasil, segundo ABRAF (2012), ocupam uma área total de 6.515.844 ha, e sua distribuição abrange as regiões sudeste, sul e nordeste do país, com propensão de expansão para outras regiões do país (Tabela 1). Os plantios de *Eucalyptus spp.* ocupam 74,8% da área total do país e caracterizam-se como as florestas plantadas com maior destaque no cenário atual (ABRAF, 2012).

As espécies do gênero *Eucalyptus* apresentam grande poder de adaptação ao meio, crescimento rápido, potencial de usos múltiplos e versatilidade quanto ao uso e região, facilitando desta forma o seu cultivo e a expansão florestal. O último anuário da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF), no ano de 2012, indica uma tendência de redução das áreas com plantios de *Pinus*, sendo substituídas por áreas com plantios de *Eucalyptus* (ABRAF, 2012).

Tabela 1 - Área de distribuição de plantios florestais com *Eucalyptus* nos estados do Brasil, 2011. (Fonte: ABRAF, 2012)

UF	Área de <i>Eucalyptus</i> (ha)
Minas Gerais (MG)	1.401,787
São Paulo (SP)	1.031,677
Paraná (PR)	188,153
Bahia (BA)	607,440
Santa Catarina (SC)	104,686
Rio Grande do Sul (RS)	280,198
Mato Grosso do Sul (MS)	475,528
Espírito Santo (ES)	197,512
Pará (PA)	151,378
Maranhão (MA)	165,717
Goiás (GO)	59,624
Amapá (AP)	50,099
Mato Grosso (MT)	58,843
Tocantins (TO)	65,502
Piauí (PI)	26,502
Outros	9,314
Total	4.873,90

O Brasil atualmente detém as melhores tecnologias na silvicultura do eucalipto. Segundo ABRAF (2012), as estatísticas indicaram um incremento médio anual (IMA) de 36,7 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ para o ano de 2005, e um IMA de 40,1 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ para o ano de 2011. Esses valores comparativamente são altos em relação a outros países (Figura 2).

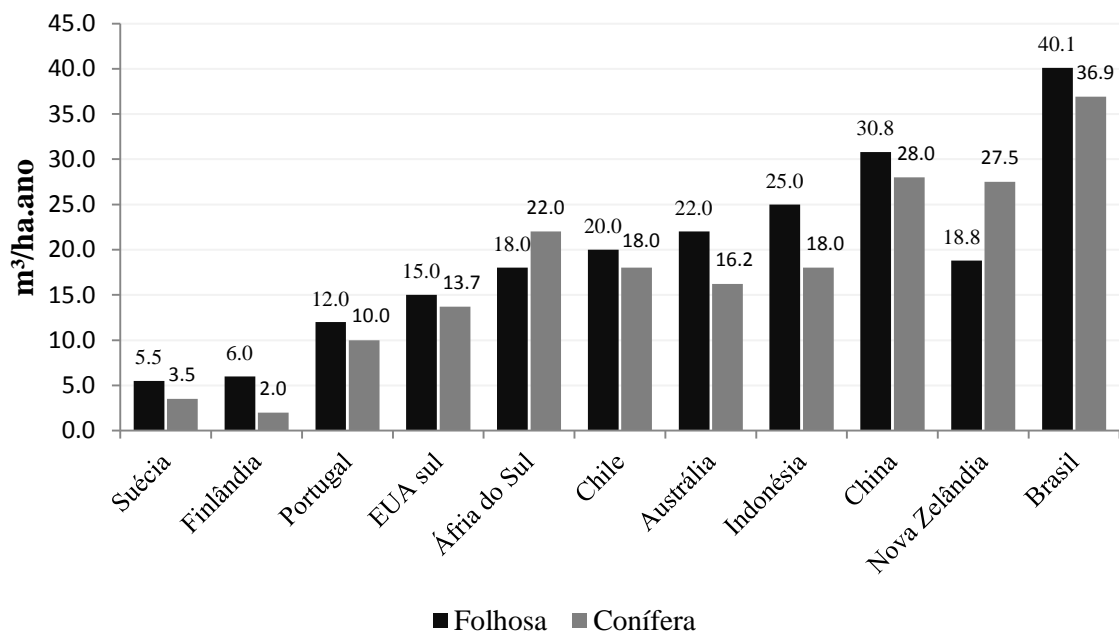


Figura 2 - Comparação da produtividade florestal de coníferas e de folhosas no Brasil e em países selecionados, 2011. (Fonte: ABRAF, 2012)

Na siderúrgica, os produtores de ferro gusa no país utilizam, de modo geral, o carvão vegetal proveniente de plantios de *Eucalyptus* (produto renovável e de baixo grau de poluição). No exterior, para este setor, a matéria prima utilizada é o coque, que é um produto de origem não renovável, de baixo custo e de capacidade poluidora alta. O uso da madeira de plantios florestais no Brasil vem crescendo nos últimos anos, cerca de 65% em 2011, e o uso do carvão vegetal também, por ser menos prejudiciais ao meio ambiente, promovendo o aumento da demanda por matéria prima de origem florestal e incentivando a ampliação de áreas plantadas. Esta ampliação é positiva para a preservação de florestas nativas e para o aumento da fixação de carbono atmosférico (ABRAF, 2012).

As espécies do gênero *Eucalyptus* são bastante eficientes no processo de sequestro de carbono por possuir uma elevada eficiência fotossintética (STAPE et al., 2008). Considerando um incremento médio anual, para as espécies *E. paniculata* e *E. grandis*, de 40 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, Resende et al. (2001) estimam um potencial de captura de carbono pela parte

aérea de $13,6 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ e $8,4 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, respectivamente; e atribuem esta diferença à densidade básica da madeira ($0,74 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ e $0,46 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

2.5 Quantificação do estoque de carbono em florestas plantadas

A quantificação do estoque de carbono em florestas tem sido constantemente estudada através da biomassa aérea florestal (SANQUETTA et al., 2002). As estimativas de carbono e biomassa podem ser obtidas através de métodos diretos ou indiretos. O método direto, no qual é realizado o abate de árvores, é mais acurado e eficaz, porém é um processo trabalhoso e caro. O método indireto baseia-se principalmente nas aplicações de modelos de regressão previamente estabelecidos pelo método direto, utilizando variáveis do inventário, tais como diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total das árvores (Ht). O método indireto é caracterizada pela sua agilidade e rapidez, visto a não necessidade de uma análise destrutiva das árvores e utiliza variáveis de fácil obtenção em campo. Para o métodos indireto, observa-se nos últimos anos um avanço crescente do uso do sensoriamento remoto por meio do processamento digital de imagens de satélite e dados LiDAR, como uma alternativa versátil e eficiente para os estudos da quantificação da biomassa e do estoque de carbono florestal, como visto em trabalhos publicados por Hudak et al. (2006, 2009, 2012)

2.5.1 Métodos diretos

Os métodos diretos são caracterizados pela sua precisão nas estimativas da biomassa e do estoque de carbono florestal (WATZLAWICK et al., 2003). Estes consistem basicamente na derrubada, segmentação e pesagem dos componentes das árvores representativas da floresta, ou do talhão para obtenção da biomassa total e por componente. Quando se objetiva a quantificação em todos os componentes de uma árvore, é realizada também a retirada das raízes, o que torna o processo mais trabalhoso. Neste método, é possível também coletar amostras no tronco de árvores, como as utilizadas para análise de anéis de crescimento, e assim evitar o abate de árvores em florestas nativas (KOEHLER, 2009).

Em seguida, após a análise destrutiva e pesagem da biomassa úmida, são coletadas amostras representativas da árvore, que serão encaminhadas ao laboratório para obtenção do teor de umidade e do teor de carbono. A biomassa seca total e por componente é, então, calculada multiplicando o teor de umidade obtido nas amostras pela biomassa úmida medida

em campo. O estoque de carbono por fim é calculado multiplicando-se a biomassa seca pelo teor de carbono determinado em laboratório, ou pela multiplicação desta por um percentual de carbono já estabelecido em alguns estudos, que visam à quantificação do carbono para diferentes formas de vegetação, tipologia florestal ou espécie. Os valores médios do percentual de carbono contido na biomassa florestal encontrado em diversos trabalhos giram em torno de 50 % (HIGUCHI; CARVALHO Jr., 1994; PAIXÃO et al., 2006; SOARES; OLIVEIRA, 2002).

2.5.2 Métodos indiretos

Em áreas florestais de grande extensão, os métodos indiretos, para estimação de biomassa e do carbono, são muito utilizados. Uma das formas consiste no uso de dados de inventário florestal e na elaboração de equações e modelos (relações empíricas) que correlacionem o fator biomassa com variáveis de fácil obtenção (DAP, altura, volume) e um fator de correção para o carbono. Empregar equações alométricas é uma forma de reduzir custos de quantificação da biomassa florestal e não ocasionar alteração de áreas amostrais.

Estimativas do carbono fornecem valores consistentemente mais baixos quando comparado com a amostragem do tipo destrutiva, porque os valores não são influenciados pela escolha do local de estudo, e há ausência de representatividade (BROWN; LUGO, 1984). Como há um grande número de variáveis envolvidas, as equações devem ser elaboradas para sítios específicos, evitando sub ou superestimação do valor total de biomassa e carbono acumulado.

O sensoriamento remoto tem se tornado nos últimos anos uma técnica versátil e bastante aplicada nos estudos de quantificação de parâmetros biofísicos como biomassa, carbono e volume florestal (SILVEIRA et al., 2008; NÆSSET; GOBAKKEN, 2008; NÆSSET, 2007; MALTAMO et al., 2006, 2012). Isso se dá pelo fato de ser um método indireto, não destrutivo e que faz uso de atributos espectrais da vegetação (folhas, tronco e outros) (JENSEI, 2009; LIU, 2006; POZONI; SHIMABUKO, 2009). O uso do processamento de imagens multiespectrais e também do perfilhamento aerotransportado a laser LiDAR (*Light Detection and Ranging*) vem se destacando como ferramenta importante do sensoriamento remoto para as estimativas do índice de área foliar, volume, área basal, biomassa sobre o solo, carbono e da estrutura do dossel florestal (HUDAK et al., 2009; JENSEN 2009; PIRES, 2005).

Algumas desvantagens dos métodos indiretos são apontadas por Silveira et al. (2008), ao se fazer uso da metodologia indireta de estimaco de biomassa e carbono, tais como: tendência na escolha dos sítios amostrais, erro humano na coleta dos dados, favoritismo na escolha de espécimes, impedimento de medio de todas as árvores em campo e de variáveis essenciais que incorporam o modelo ou equaco, não mensurao de todas as formas de vida vegetal ou partes das plantas de difícil acesso (raízes). Também, equaces e modelos elaborados muitas vezes são específicos para um sítio, espécie, local, idade das árvores, estratificaco florestal, entre outros.

2.6 Referencial teórico da tecnologia LiDAR

O LiDAR, sigla utilizada para *Light Detection and Ranging*, que significa, Deteco de Luz e Distância, é um termo que tem sido utilizado para designar esta nova tecnologia de sensoriamento remoto (GIONGO et al., 2010). O mapeamento por meio do LiDAR é um método caracterizado pela gerao precisa e direta de informaes sobre a forma e características de objetos espacialmente georreferenciados sobre a superfície da terra. Os recentes avanos promovido pela tecnologia LiDAR permitem que hoje os cientistas examinem ambientes naturais em grande escala territorial com alta acurácia, precisão, e flexibilidade quando comparada aos métodos convencionais de inventário e de sensoriamento remoto utilizados anteriormente.

Nos tpicos seguintes, apresentam-se temas relacionados ao LiDAR, com o intuito de compreender a tecnologia em si, os princípios de funcionamento de um sistema LiDAR, os principais produtos obtidos pelo processamento de dados LiDAR, e suas aplicaes nas áreas florestais.

2.6.1 O que é o LiDAR

O LiDAR, também conhecido por Sistema de Varredura, Rastreamento ou Perfilhamento a Laser (do inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que significa “amplificao de luz por emissão estimulada de radiao”),  uma tecnologia óptica e ativa de sensoriamento remoto, que combina as medies de luz de laser e de posicionamento para realizar levantamentos e mapeamentos com alta acurácia de objetos presentes em uma dada superfície em estudo e criar uma nuvem de pontos tridimensional (3D) referente aos objetos imageados (NOAA, 2012).

Os dados LiDAR são normalmente distribuídos no formato LAS, estabelecido pela Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS), que é um formato de arquivo público para o intercâmbio de dados LiDAR entre usuários. O LAS é um arquivo binário que mantém a informação específica dos dados LiDAR. Detalhes e especificações sobre o formato LAS podem ser encontrados no portal da Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS - American Society for Photogrammetry and Remote Sensing¹).

2.6.2 Os princípios de funcionamento do LiDAR

O princípio de funcionamento do LiDAR consiste na emissão de um pulso laser à velocidade da luz, c ($3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$), de uma plataforma, e com uma elevada frequência de repetição (GIONGO et al., 2010). Os sistemas LiDAR podem atualmente emitir pulsos a taxas superiores a 100.000 pulsos por segundo (JENSEN, 2009). O tempo de percurso dos pulsos laser entre a plataforma e os alvos são medidos pelo sensor, permitindo a estimativa destas distâncias (R), e posteriormente a representação dos alvos interceptados pelo laser em três dimensões em uma nuvem de pontos LiDAR (BALTSAVIAS, 1999; NOAA, 2012). O tempo de percurso de um pulso de laser, t , é calculado pela seguinte equação (BOLAND et al., 2004):

$$t = 2 \frac{R}{c} \quad (02)$$

Onde:

t = tempo de percurso de um pulso laser;
 R = distância entre o sensor LiDAR e o alvo;
 C = velocidade da luz ($3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$).

Desta maneira, a distância entre o sensor LiDAR e o alvo pode ser rearranjada através da seguinte equação (BALTSAVIAS, 1999):

$$R = \frac{1}{2} tc \quad (03)$$

¹ <http://www.asprs.org/>

Onde:

- t = tempo de percurso de um pulso laser;
- R = distância entre o sensor LiDAR e o alvo;
- C = velocidade da luz ($3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$).

Para estudo da vegetação, o sistema LiDAR opera usualmente no comprimento de onda do infravermelho próximo, na região entre 1040 nm a 164 nm (BOLAND et al., 2004). As principais razões para isso são:

- (i) A radiação emitida pelo sensor é fortemente absorvida pelas folhas verdes na região do infravermelho próximo, assegurando portanto um sinal relativamente forte sobre a vegetação;
- (ii) A transmitância atmosférica é elevada a estes comprimentos de onda, garantindo uma perda mínima de sinal pelo espalhamento e absorção por qualquer ruído atmosférico.

Os sistemas LiDAR podem se dividir quanto a plataforma de levantamento. As principais plataformas em sistemas LiDAR são aérea, terrestre e orbital. Atualmente a plataforma mais comum para estudo da vegetação com LiDAR é a plataforma aérea.

O sistema LiDAR aerotransportado (*Airborne LASER Scanning - ALS*), assim denominado e empregado neste trabalho, segundo McGaughey (2013), consiste em um conjunto de quatro instrumentos:

- (i) A unidade de emissão e recebimento laser acoplada à aeronave;
- (ii) As unidades de posicionamento global (GPS) no avião e no chão;
- (iii) Um sensor inercial (IMU) acoplado à unidade laser para medir roll, pitch e yaw (guinada, arfada e rolamento);
- (iv) E, um computador para controlar o sistema e armazenar os dados (Figura 3).

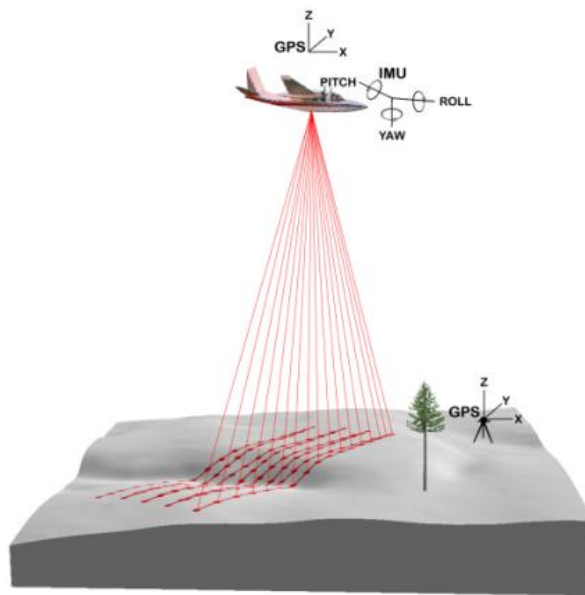


Figura 3 - Componentes do sistema LiDAR aerotransportado. Fonte: McGaughey(2013)

Segundo McGaughey (2013) e Rodriguez et al. (2010), no sistema ALS as unidades GPS e IMU determinam a precisa localização e altitude da unidade laser no momento da emissão, obtendo a exata coordenada para cada ponto. A unidade laser usa um espelho ou prisma oscilante (dependendo do modelo, mais detalhes em Giongo et al., 2010) para que o feixe de pulsos forme um leque e varra uma determinada faixa sob a aeronave, bastando uma série de sobrevoos em linhas paralelas para que áreas mais largas que essa faixa sejam integralmente cobertas.

A largura da faixa de cobertura perpendicular à trajetória (*sw*, *swath width*) segundo Jensen (2009) é dada por:

$$sw = 2htan\frac{\theta}{2} \quad (04)$$

onde:

- sw* = largura da faixa de cobertura perpendicular à trajetória;
- θ = ângulo de varredura corresponde ao tempo de percurso de um pulso laser;
- H = altitude do sensor a bordo da aeronave.

A área de cobertura de um pulso laser no terreno é aproximadamente circular, e varia com o ângulo de varredura e o relevo (BALTSAVIAS, 1999). O diâmetro da visada laser (Fp_{inst}) no terreno é denominado de *footprint*. O *footprint* é classificado em *small footprint*, quando o diâmetro da visada laser é inferior a 1 metro, e *large footprint* quando superior a 1 metro. O diâmetro da visada laser é calculado por:

$$Fp_{inst} = \frac{h}{\cos^2(\theta_{inst})} \gamma \quad (05)$$

Onde:

Fp_{inst} = diâmetro da visada laser no terreno;

θ = ângulo de varredura corresponde ao tempo de percurso de um pulso laser;

h = altitude do sensor a bordo da aeronave;

γ = divergência do feixe laser.

Em estudos de vegetação com aplicação do LiDAR, existem duas categorias de sistema ALS quanto ao registro do sinal de retorno do pulso laser emitido pelo sensor. O primeiro e mais utilizado é o conhecido por retornos discretos, também denominado sistema de pulsos (do inglês *discrete return* LiDAR, ou *discrete echo*), e o segundo por ondas contínuas, também chamado de retornos contínuos (do inglês *full-waveform*) (Figura 4).

Os sistemas LiDAR de retornos discretos têm a capacidade de registrar apenas os picos gerados pelo laser quando este intercepta um objeto, armazenando, desta forma, os primeiros, intermediários e últimos retornos (COURSE, 2013; HUDAK et al., 2009). Por outro lado, os sistemas LiDAR de retornos contínuos apresentam a capacidade de registrar integralmente todo o sinal do pulso laser refletido (COURSE, 2013; HUDAK et al., 2009).

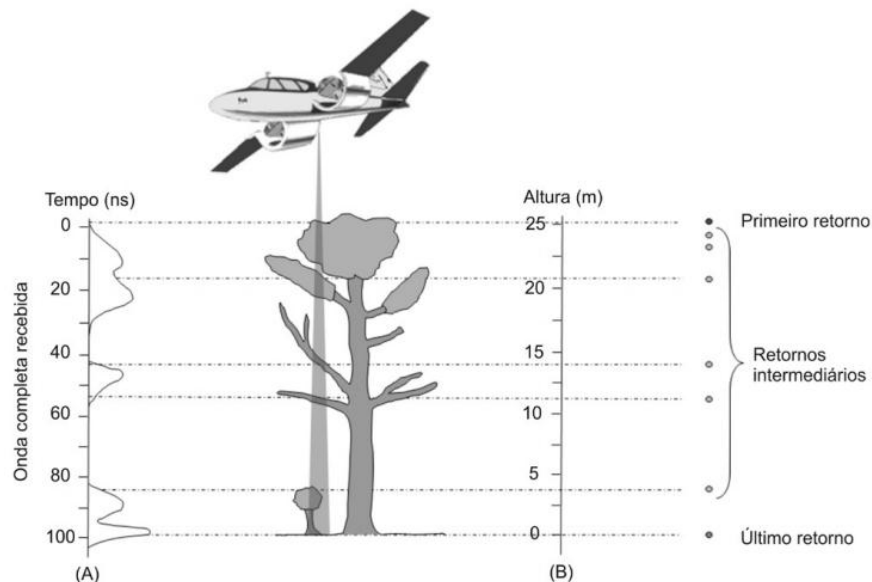


Figura 4 - Característica dos diferentes sistemas ALS, (A) sistema de ondas contínuas (full-waveform) e (B) sistema de pulsos (discrete echo). Fonte: Giongo et al. (2010)

O sistema LiDAR mais comumente empregado na área florestal, é o do tipo *discrete-return small-footprint*, que caracteriza um sistema de retornos discretos com diâmetro de visada ao alvo inferior a 1 metro (MCGAUGHEY, 2013).

Segundo Rodriguez (2010), para o sistema de retornos discretos, um mesmo pulso laser, ao ser emitido em direção ao alvo em estudo, pode encontrar as seguintes situações:

- (i) Ser integralmente interceptado e refletido por uma única superfície no dossel, produzindo um único retorno,
- (ii) Ser parcialmente interceptado a diferentes alturas antes de atingir o solo, produzindo um primeiro retorno e vários retornos intermediários;
- (iii) Ser interceptado a diferentes alturas, produzindo retornos intermediários e um último retorno no nível do solo;
- (iv) E, atravessar o dossel e ser integralmente refletido no solo, produzindo um único retorno.

Assim, cada pulso laser transmitido da aeronave pode resultar em múltiplos retornos (Figura 5). São os denominados “múltiplos retornos de LiDAR”. O pós-processamento dos dados originais irá resultar em diversos arquivos de LiDAR, que se referem a primeiros retornos, possíveis retornos intermediários, últimos retornos e intensidade (JENSEN, 2009).

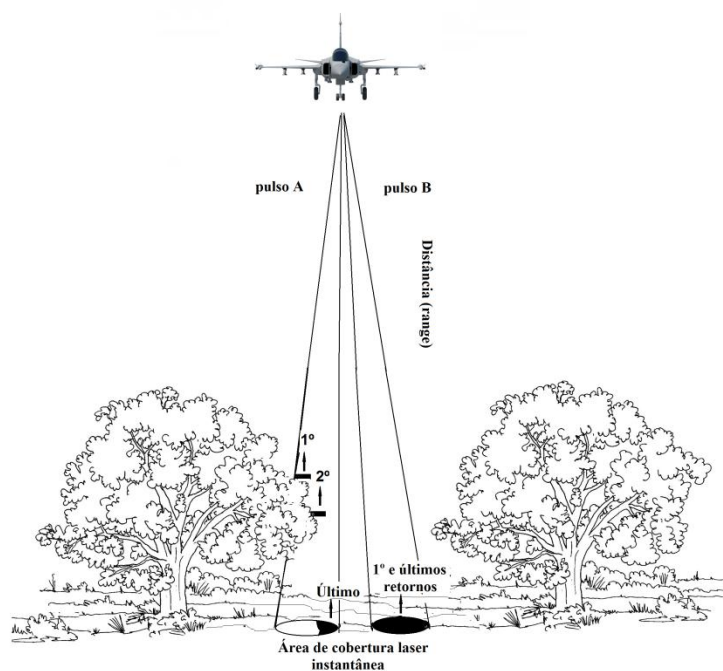


Figura 5 – Ilustração da emissão de pulsos laser “sistema de retornos discretos” e sinais de retornos. Fonte: Adaptado de JENSEN (2009)

2.6.3 Principais produtos obtidos pelo LiDAR

Os principais produtos obtidos pelo processamento da nuvem de pontos LiDAR podem ser, basicamente, enquadrados em modelos digitais de elevação, intensidade LiDAR e métricas LiDAR.

i) Modelos digitais de elevação (*digital elevation model* - DEM).

O DEM é definido como "qualquer representação digital da variação contínua do relevo sobre o espaço" (BURROUGH; MCDONNELL, 1986). De acordo Weibel e Heller, (1991) o DEM é definido como uma matriz de grade regular com valores de elevação na qual representa a forma da superfície. Segundo Jensen (2009) os DEMs podem ser subdivididos em:

- a. Modelos digitais de superfície (*digital surface models* – DSM), que contêm informações de elevação de todas as feições na paisagem, como a vegetação, edifícios e outras estruturas;
- b. Modelos digitais do terreno (*digital terrain models* – DTM), que contêm informações de elevação da superfície desnuda da Terra, sem influência da vegetação ou das estruturas feitas pelo homem.

Podemos considerar também como parte dos DEM os modelos digitais em altura das copas (*Canopy Height Models* – CHM). Ele é semelhante ao DSM, porém os valores em coordenada Z não estão representando a elevação, e sim a altura dos objetos presentes em uma nuvem de pontos LiDAR. É na verdade um DSM normalizado, também conhecido por modelos digitais de superfície normalizados (*normalized Digital Surface Models* – nDSM). Este produto é muito importante para os estudos da vegetação, onde se busca informações referentes à altura, bem como a detecção de árvores individuais distribuídas na floresta (HUDAK et al., 2009). Os DEMs podem ser visualizados nas Figuras 6 e 7.

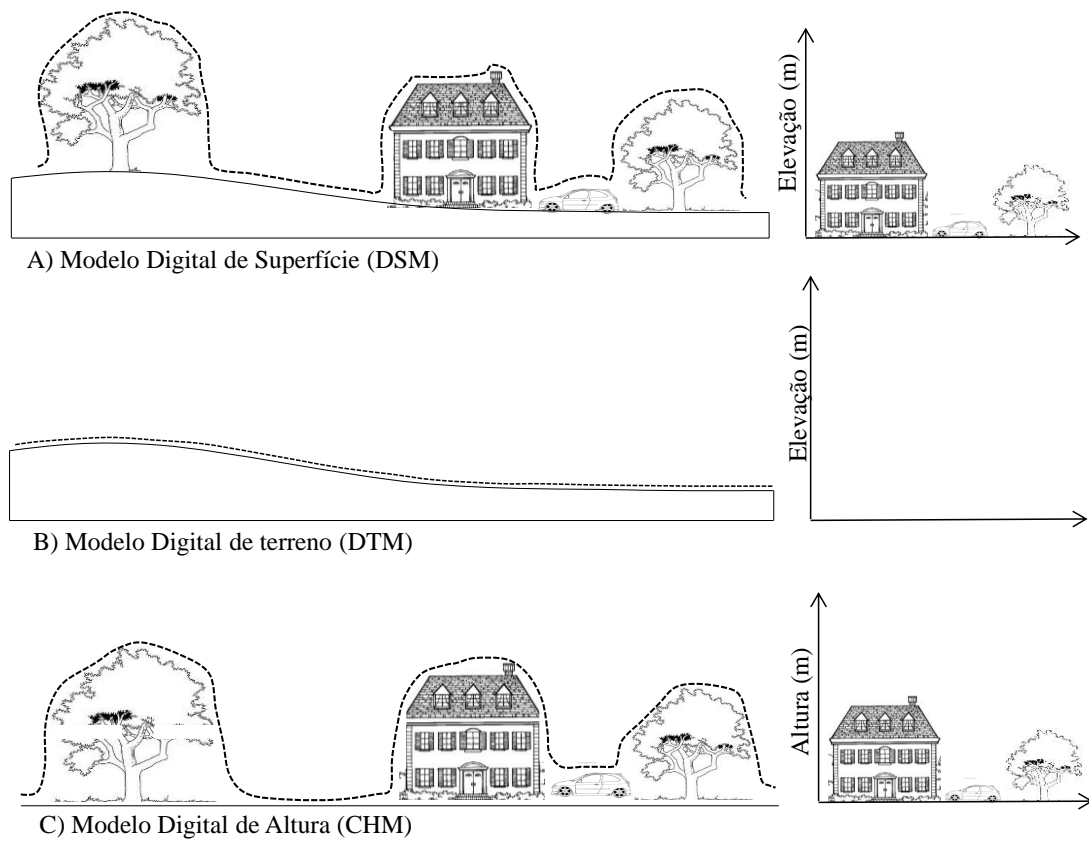


Figura 6 – Representação de diferentes modelos digitais de elevação (DEMs). A saber, modelo digital de superfície (DSM) a), modelo digital de terreno (DTM) b) e o modelo digital de altura copa (CHM) c). Fonte: Adaptado de Giongo (2010)

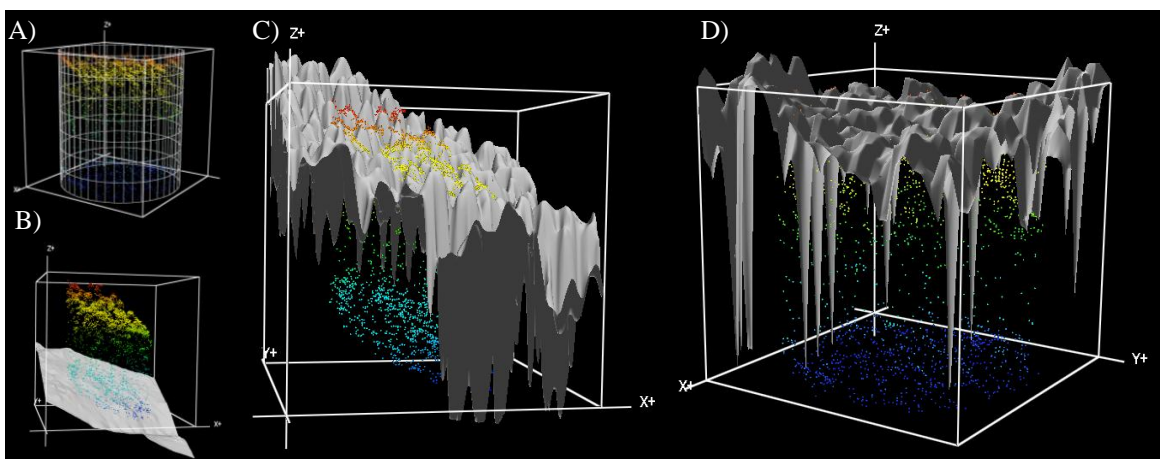


Figura 7 - Ilustração da nuvem de pontos LiDAR e dos MDEs. A) nuvem de pontos na parcela, B) DTM, C) DSM e D) CHM. Fonte: Elaborado pelo autor

ii) Intensidade LiDAR

O sistema LiDAR opera usualmente no comprimento de onda do infravermelho próximo, na região entre 1040 a 164 nm para o estudo da vegetação (BOLAND et al., 2004). Em adição aos valores em X, Y e Z, os sistema LiDAR é capaz de registrar a intensidade do sinal de retorno que é mensurado pela quantidade de energia refletida pelo alvo e captada pelo sensor (JENSEN, 2009). A intensidade de energia registrada no sistema LiDAR é influenciada por diversos fatores, sendo estes o sensor laser, o ângulo de incidência, a área e reflectância do alvo, a absorção atmosférica e a distância (sensor de distância alvo) (COREN; STERZAI, 2006).

Como a intensidade LiDAR, em teoria, é determinada pela reflectância de um objeto imageado, esta pode ser empregada para a identificação de classes de cobertura do solo, quando os dados são cuidadosamente calibrados (DONOGHUE et al., 2007). Segundo Gonçalves e Seco (2007), a intensidade LiDAR apresenta ruído e possivelmente têm pouca separabilidade se o comprimento de onda do laser não for apropriado para os materiais visados. Segundo os autores, o ângulo de reflexão é a principal fonte de ruído da intensidade, visto que alguns materiais apresentam intensidades diferentes em ângulos de reflexão diferentes. Para que a intensidade represente apenas a reflectância e não seja afetada por seu ângulo, alguns autores propõem que os dados de intensidade devem ser normalizados pelo ângulo de reflexão. Neste estudo, como não dispúnhamos de informações para efetuar a normalização dos valores de intensidade, optamos por trabalhar com os dados brutos de intensidade.

Os dados de intensidade podem ser fornecidos quando analisados a nuvem de pontos, ou podem ser exportados para um arquivo de imagem (“tiff” ou “jpg”) que podem então ser utilizados como um pano de fundo para outras camadas em GIS (NEWKIRK, 2005).

iii) Estatísticas referente à nuvem de pontos LiDAR

Os parâmetros estatísticos que descrevem um conjuntos de dados LiDAR para estudo da vegetação são denominados de métricas da nuvem de pontos LiDAR. Essas são calculadas com base em nuvem de pontos originais, onde a coordenada Z reflete os valores em elevação, ou em nuvem de pontos normalizadas, na qual a coordenada Z reflete valores em altura (modelo digital de terreno apresenta $Z=0$). Os principais parâmetros estatísticos extraídos do processamento da nuvem de pontos LiDAR consistem em estatísticas referentes

à altura e intensidade dos objetos presentes na nuvem de pontos, tais como altura e/ou intensidade máxima, mínima, desvio padrão, variância, coeficiente de variação e percentis. Essas estatísticas, denominadas de métricas LiDAR, são constantemente empregadas para construções de modelos preditivos de parâmetros florestais, tais como a biomassa e carbono florestal.

McGaughey (2013) resume na Tabela 2 as principais estatísticas e/ou métricas obtidas pela nuvem de pontos LiDAR, utilizando a ferramenta *cloudmetrics* do aplicativo FUSION/LDV.

Tabela 2 - Estatísticas referente à nuvem de pontos LiDAR (MCGAUGHEY, 2013)

Categoria	Variáveis
Retornos	Descrição do número total de retornos Número de retorno por classe de retorno
Altura e Intensidade	Mínima Máxima Média Mediana Moda Desvio Padrão Variância Coeficiente de variação Distância interquartil Assimetria Curtose AAD (desvio médio absoluto) L-momentos (L1, L2, L3, L4) L-momento de assimetria L-momento de curtose Percentis (1°, 5°, 10°, 20°, 25°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 75°, 80°, 90°, 95°, 99°)
Proporção	Porcentagem de primeiro retorno acima de uma altura “x” m Porcentagem de primeiro e/ou todos os retornos acima da altura média Porcentagem de primeiro e/ou todos os retornos acima da moda de altura Porcentagem de todos os retornos acima de uma altura “x” m Número de retornos acima de uma altura “x” m / total de primeiro retorno*100 Número de retornos acima da média/ total de primeiro retorno*100 Número de retornos acima da altura/ total de primeiro retorno*100

2.6.4 Principais aplicações da tecnologia LiDAR na área florestal

A capacidade da tecnologia LiDAR de obter retornos, tanto da vegetação como da superfície do terreno, permite a sua aplicação na medição de atributos da vegetação. Esta característica é o que garante o grande potencial dessa tecnologia para a obtenção de medidas diretas e estimativas de variáveis biométricas da floresta (JENSEN, 2008; NILSSON, 1996).

Segundo Giongo et al. (2010) as medições diretas obtidas dos dados LiDAR podem ser entendidas como as alturas das árvores que ocupam o dossel florestal. Além desta, outras características estruturais importantes da floresta, como a biomassa e estoque de carbono da parte aérea, área basal, DAP, volume e densidade de indivíduos, podem ser obtidas por técnicas de modelagem e/ou estimadas a partir de medições diretas (Tabela 3) (DUBAYAH; DRAKE, 2000).

Tabela 3 - Uso e potencialidade da tecnologia LiDAR em aplicações florestais

Parâmetros Florestais	Forma de obtenção de dados ALS	Exemplo de aplicações na Literatura
Altura do dossel	Medida direta	Naesset (1997)
Volume de copa	Medida direta	Coops et al. (2007)
Diâmetro de copa	Medida direta	Roberts et al. (2005)
Número de indivíduos	Medida direta	Hirata et al. (2009)
Volume	Modelagem	Ioki et al. (2010)
Biomassa	Modelagem	Poh et al. (2010)
Carbono	Modelagem	Hudak et al. (2012)
Área basal	Modelagem	Hudak et al. (2006)
Material combustível aéreo	Modelagem	Andersen et al. (2005)
Identificação de espécies	Fusão com outros sensores	Kim (2007)

Fonte: Adaptado de Giongo et al. (2010)

Os trabalhos aplicando a tecnologia LiDAR em áreas florestais se dividem basicamente em trabalhos que buscam estimativas em escala de talhão e trabalhos mais específicos, que buscam as estimativas em escala de árvores individuais. Nesta revisão bibliográfica, discutiremos apenas os trabalhos que aplicam a tecnologia LiDAR para estudos em escala de povoamento e talhão.

A aplicação da tecnologia LiDAR para estimativas de parâmetros biométricos da floresta em escala de talhão tem se mostrado eficiente quando comparada com os métodos convencionais de inventário (HUDAK et al., 2009; NÆSSET, 2002, 2004a, 2004b; RODRIGUEZ et al., 2010). Entre os principais parâmetros biométricos florestais estudados com a aplicabilidade de dados LiDAR incluem-se biomassa e estoque de carbono acima do

solo, área basal, altura, volume, densidade de indivíduos e índices de área foliar (LAI) (GIONGO et al., 2010; HUDAK et al., 2009; RODRIGUEZ et al., 2010). Os iniciais trabalhos que demonstram o grande potencial dessa tecnologia para este fim foram desenvolvidos na Escandinávia e na América do Norte (RODRIGUEZ et al., 2010), hoje com grande possibilidade de expansão em outros países, como o Brasil.

Os primeiros trabalhos utilizando a tecnologia LiDAR para estimativas de parâmetros dendrométricos em escala de talhão, foram realizados por Naesset (1997) e Nilsson (1996). Nilsson (1996) testou diferentes diâmetros de pulso laser, variando de 0,75 a 3,0 para a estimativa do volume e altura média de um talhão de *Pinus sylvestris* com a mesma classe de idade, na Suécia. Os resultados demonstram que as estimativas obtidas pela tecnologia LiDAR subestimaram os valores em altura média do talhão (2,1 a 3,7 m). Por outro lado, os valores em volume, os quais foram estimados por meio de equações empíricas com as alturas obtidas do processamento da nuvem de pontos LiDAR, apresentaram valores satisfatórios e R^2 de 0,78. Naesset (1997), com um objetivo semelhante, aplicou a tecnologia LiDAR para a estimativa da altura das árvores em duas áreas florestais no sudeste da Noruega. Para tal, foram realizadas mensurações em campo para determinar a altura de todos os indivíduos presentes na área, e foram calculadas a média geral e a média das árvores mais altas. Os resultados, semelhantes aos encontrados por Nilsson (1996) demonstram novamente que as alturas obtidas via LiDAR apresentam subestimativas em relação às médias realizadas em campo.

Naesset (2002) usou a tecnologia LiDAR, empregada em uma metodologia denominada de dois estágios, para estimativas do volume, altura média e dominante, densidade de indivíduos, diâmetro médio e área basal em uma área florestal da Noruega. O primeiro estágio consistiu-se na realização dos modelos preditivos das biométricas florestais com os dados LiDAR baseado apenas em parte da área total estudada. As principais métricas extraídas da nuvem de pontos LiDAR que foram utilizadas para construção desses modelos pertenceram à classe em altura e densidade (proporção). Os modelos previamente construídos apresentaram bons resultados, e as métricas LiDAR apresentaram um poder explicativo da ordem de 80 a 97% para a altura média, 74 a 93% para a altura dominante, 39 a 78% para o diâmetro médio, 50 a 68% para o número de árvores, 69 a 89% para a área basal e 80 a 93% para o volume. O segundo estágio consistiu na aplicação em área total das equações previamente construídas no primeiro estágio, para avaliar a precisão dos modelos e das estimativas das biométricas florestais em toda a área de estudo. As áreas que não foram inseridas no primeiro estágio para construção dos modelos, resultaram em valores de desvio padrão da ordem de 0,61 a 1,17 m

para a altura média, 0,70 a 1,33 m para a altura dominante, 1,37 a 1,61 cm para o diâmetro médio, 16,9 a 22,2 % para o número de árvores (128 a 400 árvores.ha⁻¹), 8,6 a 11,7% área basal (2,33 a 2,54 m².ha⁻¹) e 11,4 a 14,2% para o volume (18,3 a 31,9 m³.ha⁻¹), após a aplicação modelos construídos no primeiro estágio.

Næsset (2004) novamente testou o uso da tecnologia LiDAR para o estudo da biomassa aérea florestal. Neste estudo, a biomassa florestal foi inventariada em 143 parcelas compostas por florestas de coníferas jovens e maduras. As métricas referentes à altura e densidade de copa obtidas pelo processamento da nuvem de pontos LiDAR, pertencente ao primeiro e ao último pulso de retorno LiDAR foram calculadas e aplicadas para construção dos modelos preditivos da biomassa através da técnica de regressão linear múltipla. Os modelos ajustados na pesquisa resultaram em precisas estimativas de biomassa, podendo o comportamento da biomassa ser explicado 90% pelos regressores LiDAR empregados nos modelos.

Lefsky et al. (2002), em um estudo realizado a oeste de Cascade Range, no estado de Oregon, USA, aplicaram dados LiDAR *full-waveform* obtidos pelo sensor SLICER, para comparar a relação entre a estrutura de copa mensurada pelo LiDAR e a biomassa aérea em diferentes tipologias florestais da região através da técnica de regressão. Os autores encontraram resultados satisfatórios, e as variáveis LiDAR apresentaram um poder explicativo da ordem de 84% da biomassa aérea florestal.

A utilidade do sistema de discreto retorno LiDAR, e imagens de satélites multiespectrais e suas integrações foram comparadas por Hudak et al. (2006) na modelagem e mapeamento da área basal e da densidade de indivíduos arbóreos em uma floresta de coníferas ao norte de Idaho, USA. Os modelos foram criados através da regressão linear múltipla com 26 métricas obtidas pelo LiDAR e pelas imagens de satélite multiespectrais. Os autores concluíram que as métricas LiDAR são mais explicativas do que aquelas obtidas pelo processamento das imagens de satélite para a estimativa dos parâmetros biométricos avaliados. As mais empregadas nos modelos preditivos da área basal foram as referentes a classe em altura, seguidas pela intensidade. Por outro lado, para a estimativa da densidade de indivíduos arbóreos, as melhores métricas foram referentes à cobertura de copa, seguidas pela classe de intensidade. Os melhores modelos selecionados apresentaram um poder explicativo em torno de 90% da variabilidade presente em ambas as biométricas estudadas. Desta forma, os autores confirmaram o grande potencial das tecnologias de sensoriamento remoto para a modelagem e mapeamento de parâmetros biométricos.

Zonete et al. (2010), avaliou o uso da tecnologia LiDAR para estimativas das biométricas florestais diâmetro médio, altura média, altura dominante, área basal e volume em plantios de *Eucalyptus* spp. na Bahia, Brasil. As métricas LiDAR, tais como a média geral das alturas, desvio padrão e cinco percentis (altura até a qual se acumulam 10%, 30%, 50%, 70% e 90% dos pontos acima do nível do solo na nuvem de pontos gerada pelo levantamento LiDAR) foram empregadas na construção dos modelos preditivos. O autor encontrou bons resultados, e os modelos baseados em métricas LiDAR que resultaram nos melhores ajustes utilizaram: o percentil 30% para estimar diâmetro médio ($R^2=0,88$ e $RMSE=0,0004$); os percentis 10% e 90%, para estimar altura média ($R^2=0,94$ e $RMSE=0,0003$), o percentil 90% para estimar altura dominante ($R^2=0,96$ e $RMSE=0,0003$); o percentil 10% conjuntamente com altura média dos pontos ALS para estimar área basal ($R^2=0,92$ e $RMSE=0,0016$); e idade e percentis 30% e 90% para estimar volume ($R^2=0,95$ e $RMSE=0,002$).

Jensen et al. (2008) utilizaram um sistema LiDAR de discretos retornos para predição do índice de área foliar (IAF, do inglês *leaf area index* - LAI) em duas florestas de coníferas ao norte de Idaho, USA. Na pesquisa, aplicou-se as métricas LiDAR e diferentes índices espectrais de vegetação (do inglês *spectral vegetation indices* - SVIs) obtidos através de imagens espectrais do satélite francês SPOT-5 (*Satellite Pour l'Observation de la terre*) para as estimativas do LAI. Para avaliar a eficiência na construção dos modelos e suas variáveis preditivas, as métricas LiDAR e os SVIs foram avaliados isoladamente e em conjunto. Os resultados demonstram que o uso isolado dos SVIs derivados do SPOT5 apresenta baixo poder explicativo, representando cerca de 50% da variação observada em LAI, enquanto que os modelos construídos com apenas as métricas LiDAR apresentaram bons resultados, atingindo R^2 de 0,86 e RMSE de 0,76 para a floresta St. Joe Woodlands e R^2 de 0,69 e RMSE de 0,61 para a reserva Nez Perce. Os modelos construídos apenas com dados LiDAR melhoraram nas estimativas LAI quando foram integrados nos modelos os SVIs. Após a integração, houve um acréscimo variando de 0,02 a 0,04 para o R^2 , e uma redução variando de 0 a 11,76% para o RMSE.

Poh et al. (2010) avaliaram o uso de altura e da cobertura de copa obtidas pelo processamento de dados LiDAR para os estudos de manejo e estimativa da biomassa aérea florestal em Glen Affric, ao noroeste da Escócia. Os autores encontraram resultados satisfatórios, e confirmaram o grande potencial desta ferramenta para estudos voltados à conservação e ao manejo florestal em florestas da região.

García et al. (2010) avaliaram o uso sistema LiDAR de discreto retorno para a estimativa da biomassa total acima do solo, e também nos compartimentos galhos e folhas,

em floresta mediterrânea na região central da Espanha. Vários modelos construídos incluíram isoladamente as métricas LiDAR referentes à classe de altura, intensidade e também estas em conjunto. Os modelos generalizados, incluindo todas as espécies encontradas, baseados nas métricas LiDAR de altura e intensidade, apresentaram R^2 em torno de 0,58, e RMSE de 28,89, 18,28 e 1,15 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para biomassa acima do solo, galhos e folhas. Melhores resultados foram encontrados com modelos construídos especialmente para cada classe de espécies predominantes entre as parcelas avaliadas na área em estudo.

Hudak et al. (2012) avaliaram o uso de discretos retornos LiDAR para a quantificação da biomassa e na dinâmica do estoque de carbono em uma área composta por florestas de coníferas manejadas e não manejadas ao norte de Idaho, USA. Os dados da coleta de campo e do LiDAR foram obtidos ambos em 2003 e 2009, e o experimento abordou uma área de aproximadamente de 2.0000 ha. Os autores utilizaram métodos não paramétricos, como o algoritmo *Random Forest* para a modelagem da biomassa acima do solo e, aos seis anos de idade, verificaram que na área não manejada, onde não houve a colheita florestal, a biomassa aérea florestal obteve um crescimento da ordem de 4,1 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$.

Chen et al. (2012) avaliaram o uso isolado da tecnologia LiDAR e em conjunto com fotografias aéreas para a estimativa da biomassa aérea florestal em Sierra Nevada na Califórnia, USA. Os autores concluíram que, quando aplicados o LiDAR e a fotografia aérea em conjunto, os modelos preditivos da biomassa aumentaram o R^2 de 0,77 para 0,83, com o RMSE reduzindo em 10 % (80,8 para 72,2 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Estornell et al. (2012) avaliaram o uso da tecnologia LiDAR em conjunto com imagens espectrais para a predição da biomassa e volume de indivíduos arbustivos em florestas do mediterrâneo. No campo, foram alocadas 29 parcelas quadradas de 100 m^2 . As métricas LiDAR e as métricas obtidas pelo processamento das imagens espectrais, tais como o índice de vegetação da diferença normalizada NDVI (do inglês *normalized difference vegetation index*), foram submetidas a análise de regressão para construção dos modelos preditivos de biomassa e volume. As melhores variáveis a serem incluídas nos modelos foram selecionadas pelo procedimento *stepwise*. Os autores encontraram alta acurácia quando as variáveis LiDAR e NDVIs foram combinados para a predição da biomassa e do volume (R^2 de 0,78 e 0,84 para biomassa e para volume, respectivamente). As melhores métricas LiDAR selecionadas para composição dos modelos foram as pertencentes a classe em altura, como a mediana e desvio padrão da altura, assim como métricas referente a densidade, tais como a porcentagem de pontos LiDAR entre a altura de 0,50 m a 0,75 m, 0,75 m a 1 m e acima de 1

m. Por outro lado, as melhores métricas obtidas pelas imagens espectrais foram o desvio padrão dos valores em refletância da banda verde, e a média dos valores de NDVI.

Stephens et al. (2012) avaliaram o uso da tecnologia LiDAR para a estimativa do estoque de carbono em uma floresta localizada na Nova Zelândia. Os resultados da pesquisa foram satisfatórios para os autores, pois 74% da variável dependente carbono foi explicada pelo modelo construído com dados LiDAR. As métricas LiDAR mais significativas selecionadas nos modelos de regressão lineares foram as pertencentes a classe em altura (h_{p70} , altura no percentil 70 da nuvem de pontos LiDAR) e cobertura do dossel (porcentagem de copa).

Referências

ANDERSEN, H.; MCGAUGHEY, R.J.; REUTEBUCH, S.E. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, p. 441-449, Feb. 2005.

AREVALO, L.A.; ALEGRE, J.C.; VILCAHUAMAN, L.J.M. **Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 41 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011**. 7. ed. Brasília, 2012. 150 p.

BALTSAVIAS, E.P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 54, p. 199–214, July 1999.

BOLAND, J.; AGER, T.; EDWARDS, E.; FREY, E.; JONES, P.; JUNGQUIET, R.K.; LAREAU, A.G.; LEBARRON, J.; KING, C.S.; KOMAZAKI, K.; TOTH, C.; WALKER, S.; WHITTAKER, E.; ZAVATTERO, P.; ZUEGGE, H. Cameras and sensing systems. In: MCGLONE J.C. (Ed.). **Manual of photogrammetry**. 5th ed. Bethesda: ASPRS, 2004. chap. 8, p. 629–636.

BROWN, S.; LUGO, A.E. Biomass of tropical forest: a new estimate based on forest volumes. **Science**, Washington, v. 223, p. 1290-1293, Mar. 1984.

BROWN, S.; SWINGLAND, I.; HANBURY-TENISON, R.; PRANCE, G.; MYERS, M. **Carbon sinks for abating climate change: can they work?** 2001. Disponível em: <<http://www.essex.ac.uk/ces/occasionalpapers/AdditionalPaper.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2013.

BURROUGH, P.; MCDONNELL, R. **Principles of Geographic Information Systems**. New York: Oxford University Press, 1998. 333 p.

CHEN, Q.; VAGLIO LAURIN, G.; BATTLES, J.J.; SAAH, D. Integration of airborne lidar and vegetation types derived from aerial photography for mapping aboveground live biomass. **Remote Sensing of Environment**, Basel, v. 121, p. 108-117, Jan. 2012.

COOPS, N.C.; HILKER, T.; WULDER, M.A.; NEWNHAM, G.; TROFYMOW, J.A. Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete-return LiDAR. **Trees**, Vancouver, v. 21, n. 3, p. 295-310, Jan. 2007.

COREN, F.; STERZAI, P. Radiometric correction in laser scanning. **International Journal of Remote Sensing**, United Kingdom, v. 27, p. 3097-3104, Aug. 2006.

COURSE HOME PAGE. **Welcome to GEOG 497D – LiDAR: technology and applications**. Disponível em: <<https://www.e-education.psu.edu/lidar/>>. Acesso em: 20 fev. 2013.

DONOGHUE, D.N.M.; WATT, P.J.; COX, N.J.; WILSON, J. Remote sensing of species mixtures in conifer plantations using LiDAR height and intensity data. **Remote Sensing of Environmental**, New York, v. 110, n. 4, p. 509-522, Oct. 2007.

DUBAYAH, R.; DRAKE, J. LiDAR remote sensing for forestry applications. **Journal of forestry**, Maryland, v. 98, n. 1, p. 44-46, June 2000.

ESTORNELL, J.; RUIZ, L.A.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; HERMOSILLA, T. Estimation of biomass and volume of shrub vegetation using LiDAR and spectral data in a Mediterranean environment. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v. 46, p. 710-721, Nov. 2012.

FUJIHARA, M.A.; LOPES, F.G. (Org.). **Sustentabilidade e mudanças climáticas: guia para o amanhã**. São Paulo: Terra das Artes Editora; Senac São Paulo, 2009. 70 p.

GARCÍA, M.; RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; DANSON, F.M. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 114, n. 4, p. 816-830, Apr. 2010.

GIONGO, M.; KOEHLER, H.S.; MACHADO, S.D.A.; KIRCHNER, F.F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, ago./out. 2010.

GONÇALVES, G.; SECO, L.G. Utilização de dados LiDAR na classificação de objectos situados em zonas rurais. In: CONFERENCIA NACIONAL DE CARTOGRAFIA E GEODESIA, 5., 2007, Coimbra. **Actas...** Coimbra: Editora Lidel, 2007. p. 167-176. 2007.

GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO. **Tercer informe de evaluación cambio climático 2001: la base científica**. Resumen para responsables de políticas y Resumen Técnico. Parte de La contribución Del grupo de trabajo I, II e II al tercer informe de evaluación. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2001. 101 p.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JR., J.A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQUESTRO DE CO₂ – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 125-153.

HIRATA, T.; FURUYA, N.; SUZUKI, M.; YAMAMOTO, H. Airborne laser scanning in forest management: individual tree identification and laser pulse penetration in a stand with different levels of thinning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 258, n. 5, p. 752-760, Aug. 2009.

HOEN, H.; SOLBERG, B. Potential and economics efficiency of carbon sequestration in Forest biomass through silvicultural management. **Forest Science**, Bethesda, v. 40, n. 3, p. 429-451, Aug. 1994.

HUDAK, A.T.; CROOKSTON, N.L.; EVANS, J.S.; FALKOWSKI, M.J.; SMITH, A.M.S.; GESSLER, P.E. Regression modeling and mapping of coniferous forest basal area and tree density from discrete-return LiDAR and multispectral satellite data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Kanata, v. 32, p. 126–138, Jan. 2006.

HUDAK, A.T.; EVANS, J.S.; SMITH, A.M.S. Review: LiDAR utility for natural resource managers. **Remote Sensing**, Basel, v. 1, p. 934–951, Nov. 2009.

HUDAK, A.T.; LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; BERTERRETICHE, M. Integration of LiDAR and Landsat ETM+ data for estimating and mapping forest canopy height. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.82, p. 397–416, Apr. 2009. Tirar a e b do texto

HUDAK, A.T.; STRAND, E.K.; VIERLING, L.A.; BYRNE, J.C.; EITEL, J.U.H.; MARTINUZZI, S.; FALKOWSKI, M.J. Quantifying aboveground forest carbon pools and fluxes from repeat LiDAR surveys. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 82, p. 397–416, Aug. 2012.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Land use, land use change, and forestry special report**. Summary for Policymakers. (Based on Watson, R. et al. as Core Writing Team). Montreal, 2000a. 388 p.

_____. **Special report, emissions scenarios**. Summary for Policymakers. (Based on Nebojsa Nakiaenovie et al. as Core Writing Team). Montreal, 2000b. 570 p.

_____. **Climate change 2002: Synthesis report**, contribution of working group I, II, and III to the third assessment report of the IPCC [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2001. 397 p.

IOKI, K.; IMANISHI, J.; SASAKI, T.; MORIMOTO, Y.; KITADA, K. Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR: plot-based approach. **Landscape and Ecological Engineering**, London, v. 6, n. 1, p. 29-36, Jan. 2010.

JENSEN, J.; HUMES, K.; VIERLING, L.; HUDAK, A. Discrete return LiDAR-based prediction of leaf area index in two conifer forests. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, n. 10, p. 3947-3957, July 2008.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

KIM, S. **Individual tree species identification using LiDAR – derived crown structures and intensity data**. 2007. 137 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - College of Forest Resources, University of Washington, Washington, 2007.

KOEHLER, A.B. **Modelagem biométrica e morfometria em povoamentos jovens de *Araucaria angustifolia* (Bert.) KTZE., em Tijucas do Sul, Estado do Paraná**. 2009. 142 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; HARDING, D.J.; PARKER, G.G.; ACKER, S.A.; GOWER, S.T. LiDAR remote sensing of above-ground biomass in three biomes. **Global Ecology and Biogeography**, Edinburgh, v. 11, p. 393–399, Sept. 2002.

LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Ed. Uniderp, 2006. 908 p.

MALTAMO, M.; EERIKÄINEN, K.; PACKALÉN, P.; HYYPPÄ, J. Estimation of stem volume using laser scanning-based canopy height metrics. **Forestry**, Oxford, v. 79, n. 2, p. 217-229, Feb. 2006.

MALTAMO, M.; MEHTÄTALO, L.; VAUHKONEN, J.; PACKALÉN, P. Predicting and calibrating tree attributes by means of airborne laser scanning and field measurements. **Canadian Journal of Forest Research**, Toronto, v. 42, p. 1896 – 1907, Oct. 2012.

MARTINELLI, L.A.; CAMARGO, P.B. O monitoramento do carbono em áreas florestadas. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 10, n. 29, p. 6, nov. 1996.

MATHEUS, M.T. Sequestro de carbono sob a ótica florestal no Brasil. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, Chapadinha, v. 6, n. 1, p. 104-116, 2012.

MCGAUGHEY, R.J. **FUSION/LDV: Software for LiDAR Data Analysis and Visualization** [Computer program]. Washington: USDA, Forest Service Pacific Northwest Research Station, 2013. 150 p. Disponível em: <http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2013.

NÆSSET, E. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 61, n. 3, p. 246–253, Nov. 1997.

_____. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 80, n. 1, p. 88-99, Apr. 2002.

_____. Estimation of above- and below-ground biomass in boreal forest ecosystems. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Freiburg, v. 36, n. 8, p. 145-148, Oct. 2004a.

_____. Practical large-scale forest stand inventory using a small footprint airborne scanning laser. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Oslo, v. 19, n. 2, p. 164–179, Mar. 2004b.

_____. Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: Status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Oslo, v. 22, n. 5, p. 433–442, Oct. 2007.

NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T. Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. **Remote Sensing of Environment**, Basel, v. 112, n. 6, p. 3079-3090, June 2008.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION COASTAL SERVICES CENTER. **Lidar 101: an introduction to lidar technology, data, and applications**. Charleston: NOAA Coastal Services Center, 2012. 72 p.

NEWKIRK, G. LIDAR guidebook: concepts, project design, and practical applications. **URISA**, Washington, v. 17, n. 2, p. 49, 2005.

NILSSON, M. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne LiDAR system. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 56, n. 1, p. 1–7, Apr. 1996.

PAIXÃO, F.A.; SOARES, C.P.B.; JACOVINE, L.A.G.; SILVA, M.L.; LEITE, H.G.; SILVA, G.F. Quantificação do estoque de carbono e análise econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 411-420, abr. 2006.

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, maio/ago. 1990.

PIRES, J.M. **Uso do LIDAR (Light Detection and Ranging) para estimação da altura de árvores em povoamentos de eucalipto**. 2005. 39 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

POH, C.; WOODHOUSE, I.; SUAREZ, J.; EDWARDS, C.; PERKS, M. The Use of LIDAR technology for sustainable forest management in Glen Affric. **European Association of Remote Sensing Laboratories**, Paris, v. 30, n. 1, p. 365-370, May/June 2010.

POZONI, F.J.; SHIMABUKO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 127 p.

RESENDE, A.S.; SANTOS, A.O.; GONDIM, A.; XAVIER, R.P.; COELHO, C.H.M.; OLIVEIRA, O.C.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. **Efeito estufa e o sequestro de carbono em sistemas de cultivo com espécies florestais e na cultura de cana-de-açúcar**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2001. 23 p. (Documentos, 133).

ROBERTS, S.D.; DEAN, T.J.; EVANS, D.L.; MCCOMBS, J.W.; HARRINGTON, R. L.; GLASS, P.A. Estimation individual tree leaf area in loblolly pine plantations using LiDAR-derived measurements of height and crown dimensions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 2013, p. 54-70, July 2005.

RODRIGUEZ, L.C.E.; POLIZEL, J.L.; FERRAZ, S.F. de B.; ZONETE, M.F.; FERREIRA, M.Z. Inventário florestal com tecnologia laser aerotransportada de plantios de *Eucalyptus* spp. no Brasil. **Ambiência**, Guarapuava, v. 6, p. 67-80, jul. 2010.

SALATI, E. Emissão X sequestro de CO₂ – uma nova oportunidade de negócios para o Brasil. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQÜESTRO DE CO₂, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p. 13-37.

SANQUETTA, C.R.; WATZLAWICK, L.F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M.A.B.; GOMES. **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, Imprensa Universitária, 2002. 265 p.

SANTOS, R.P. **Os principais fatores do desmatamento na Amazônia (2002-2007) – uma análise econométrica e espacial**. 2010. 129 p. Dissertação (Mestrado em Política e Gestão Ambiental) - Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H.S.; SANQUETTA, C.R.; ARCE, J.E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 185-206, jan./mar. 2008.

SOARES, C.P.B.; OLIVEIRA, M.L.R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 533-539, set./out. 2002.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Production and carbon allocation in a clonal Eucalyptus plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 3/4.p. 920–930, Sept. 2008.

STEPHENS, P.R.; KIMBERLEY, M.O.; BEETS, P.N.; PAUL, T.S.H.; SEARLES, N.; BELL, A.; BRACK, C.; BROADLEY, J. Airborne scanning LiDAR in a double sampling forest carbon inventory. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 117, p. 348-357, Feb. 2012.

TOTTEN, M. **Getting it right**: emerging markets for storing carbon in forests. Washington: Forest Trends; World Resources Institute, 2000. 48 p.

VEIGA, J.E. da. (Org.). **Aquecimento global**: frias contendas científicas. São Paulo: Senac São Paulo, 2008. 115 p.

WATZLAWICK, L.F.; KIRCHNER, F.F.; SANQUETTA, C.R.; SCHUMACHER, M.V. O papel do sensoriamento remoto nos estudos de carbono. In: SANQUETTA, C.R.; WATZLAWICK, L.F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M.A.B. **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, Imprensa Universitária, 2002. v. 1, p. 215-235.

WEIBEL, R.; HELLER, M. Digital terrain modeling. In: MAGUIRE, D.J.; GOODCHILD, M.F.; RHIND, D.W. (Eds.). **Geographical information systems**: principles and applications. London: Longman, 1991. p. 269-297.

YU, C.M. **Sequestro florestal do carbono no Brasil**: dimensões políticas socioeconômicas e ecológicas. São Paulo: Annablume; IEB, 2004. 280 p.

ZONETE, M. F.; RODRIGUEZ, L. C. E.; PACKALÉN, P. Estimaco de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia : uma aplicao da tecnologia laser aerotransportada. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 225-235, jun. 2010.

3 QUANTIFICAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO NA BIOMASSA ÁREA FLORESTAL EM PLANTAÇÕES COMERCIAIS DE *Eucalyptus* spp.

Resumo

Nos últimos anos, o interesse pelo uso das florestas como medida para mitigação das mudanças climáticas globais tem aumentado. O armazenamento de carbono em florestas de rápido crescimento, tais como as florestas de *Eucalyptus* spp., tem sido visto como uma alternativa eficiente de redução de gases de efeito estufa até que novas tecnologias energéticas sejam desenvolvidas. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo a quantificação do estoque de carbono e o ajuste de modelos para a estimativa do estoque de carbono total, lenho comercial, e parte residual (folha, casca, galhos e ponteiro do lenho), presentes na biomassa arbórea acima do solo em plantações de *Eucalyptus* spp. localizadas na região do Vale do Paraíba Paulista. No campo, foram coletados dados biométricos em parcelas convencionais de inventário e derrubadas árvores para a coleta de material que, posteriormente, em laboratório, permitiu a precisa aferição do seu conteúdo de carbono. Os modelos para a estimativa do carbono foram desenvolvidos com as variáveis independentes logaritmos do diâmetro a altura do peito (DAP) e altura total dos indivíduos arbóreos (Ht), e as variáveis dependentes, os logaritmos do carbono total, lenho comercial e parte residual. Os modelos construídos foram avaliados segundo a raiz quadrada do erro médio (RMSE), o coeficiente de determinação (R^2) e a correlação de Pearson (r). Os resultados obtidos indicam que os modelos construídos apresentaram-se precisos e acurados, com coeficientes de determinação (R^2) da ordem de 97,0%, coeficiente de correlação de Pearson (r) e Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE%) para os valores observados e estimados da ordem de 0,97 a 0,98 e 11,04 a 12,38%, respectivamente.

Palavras-chave: Teor de Carbono; Modelagem; *Eucalyptus*; Função Schumacher-Hall; Regressão linear múltipla

Abstract

There is an increasing interest to use forest resources as a mitigation element within the global climate change framework. The carbon stored in commercial forest plantations, such as those of rapid growth by *Eucalyptus* spp. have been proposed as an efficient way for the reduction of the greenhouse gases. This has been suggested until new or efficient technology appears. The main objectives of this investigation were: 1) to quantify the carbon content at the above ground level; and 2) to adjust specific allometric models using common forest inventory variables such as diameter at the breast height (DBH) and total tree height (Ht) for the retrieval of the total carbon content at the above ground section, in commercial logs and residuals (leaves, bark, branches/twings). The analyses were performed at a tree level and the sample plots were established in commercial plantations of *Eucalyptus* spp (Paraiba Valley, Sao Paulo State). Forest inventory procedures were taken where some trees were harvested and different biometric variables measured. Later, the samples were taken in the laboratory enabling a precise carbon estimation. The proposed allometric equations were finally evaluated taking into account the root mean square error (RMSE), the coefficient of determination (R^2) and the Pearson's correlation (r) results. The models showed good accuracy with a r^2 of 97%. R^2 ranged from 0.97 to 0.98 while the RMSE from 11.04 to 12.38%.

Keywords: Carbon content; Modeling; *Eucalyptus*; Schumacher-Hall function; Multiple linear regression

3.1 Introdução

As questões relativas às mudanças climáticas, ao aquecimento global e ao efeito estufa atualmente destacam-se como ameaças ambientais que colocam em risco a integridade do planeta (SILVA et al., 2008). A elevada concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera vem provocando alterações no clima da Terra, e deixando a sociedade em alerta. Diante deste quadro, tem-se um consenso mundial de que estratégias devem ser estudadas e empregadas para redução da concentração de CO₂ atmosférico, na tentativa de se reduzir o risco dessas alterações ambientais (SILVEIRA et al., 2008).

As florestas exercem um papel importante na regulação do balanço global de carbono na atmosfera. As árvores absorvem CO₂ da atmosfera através do processo de fotossíntese durante seu crescimento, armazenando portanto consideráveis quantidades de carbono na biomassa de folhas, galhos, troncos e raízes, e liberando oxigênio de volta a atmosfera (YU, 2004). Sendo assim, despontam como um das alternativas viáveis para mitigar o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera via fixação de carbono pelas plantas arbóreas, principalmente (GATTO et al., 2011).

As plantações florestais com espécies do gênero *Eucalyptus* são as mais extensas no Brasil, com 4,8 milhões de hectares, correspondendo a 74,8% da área total reflorestada do país (ABRAF, 2012). O país detém, atualmente, as melhores tecnologias na silvicultura do eucalipto, tendo registrado, em 2011, um incremento médio anual (IMA) da ordem de 40,1 m³.ha⁻¹.ano⁻¹. Esses valores, comparativamente são altos em relação a outros países, como Austrália e Indonésia, onde o IMA gira em torno de 22 e 25 m³.ha⁻¹.ano⁻¹, respectivamente (ABRAF, 2012). Entretanto, estudos regionais sobre a quantidade de carbono armazenadas nestes plantios comerciais em território brasileiro é de extrema importância.

Segundo Stape et al. (2008) as espécies do gênero *Eucalyptus* são bastante eficientes no processo de sequestro de carbono, por possuírem uma elevada eficiência fotossintética. O Brasil é um dos maiores produtores de fibras para a indústria da celulose. Os plantios de eucalipto são a principal fonte de matéria prima para essa indústria. A estimação precisa dos níveis de carbono nos diferentes componentes da parte aérea permite definir, por exemplo, quanto do carbono sequestrado é exportado para a indústria para posteriormente converter-se em outros produtos e o que permanece no campo após a colheita. Neste contexto, a

quantificação do estoque de carbono total, assim como de cada componente de uma árvore (raiz, tronco, folha, galhos e casca) em florestas de rápido crescimento tem recebido mais atenção, tanto pela possibilidade destas de emitirem CO₂ quanto pelo potencial de servirem como reservatórios de carbono e/ou sumidouros desse gás (CASTRO, 1996; YU, 2004).

No cenário atual, a busca pela sustentabilidade é cada vez mais crescente. O setor industrial, atento com a necessidade de redução de gases do efeito estufa, e da possibilidade das florestas exercerem um importante papel na mitigação das mudanças climáticas globais pela fixação do CO₂ atmosférico, buscam atingir um novo manejo florestal integrando floresta, indústria e mercado, a fim de maximizar o retorno financeiro e, ao mesmo tempo, garantir uma base sustentável na cadeia produtiva florestal (PAIXÃO et al., 2006).

O mercado de florestas plantadas atualmente se encontra aquecido e em expansão (ABRAF, 2012). A busca pela diferenciação e agregação de valor aos produtos são formas de driblar a competitividade e atingir estabilidade no setor. O mercado de créditos de carbono tem criado perspectivas otimistas de expansão do setor florestal brasileiro (PAIXÃO, 2004). Embora este mercado venha a ser atraente, poucos estudos objetivando a precisa estimativa do estoque de carbono em florestas plantadas tem sido realizado.

Os métodos de estimativa da biomassa e do estoque de carbono baseiam-se em métodos diretos (destrutivos) e indiretos (não destrutivos). O método indireto tem sido o mais empregado para o estudo da biomassa e do carbono. Este basicamente consiste no uso de dados de inventário florestal e na elaboração de equações e modelos (relações empíricas) que correlacionem o fator biomassa com variáveis de fácil obtenção (DAP, altura, volume) e um fator de correção para o carbono. Os principais trabalhos envolvendo o método indireto da estimativa de biomassa e carbono, aplicando equações logarítmicas, foram os publicados por Mello e Gonçalves (2008), Silva et al. (2008) e Soares e Oliveira (2002), Soares et al. (2005).

Segundo Mello e Gonçalves (2008) apud Reis et al. (1985) as equações logarítmicas são mais apropriadas para a estimativa da biomassa, pois apresentam a vantagem de reduzir a variância associada com o sucessivo aumento na altura da árvore. Desta forma, um dos modelos mais empregados para a estimativa da biomassa e do carbono é o proposto por Schumacher e Hall (1993), no qual utilizam-se os logaritmos do diâmetro à altura do peito (DAP a 1,30m) e a altura total das árvores como variáveis independentes, e a biomassa ou carbono como variáveis dependentes.

Por outro lado, na literatura encontram-se poucos trabalhos empregando o método direto. Este, por ser baseado em uma análise destrutiva das árvores, é um método mais trabalhoso e oneroso, porém é o método mais eficaz e acurado. Alguns dos trabalhos que

utilizaram do método direto para estudo da biomassa florestal e do estoque de carbono foram os publicados por Paixão et al. (2006) e Trugilho et al. (2002).

3.1.1 Objetivos

Considerando a importância do tema e a escassez de informações disponíveis na literatura a respeito da estimativa do estoque de carbono em plantações florestais de *Eucalyptus* spp., este estudo objetivou o ajuste de modelos para a estimativa do estoque de carbono total, lenho comercial e parte residual (folha, casca, galhos e ponteiro do lenho) presente na biomassa arbórea acima do solo em plantações de *Eucalyptus* spp. através de uma análise destrutiva das árvores e dados biométricos convencionalmente obtidos em inventários florestais.

Mais especificamente, este trabalho teve os seguintes objetivos:

- (i) Determinação do teor de carbono presente na biomassa total, e nos compartimentos lenho, casca, galhos e folhas, em plantios de *Eucalyptus* spp. com diferentes classes de idade, localidade e materiais genéticos;
- (ii) Quantificação do estoque de carbono total, lenho comercial e na parte residual (folha, galho, casca e ponteiro do lenho) de árvores amostradas pelo método destrutivo da biomassa aérea em plantios de *Eucalyptus* spp. com diferentes classes de idade, localidade e material genético;
- (iii) Estabelecer equações alométricas relacionando o estoque de carbono total, o lenho comercial e a parte residual da árvore, amostradas pelo método destrutivo da biomassa aérea e parâmetros biométricos medidos em parcelas amostrais de inventário;
- (iv) E fornecer modelos para obtenção de variáveis dependentes(carbono total, lenho comercial e parte residual) para a posterior modelagem de carbono por meio de dados LiDAR a serem discutidos em maior propriedade no próximo capítulo.

3.1.2 Hipótese

O presente estudo fundamenta-se na hipótese das métricas de inventário (DAP e Ht) servirem como variáveis explicativas para a construção de modelos de estimativa do estoque de carbono total, comercial e parte residual presente na biomassa aérea florestal. Também esperamos que o estoque de carbono presente nas árvores abatidas esteja diretamente relacionado com o volume de biomassa, entretanto, essas as concentrações de carbono variam conforme o tipo de biomassa (lenho, casca, ramo e folha), e podem também variar conforme a idade, o material genético e a capacidade produtiva do local onde cresceram essas árvores.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado a partir de dados coletados em um conjunto de parcelas permanentes de inventário florestal instaladas em áreas comerciais pertencentes à empresa Fibria Celulose S/A, situada no estado de São Paulo. As parcelas foram distribuídas em cinco fazendas, codificadas por: F987, F986, F849, F948 e F634. As fazendas estão localizadas no Vale do Paraíba Paulista, uma das mesorregiões do estado de São Paulo, próximas aos municípios de Jacareí, São Luiz do Paraitinga e Paraibuna (Figura 8, e 12 a 16). Para escolha das áreas de estudo levou-se em consideração as regiões com maiores diferenças ambientais, tais como o relevo, buscando obter uma maior diversidade de situações na coleta de dados LiDAR.

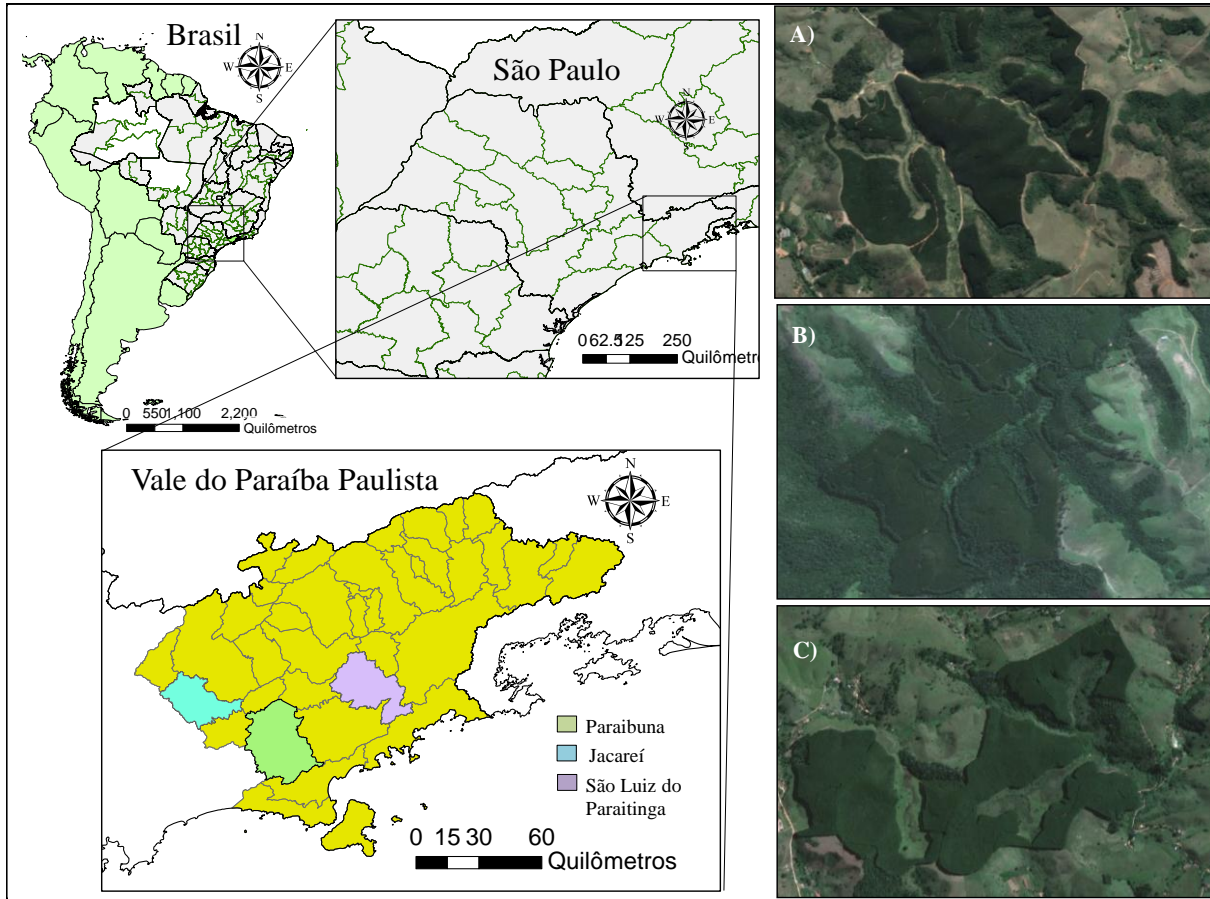


Figura 8 - Ilustração da região de estudo, com destaque as fazendas pertencentes aos municípios de Jacareí, imagem A (coordenadas UTM: 402982 m E; 7416869 m S), Paraibuna, imagem B (coordenadas UTM: 424939 m E; 7408151 m S) e São Luiz do Paraitinga, imagem C (coordenadas UTM: 459893 m E; 7432066 m S), estado de São Paulo

O clima da região, segundo Köppen é do tipo Cwa, caracterizado por um clima temperado úmido, com inverno seco e verão quente. As precipitações anuais encontram-se em torno de 1.200 a 1.232 mm e as temperaturas médias do ar oscilam entre 17,1 °C no mês mais frio (julho) e 23,9 °C em fevereiro. A distribuição da temperatura e da precipitação ao longo dos anos nos municípios pertencentes à área de estudo estão representadas nas Figuras 9, 10 e 11. Segundo Macedo (2009), os solos da região são predominantemente do tipo Latossolo Vermelho, com textura argilosa, perfil A moderado ou proeminente, com relevo suave ondulado a forte ondulado ou montanhoso.

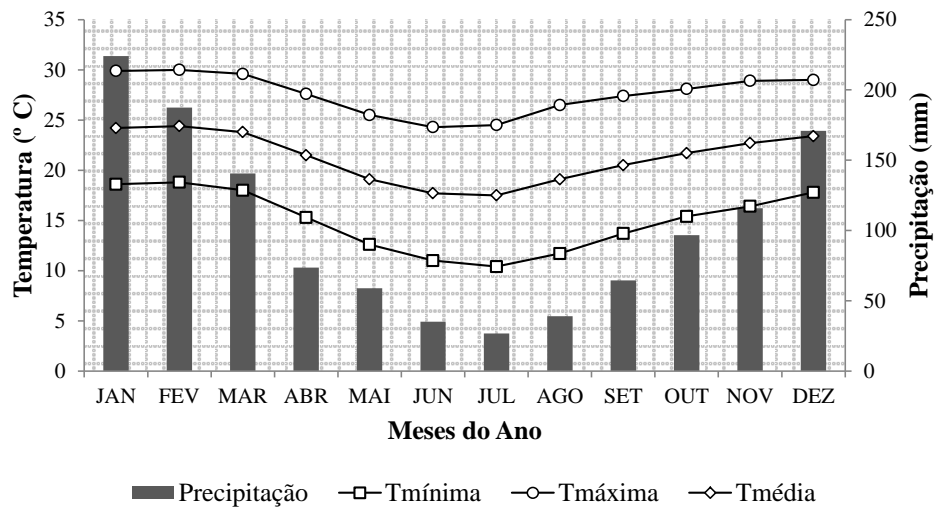


Figura 9 - Distribuição da temperatura do ar e da precipitação ao longo do ano no município de Jacareí, São Paulo. Fonte: Ajustado de CPA (2013)

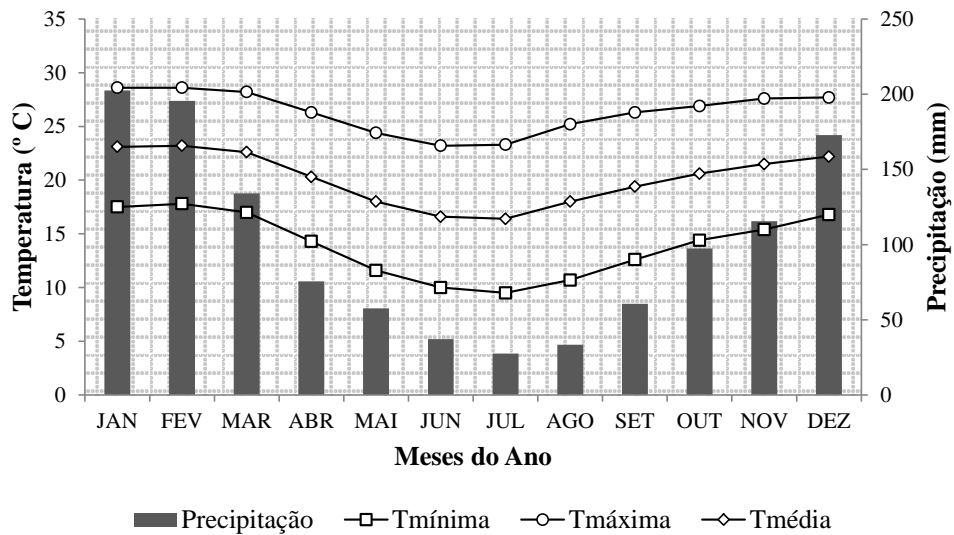


Figura 10 - Distribuição da temperatura do ar e da precipitação ao longo do ano no município de São Luiz do Paraitinga, São Paulo. Fonte: Ajustado de CPA (2013)

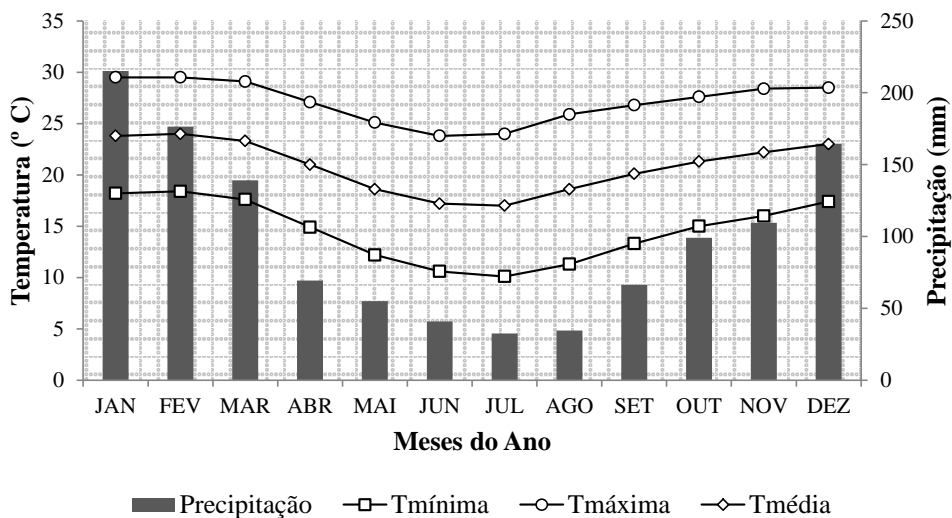


Figura 11 - Distribuição da temperatura do ar e da precipitação ao longo do ano no município de Paraibuna, São Paulo. Fonte: Ajustado de CPA (2013)

As parcelas foram instaladas em plantios clonais de *Eucalyptus* spp., com idades que variam entre dois e oito anos estratificados em classes de material genético, e manejados por meio de regimes silviculturais de alto fuste em espaçamento médio predominante de 3,0 x 2,0 m, que em média resulta em uma densidade de plantio de 1.667 covas por hectare (Tabela 4).

Tabela 4 - Características das fazendas em estudo

Fazendas	Município (SP)	Área (há)	Idade	M. Genético
F987_Santa Terezinha VI	Jacareí	39,53	2,3	C219H e P4295H
F986_Santa Terezinha V	Jacareí	94,16	3,3	P4294H
F849_São José III	São Luiz do Paraitinga	138,96	4,7	VR3709H
F948_Jataí	Paraibuna	79,33	6,8	VR3709H
F634_Patizal do vale feliz	Paraibuna	84,80	8,0	P4295H e TC31H

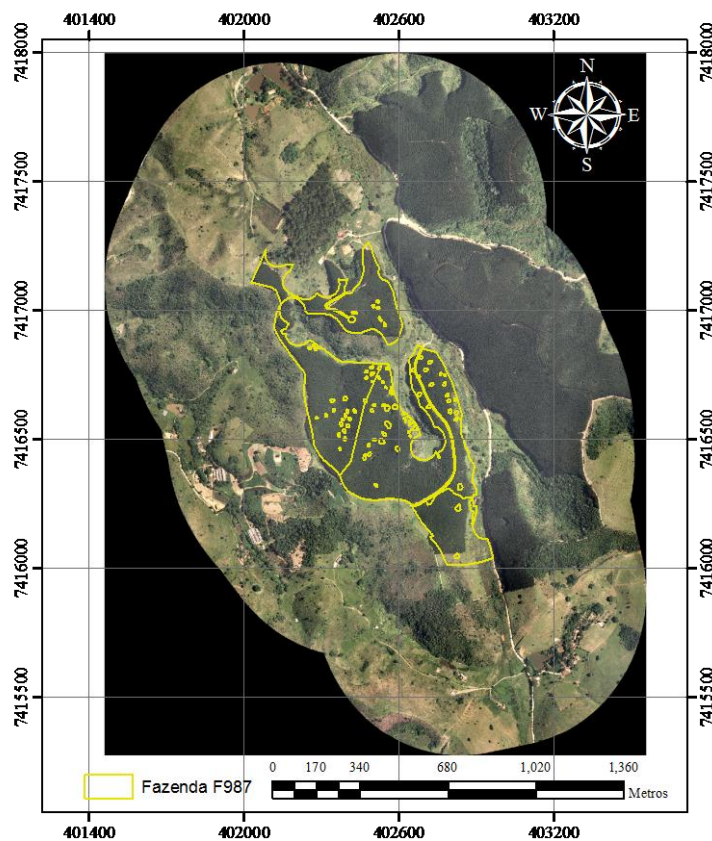


Figura 12 - Área de estudo, fazenda F987_Santa Terezinha VI. Fotografia aérea ortoretificada com delimitações dos talhões florestais

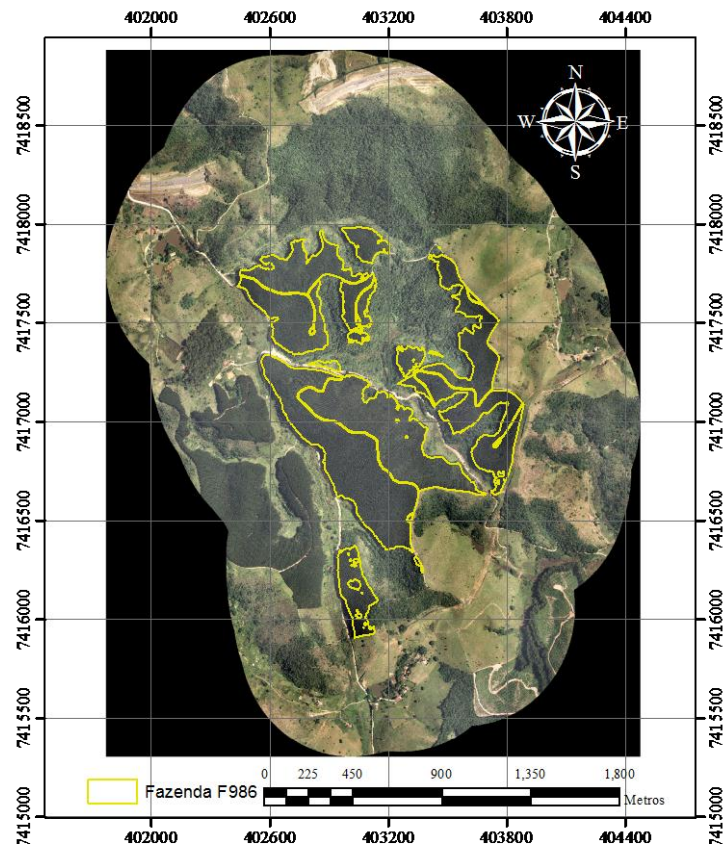


Figura 13 – Área de estudo, fazenda F986_Santa Terezinha V. Fotografia aérea ortoretificada com delimitações dos talhões florestais

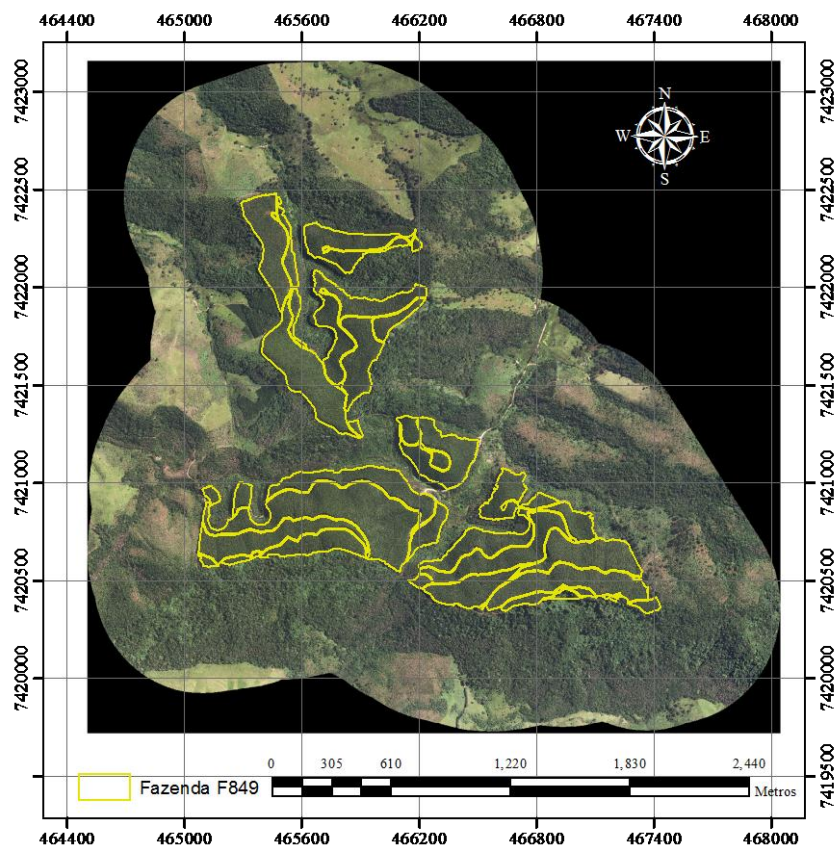


Figura 14 - Área de estudo, fazenda F849_São José III. Fotografia aérea ortoretificada com delimitações dos talhões florestais

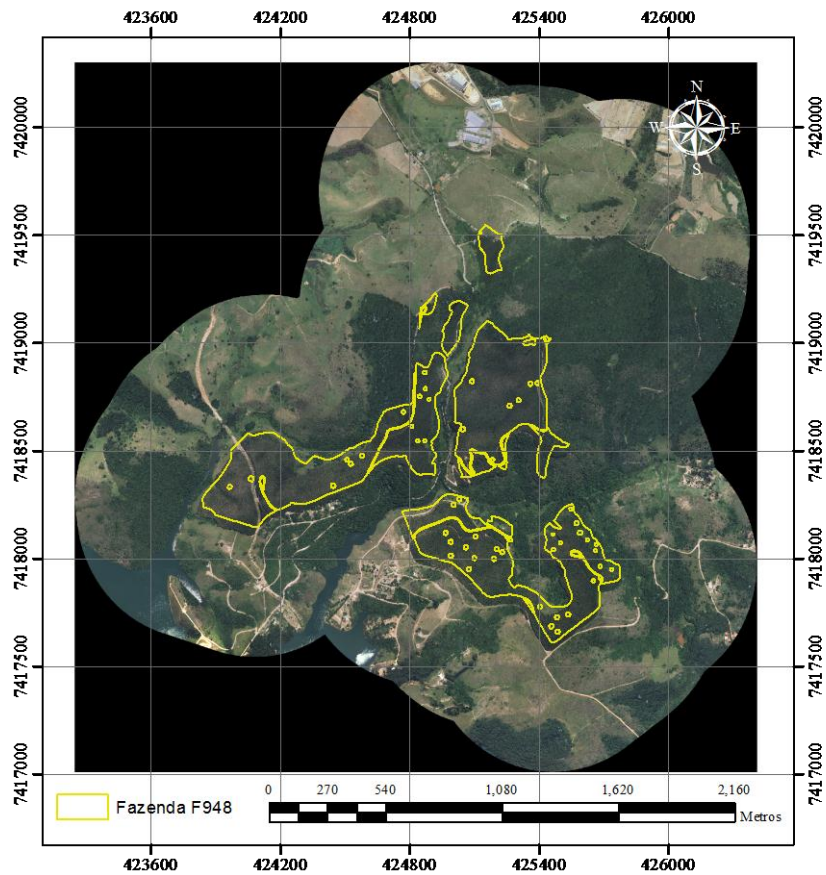


Figura 15 - Área de estudo, fazenda F948_Jataí. Fotografia aérea ortoretificada com delimitações dos talhões florestais

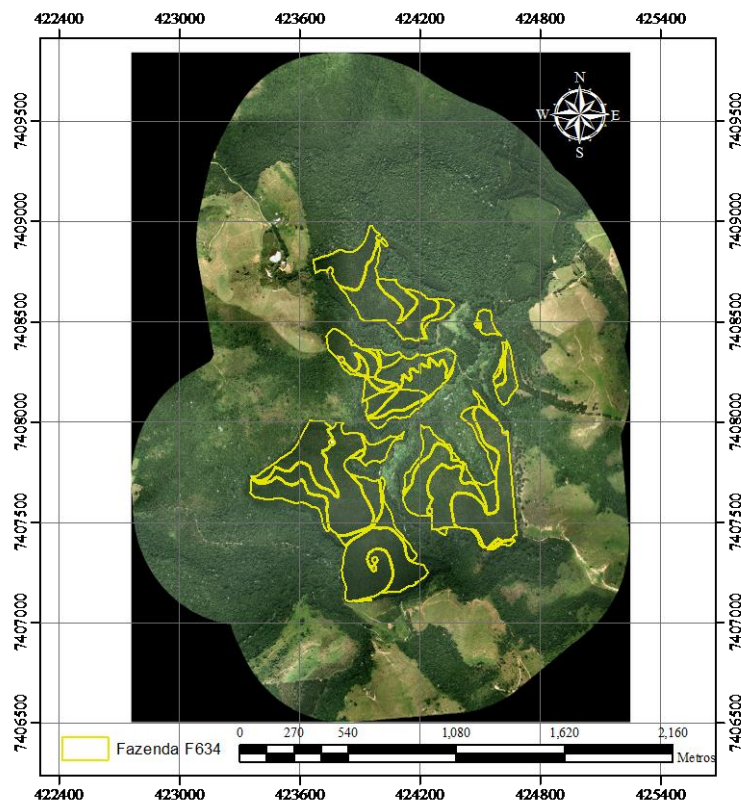


Figura 16 - Área de estudo, fazenda F634_Patzal do vale feliz. Fotografia aérea ortoretificada com delimitações dos talhões florestais

3.2.2 Coleta e processamento da biomassa aérea florestal

A coleta e processamento de dados obtidos em campo foram realizadas em duas etapas, sendo a primeira caracterizada pela medição de variáveis biométricas como o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura (Ht) das árvores nas parcelas, e a segunda pela coleta destrutiva da biomassa e amostras da parte aérea de 56 árvores, para posterior estimativa do carbono em laboratório.

(i) Medição de Variáveis Dendrométricas – Estas medições, muito comuns e regulares em atividades convencionais de inventário florestal, são a base do planejamento do uso dos recursos florestais. É possível com essas medições caracterizar e monitorar uma determinada área e avaliar quantitativa e qualitativamente a cobertura florestal dessas áreas (SANQUETTA et al., 2002).

Neste trabalho foram mensuradas 80 parcelas instaladas nas fazendas contempladas com o estudo. As parcelas, de formato circular com área de 400 m², foram todas georeferenciadas com GPS geodésico (modelo Trimble ProXRT), garantindo precisão em escala centimétrica de aproximadamente 10 cm no pós-processamento.

Nas parcelas foram contados os indivíduos, avaliados os aspectos fitossanitários e qualitativos das árvores, medidos o diâmetro à altura do peito [DAP (cm)] de todos os indivíduos da parcela, e altura [Ht (m)] de 15% dos indivíduos presentes na parcela (Tabela 5). Para a mensuração do DAP foi utilizada suta e para medição das alturas foi utilizado o clinômetro. Para as árvores na parcela que não tiveram as alturas medidas diretamente, a equipe de inventário da empresa disponibilizou estimativas calculadas a partir de equações hipsométricas de acesso reservado apenas a funcionários da empresa.

Tabela 5 - Valores descritivos de parte das características biométricas da rede de parcelas inventariadas na área de estudo

Fazendas	Idade (Anos)	DAP (cm)	
		\bar{x}	σ
F987_Santa Terezinha VI	2,3	9,10	1,63
F986_Santa Terezinha V	3,3	12,60	1,62
F849_São José III	4,7	13,94	2,33
F948_Jataí	6,8	13,61	1,99
F634_Patizal	8,0	16,02	2,82

DAP = Diâmetro a altura do peito (cm)

(ii) Biomassa florestal – Em campo, a biomassa florestal foi avaliada em termos de unidades de massa de folhas, galhos, casca, raízes e tronco por unidade de árvore, e expressa

em $\text{kg} \cdot \text{àrv}^{-1}$. A quantificação do estoque de carbono acima do solo em florestas tem sido normalmente estimado em aproximadamente 50% da biomassa observada na parte aérea das árvores que as compõem (IPCC, 1996). Neste trabalho, amostras foram coletadas para determinação mais precisa desse teor.

Assim sendo, e tendo como objetivo a calibração e ajuste estatístico de modelos que correlacionam as biométricas DAP e Ht diretamente com o carbono florestal foi necessário o abate de árvores no campo para a coleta destrutiva de amostras e posterior quantificação precisa do carbono presente nessas amostras, em laboratório. As 56 árvores abatidas foram selecionadas previamente por classes de diâmetro na escala de dois indivíduos para o DAP médio e um indivíduo para cada um dos desvios padrões (dp): + 1dp, +2dp, +3dp, -1dp, -2dp e -3dp, contabilizando oito indivíduos para as fazendas F986, F987 e F634, e 16 indivíduos para as fazendas F849 e F948. Os indivíduos foram selecionados nas proximidades das parcelas inventariadas e, quando abatidos, os cortes foram realizados na base rente ao solo. Em seguida, fez-se a separação e pesagem das partes componentes da árvore: folhas (Fo), galhos (Ga), casca (Cc) e tronco (Tr). Ainda no campo foi realizada a coleta de amostras representativas dos componentes da árvore para as análises do carbono em laboratório.



Figura 17 - Etapas do processo de quantificação da biomassa florestal. A) Corte e derrubada das árvores selecionadas; B) Retirada dos galhos secos e vivos; C) Separação dos galhos secos e vivos; D) e E) Retirada das folhas dos galhos vivos; F) Medição da altura do fuste; G) Corte dos discos a cada 1 metro do fuste; H) e I) Pesagem dos componentes da árvore (peso úmido); J) e M) Coleta das amostras dos componentes da árvore para moagem em laboratório; N) Amostras dos componentes da árvore para secagem, pesagem e moagem em laboratório. Fonte: Elaborado pelo autor, fotos obtidas do Programa Temático de Silvicultura e Manejo, PTSM –IPEF

3.2.2.2 Processamento da biomassa e análise do carbono em laboratório

No laboratório, as amostras foram secas em estufa a 65°C até atingirem massa constante. O tempo médio para as amostras atingirem uma massa constante foi de 90h. Nesse estágio foi determinado o peso seco (Ps) da amostra de cada componente da árvore. O teor de umidade (U) em base úmida de cada amostra foi calculado pela seguinte equação:

$$U_i = \left(\frac{Pu_i - Ps_i}{Pu_i} \right) * 100 \quad (06)$$

onde:

$$\begin{aligned} U_i &= \text{Teor de umidade do } i\text{-ésimo componente da árvore (\%);} \\ Ps_i &= \text{Peso seco da amostra do } i\text{-ésimo componente da árvore (g);} \\ Pu_i &= \text{Peso úmido da amostra do } i\text{-ésimo componente da árvore (g).} \end{aligned}$$

Em seguida, fez-se o cálculo da biomassa seca total para cada componente da árvore aplicando a seguinte equação:

$$BS_i = Put_i - \left(\frac{U_i * Put_i}{100} \right) \quad (07)$$

onde:

$$\begin{aligned} BS_i &= \text{Biomassa seca total do } i\text{-ésimo componente da árvore (kg);} \\ Put_i &= \text{Peso úmido total do } i\text{-ésimo componente da árvore (kg).} \end{aligned}$$

Uma porção do material vegetal seco coletado em campo foi moído e enviado ao laboratório de Biogeoquímica Ambiental do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA / USP) para determinação dos teores de carbono por combustão a seco, em aparelho Leco CN 2000, segundo metodologia proposta por Nelson e Sommers (1996).

Após as análises, o estoque de carbono para cada componente da árvore foi calculado pela seguinte equação:

$$C_i = (BS_i * Tc_i) \quad (08)$$

onde:

$$\begin{aligned} C_i &= \text{Estoque de carbono do } i\text{-ésimo componente da árvore (kg);} \\ Tc_i &= \text{Teor de carbono do } i\text{-ésimo componente da árvore (\%).} \end{aligned}$$

O estoque de carbono total foi calculado como o somatório do estoque de carbono dos componentes da árvore, como segue na relação abaixo.

$$C_t = \sum C_i \quad (09)$$

onde:

$$C_t = \text{Carbono total na parte aérea de uma árvore (kg).}$$

O lenho comercial refere-se à parte do fuste de uma árvore que é consumida pela unidade industrial da empresa (Figura 18). O carbono no lenho comercial foi calculado pela multiplicação do carbono no lenho total (fuste) pelo fator de correção referente ao lenho comercial, pela seguinte relação:

$$C_{leco} = C_{lenho} * 0,93 \quad (10)$$

onde:

C_{leco} = Carbono no lenho comercial (kg);

C_{lenho} = Carbono no lenho total (kg).

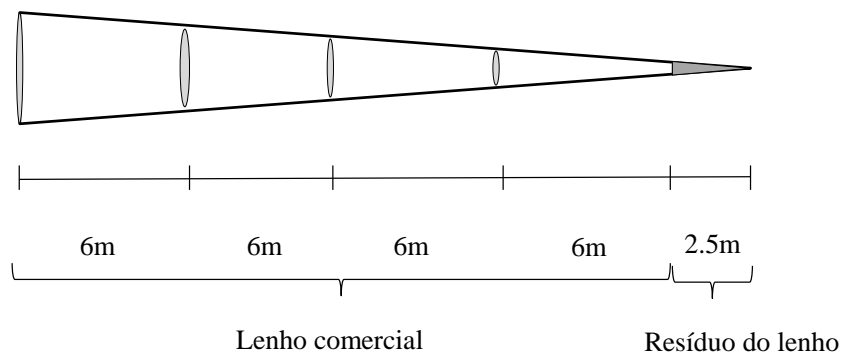


Figura 18 - Ilustração do método de determinação do lenho comercial de um fuste. O fuste é dividido em toras de 6 metros, até a ponta mais fina atingir 5 cm. Considerando os valores observados no campo, observou-se um fator de conversão de lenho total no fuste para lenho comercial de 0,93

Por fim, o carbono no resíduo da árvore foi calculado pelo somatório do carbono nas folha, nos galhos, na casca e nos ponteiros dos lenhos descartados, pela seguinte relação:

$$C_{rsd} = C_f + C_g + C_c + C_{pl} \quad (11)$$

onde:

C_{rsd} = Carbono no resíduo da árvore (kg);

C_f = Carbono na folha (kg);

C_g = Carbono no galho (kg);

C_c = Carbono na casca (kg);

C_{pl} = Carbono no ponteiro do fuste descartado (kg).

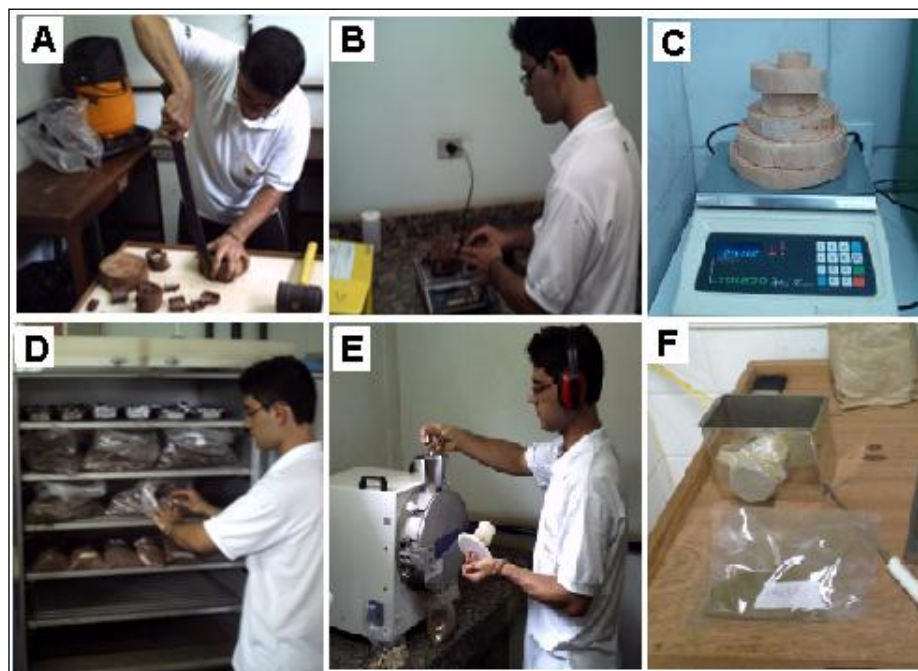


Figura 19 - Etapas do processamento em laboratório da biomassa florestal. A) Retirada das cascas e medições das circunferências dos discos em laboratório; B) Pesagem das cascas; C) Pesagem dos discos; D) Secagem das amostras dos componentes da árvore e em seguida as medições dos pesos secos; E) Moagem dos componentes da árvore para análise de C em laboratório e F) Amostras moídas prontas para as análises de C em laboratório. Fonte: Elaborado pelo autor, fotos obtidas do Programa Temático de Silvicultura e Manejo, PTSM –IPEF

3.2.2.3 Ajuste dos modelos preditivos do estoque de carbono em nível de árvores

Para a modelagem do carbono total, lenho comercial e parte residual da árvore foi aplicado o modelo matemático linearizado de Schumacher e Hall (1993). Este modelo considera a combinação dos logaritmos das variáveis independentes DAP e altura total (Ht) dos indivíduos para a estimativa do logaritmo da variável dependente, o carbono florestal, como segue na relação funcional assim definida:

$$\ln(Y) = \beta_0 + \beta_1 * \ln(DAP) + \beta_2 * \ln(Ht) + \varepsilon \quad (11)$$

onde:

- \ln = logaritmo neperiano;
- Y = carbono total – C (kg.árv⁻¹);
- DAP = diâmetro a altura do peito (1,30 m);
- Ht = altura total dos indivíduos (m);
- β_i = parâmetros do modelo, para $i=0, 1$ e 2 ;
- ε = erro aleatório.

Os modelos desenvolvidos foram primeiramente avaliados quanto ao pressuposto da normalidade e homogeneidade de variâncias pela análise gráfica dos resíduos percentuais

(R%) e pelos testes estatísticos de Shapiro Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) e Breusch-Pagan (BREUSCH; PAGAN, 1979), respectivamente. Em seguida, os modelos foram avaliados pelo desempenho dos parâmetros estatísticos da regressão, tais como Coeficiente de determinação ajustado (R_{adj}^2), Erro-padrão residual (S_{yx}); Correlação linear de Pearson para os valores estimados e observados (r_{xy}); Raiz quadrada do erro quadrático médio absoluto (RMSE); Raiz quadrada do erro quadrático médio percentual (RMSE%), bem como a validação cruzada da regressão pelo procedimento “*leave-one-out*”.

Os parâmetros estatísticos da regressão foram calculados pelas seguintes equações:

i) Resíduo percentual ($R\%$):

$$R\% = \left(\frac{y_i - x_i}{x_i} \right) * 100 \quad (12)$$

onde:

x_i = i-ésimo valor observado da variável em estudo;

y_i = i-ésimo valor predito da variável em estudo.

ii) Coeficiente de determinação ajustado (R_{adj}^2):

$$R_{adj}^2 = 1 - \left[(1 - R^2) \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \right] \quad (13)$$

onde o R^2 é obtido por:

$$R^2 = \frac{\left[\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n} \right]^2}{\left[\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \right] \left[\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \right]} \quad (14)$$

onde:

n= número de observações.

iii) Erro padrão da estimativa (s_{yx}):

$$s_{yx} = \sqrt{Qm_{residuo}} \quad (15)$$

onde:

$Qm_{residuo}$ = quadrado médio do resíduo do modelo ajustado.

iv) Correlação de linear Pearson para os valores estimados e observados (r_{yx}):

$$r_{yx} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (16)$$

onde:

\bar{x} = média do valor observado da variável em estudo;

\bar{y} = média do valor predito da variável em estudo.

v) Raiz quadrada do erro quadrático médio absoluto (*RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (17)$$

vi) Raiz quadrada do erro quadrático médio percentual (*RMSE%*):

$$RMSE\% = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)}} \cdot 100\% \quad (18)$$

3.3 Resultados e Discussões

3.3.1 Análise do teor de carbono na biomassa aérea

Para as 56 árvores abatidas neste estudo, verificou-se que o teor de carbono em termos médios presente na biomassa seca total da árvore foi de 46,3%. Os teores de carbono para os diferentes componentes das árvores e por fazendas podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 - Teor de carbono em porcentagem presente na biomassa seca dos compartimentos da árvore

Fazenda	Idade (Anos)	Teor de carbono (%)					Média
		Lenho	Folha	GV	GS	Casca	
F987	2,3	46,56	50,49	45,92	44,94	43,71	46,32
F986	3,3	46,45	51,06	45,21	44,72	42,69	46,03
F849	4,7	46,69	49,75	45,85	44,85	43,78	46,18
F948	6,8	46,69	50,67	45,90	45,41	43,34	46,40
F634	8,0	46,33	50,27	46,18	44,97	43,27	46,20
Média	5,0	46,54	50,44	45,81	44,98	43,36	46,23

Como observado na Tabela anterior, verificou-se que os teores de carbono para os componentes da árvore foram diferentes. Em termos médios, observou-se que a folha foi o componente com o maior teor de carbono em sua biomassa seca, seguido do lenho, galhos vivos, galhos secos e casca. Neves (2000), para plantações de *E. grandis* x *urophylla* na região litorânea do estado do Espírito Santo, verificou que os teores de carbono presente na biomassa florestal para os compartimentos folhas, casca, galhos e lenho em termos de porcentagem foram de 52,4%; 47,9%; 52,5% e 50,6%, respectivamente. Os resultados de Trugilho et al. (2010) indicam, em média, que o teor de carbono presente no lenho comercial de árvores de *E. grandis* para a região de Matinhos Campo - MG varia de acordo com a metodologia de coleta dos discos para a análise elementar do carbono em laboratório. Os autores avaliaram duas metodologias de coleta dos discos, sendo a metodologia tradicional compreendida pela coleta de discos apenas na altura do DAP das árvores, e a metodologia alternativa pela coleta de discos nas alturas relativas de 2%, 10%, 30%, 50% e 70% da altura total das árvores. Os teores de carbono em termos médios para a metodologia tradicional e alternativa encontrados no estudo foram de 50,14 % e 49,74, respectivamente.

Dallagnol et al. (2011), estudando os teores de carbono para indivíduos de *E. grandis* com idades entre 8 a 20 anos ao sul do Brasil, encontraram teores para os compartimentos casca, folhas, galhos e lenho de 39,46, 48,17, 42,06, 42,61%, respectivamente. Os resultados de Alves (2007) para o estudo realizado em Araripina – PE em plantios de *Eucalyptus* spp. indicam que os teores de carbono para os compartimentos do fuste (lenho + casca), folha, casca e galhos, foram de 46,97, 38,95, 35,64 e 34,74%, respectivamente.

Os teores de carbono para os compartimentos avaliados representados por classe diamétrica estão apresentados na Tabela 7. Desta forma, observou-se que os teores de carbono para os componentes da árvore avaliados pouco mudaram representados por classes diamétricas. Porém, a menor porcentagem média de carbono esteve associada com a menor classe diamétrica, como também encontrado por Trugilho et al. (2010).

Tabela 7 - Teor de carbono presente na biomassa área por classe diamétrica

Classes	DAP (cm) médio	Teor de carbono (%)					Média Classe
		Folha	GV	GS	Casca	Lenho	
5,44 - 10,00	8,35	50,24	46,08	44,70	42,52	46,52	39,73
10,00 - 15,00	12,95	50,63	45,70	44,67	43,86	46,59	40,73
15,00 - 21,60	17,66	50,12	45,81	45,23	43,49	46,63	41,49

Os teores de carbono encontrados neste trabalho, comparativamente com os outros trabalhos citados, confirmam que o compartimento folhas apresenta teores superiores aos encontrados nos outros compartimentos. De maneira geral, também foi possível observar que os teores de carbono dificilmente ultrapassam valores de 50%, exceto para o compartimento folhas. Segundo Dallagnol et al. (2011) apud Taiz e Zeiger (2009), era de se esperar que as folhas apresentassem o maior teor de carbono, uma vez que são os principais compartimentos da planta responsáveis pelo processo fotossintético. Conforme complementam os autores, a rota de fixação normal entre os compartimentos seria: folhagem, galhos, madeira, raiz e casca.

Neste estudo, o lenho foi o componente da árvore que mais contribuiu para a quantidade total de biomassa, e conseqüentemente carbono. Em termos médios para as árvores abatidas, o componente lenho contribuiu com 29,1 kg.árv⁻¹ (74,0%) do carbono presente na biomassa total mensurado, seguido da casca, com 6,5 kg.árv⁻¹ (17,3%), dos galhos vivos com 1,8 kg.árv⁻¹ (4,9%), dos galhos secos com 0,4 kg.árv⁻¹ (1,1%) e das folhas com 1,1 kg.árv⁻¹ (2,8%) (Tabela 8).

Tabela 8 - Estoque de carbono na biomassa aérea em plantios de *Eucalyptus* spp

Fazendas	Idade (Anos)	DAP \bar{x}	Ht \bar{x}	Carbono médio (kg.árv ⁻¹)					Total
				Lenho	Folha	GV	GS	Casca	
F987	2,3	9,1	13,3	10,93	1,36	1,38	0,71	2,33	16,71
F986	3,3	12,6	19,6	20,78	1,60	1,84	0,74	5,74	30,69
F849	4,7	14,0	22,1	30,81	1,13	2,18	0,63	8,02	42,77
F948	6,8	13,7	22,6	27,55	0,84	2,10	0,11	7,11	37,72
F634	8,0	15,4	26,9	55,30	0,78	1,58	0,02	9,34	67,02
Média	5,0	13,0	20,9	29,07	1,14	1,82	0,44	6,51	38,98

DAP \bar{x} = diâmetro à altura do peito (1,30 m) médio; Ht \bar{x} = altura média das árvores abatidas.

Os valores, em termos percentuais médios, para as contribuições dos componentes casca, lenho, folha e galhos, no estoque do carbono total por indivíduo nas cinco fazendas avaliadas, podem ser graficamente visualizados na Figura 20.

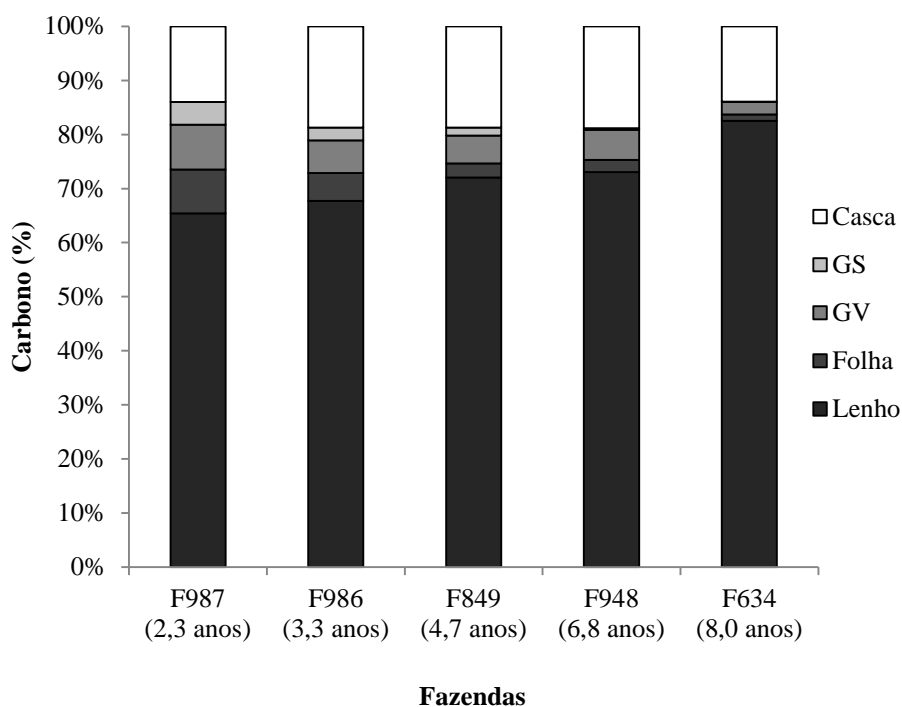


Figura 20 - Percentual de carbono nos compartimentos arbóreos em povoamentos de *Eucalyptus* spp. em diferentes localidades ordenadas pela idade

Neste estudo, confirmando resultados apresentados por Neves (2000) e Gatto et al. (2011), o lenho, como já verificado, foi o componente que mais contribuiu para o estoque de carbono total presente na biomassa área total. Além disso, verificou-se também na Figura 20 que quanto maior a idade do povoamento florestal, maior foi o acúmulo de lenho na biomassa, e maior a participação deste componente para o estoque de carbono total.

Na fazenda F987, com aproximadamente dois anos de idade, o lenho contribuiu com 65,4% ($10,93 \text{ kg.}\dot{\text{a}}\text{rv}^{-1}$) do carbono presente na biomassa total para um indivíduo arbóreo de eucalipto, enquanto que para as fazendas F849 com praticamente cinco anos e F634 com praticamente oito anos, as participações em termos percentuais de componente lenho para o estoque de carbono foram de 72,0% ($30,8 \text{ kg.}\dot{\text{a}}\text{rv}^{-1}$) e 82,5% ($55,3 \text{ kg.}\dot{\text{a}}\text{rv}^{-1}$), respectivamente. O comportamento apresentado para o lenho nos permite inferir que o percentual de carbono no lenho apresenta taxas maiores em povoamentos de eucaliptos com idades maiores.

Ao contrário do observado pelo componente lenho, nas fazendas F987, F849 e F634 as folhas contribuíram com 8,1% ($1,3 \text{ kg.}\dot{\text{a}}\text{rv}^{-1}$), 2,6% ($1,1 \text{ kg.}\dot{\text{a}}\text{rv}^{-1}$) e 1,2% ($0,8 \text{ kg.}\dot{\text{a}}\text{rv}^{-1}$), para o estoque total de carbono médio, respectivamente. Isto nos permite inferir, que este componente tende a contribuir menos para o estoque de carbono em povoamentos mais velhos.

Para o componente galho vivo, observaram-se também participações menores desse compartimento em povoamento mais velhos. Para as fazendas F987, F849 e F634 os galhos vivos contribuíram com 8,27% (1,4 kg.árv⁻¹), 5,1% (2,2 kg.árv⁻¹) e 2,4% (1,6 kg.árv⁻¹), respectivamente.

Os galhos secos, em função da sua biomassa reduzida, contribuíram menos para o estoque total de carbono médio em povoamentos de eucaliptos. Para as fazendas F987, F849 e F634 os galhos vivos contribuíram com 4,2% (0,7 kg.árv⁻¹), 1,5% (0,6 kg.árv⁻¹) e 0,03% (0,02 kg.árv⁻¹), respectivamente.

O componente casca teve um comportamento diferenciado dos demais componentes avaliados. Em termos gerais, para o estoque de carbono total médio, observou-se uma menor participação deste componente para o estoque de carbono em povoamentos com idades menores de cinco anos, uma maior participação em povoamentos com idades em torno cinco anos, e novamente uma menor participação em povoamentos com idades superiores a cinco anos. Para a fazenda F987, a casca contribuiu com 13,9% (2,3 kg.árv⁻¹) do carbono presente na biomassa total mensurada, enquanto que para as fazendas F849 e F634 este compartimento contribuiu com 18,7% (8,0 kg.árv⁻¹) e 13,9% (9,3 kg.árv⁻¹), respectivamente.

A distribuição percentual da biomassa e o estoque total nos diferentes componentes das árvores, estão fortemente associados ao tipo de espécie, idade, material genérico, qualidade de sítio, densidade de plantio e fases de crescimento da planta (SCHUMACHER et al., 2011). Stape et al. (2008), em plantios localizados no sul da Bahia, verificaram que as folhas de *E. grandis* x *urophylla* armazenaram 8,8% do C total da árvore, os galhos 7,8% e o lenho 83,4%. Gatto et al. (2011), estudando a contribuição dos compartimentos da árvore para o estoque de biomassa total em um povoamento de *Eucalyptus* spp. ao Centro-Leste de Minas Gerais com 120 meses de idade, verificaram que o lenho, o componente de maior interesse comercial, correspondeu, em média, a 64,7% da biomassa total, seguida pelo sistema radicular com 13,5%, serapilheira com 9,7%, casca com 7,3%, galhos com 3,3 e folhas com 1,5%.

Schumacher e Caldeira (2001) estimaram a biomassa total acima do solo, em povoamento de *E. globulus*, com 4 anos de idade, e verificaram que o compartimento lenho contribuiu com 69% da biomassa total, seguida das folhas, galhos e casca. Em Alves (2007), em um experimento de clones de eucaliptos cultivados em Araripina, a biomassa distribuída ficou na seguinte ordem: fuste (70%), galhos (13%), casca (9%) e folhas (8%).

Para os principais componentes das árvores analisadas neste estudo (lenho comercial e parte residual), verificou-se que, em termos médios, o lenho comercial contribuiu com 68,9%

(27,11 kg.árv⁻¹) e a parte residual contribuiu em média com 31,1% (11,9 kg.árv⁻¹) (Tabela 9 e Figura 21).

Tabela 9 - Estoque de carbono médio presente na biomassa seca do lenho comercial e parte residual em plantações de *Eucalyptus* spp

Fazenda	Idade (Anos)	DAP \bar{x}	Ht \bar{x}	Estoque de carbono médio (kg.árv ⁻¹)		
				Lenho comercial	Parte Residual	Total
F987	2,3	9,1	13,3	10,18	6,53	16,71
F986	3,3	12,6	19,6	19,36	11,34	30,69
F849	4,7	14,0	22,1	28,70	14,07	42,62
F948	6,8	13,7	22,6	25,66	12,06	37,72
F634	8,0	15,4	26,9	51,52	15,50	67,02
Média	5,0	13,0	20,9	27,08	11,90	38,98

Os valores médios de estimativa de estoque de carbono total, no lenho comercial e parte residual dispostos por classe diamétrica estão apresentados na Tabela 10. Observa-se que os valores de estoque de carbono estão associados às classes diamétricas, e que quanto maior a classe diamétrica, maior é o estoque de carbono presente na árvore.

Tabela 10 - Estoque de carbono médio presente na biomassa seca do lenho comercial e parte residual em plantações de *Eucalyptus* spp. por classes diamétricas

Classes	DAP médio	Estoque de carbono médio (kg.árv ⁻¹)		
		Lenho comercial	Parte Residual	Total
5,44-10,0	8,35	8,32	4,13	12,45
10,0-15,0	12,95	21,24	10,58	31,72
15,0-21,60	17,66	51,22	21,33	72,55

Analisando os componentes lenho comercial e parte residual por um perspectiva gráfica, torna-se mais evidente que esses componentes tiveram comportamentos diferenciados quanto a contribuição para o estoque de carbono total. Em geral, observa-se uma crescente participação do lenho comercial no estoque de carbono total à medida que povoamentos envelhecem. Por outro lado, o inverso foi observado pela parte residual (Figura 21).

O lenho comercial contribuiu para o estoque de carbono total em termos médios com 60,9% (10,1 kg.árv⁻¹) para a fazenda F987, 67,3% (28,7 kg.árv⁻¹) para a fazenda F849 e 76,8% (51,5 kg.árv⁻¹) para fazenda F634. Por outro lado, com um comportamento inverso a parte residual contribuiu com 39,1% (6,5 kg.árv⁻¹), 33,2% (14,1 kg.árv⁻¹), 23,1% (15,5 kg.árv⁻¹) para as fazendas F987, F849 e F634, respectivamente.

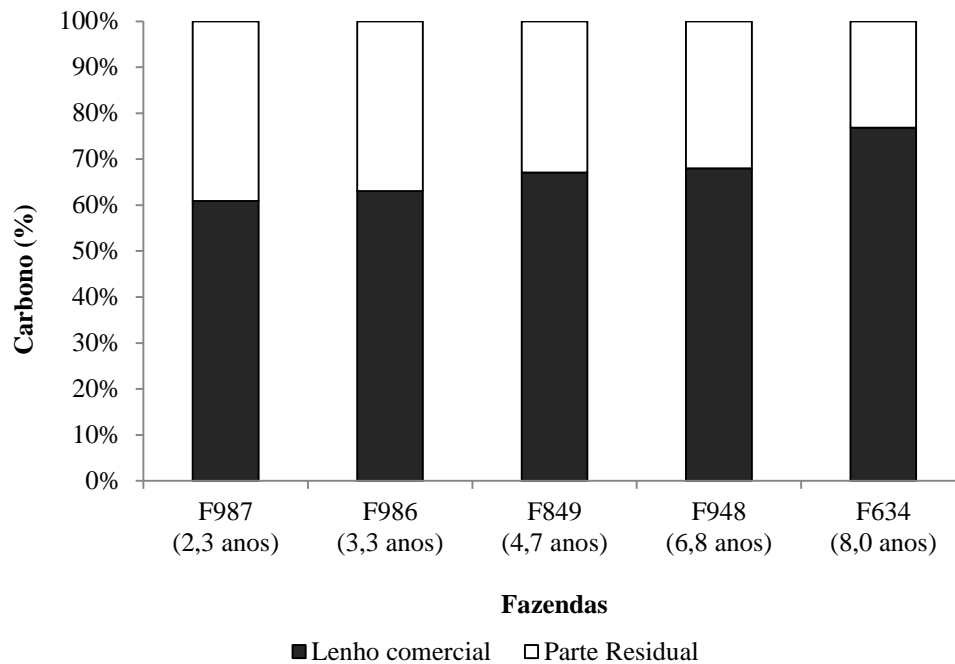


Figura 21 - Percentual de carbono nos compartimentos arbóreos lenho comercial e parte residual em povoamentos de *Eucalyptus* spp. em diferentes localidades ordenadas pela idade

3.3.2 Modelos ajustados para as estimativas do estoque de carbono em nível de árvores

Os modelos ajustados pelas regressões estatísticas que usaram relações lineares para estimar o logaritmo do teor de carbono total, no lenho comercial e nos componentes residuais, da árvore em função dos respectivos logaritmos do diâmetro à altura do peito (DAP) e logaritmo da altura total (Ht), podem ser apreciados na Tabela 11.

Tabela 11 - Modelos de regressões ajustados para a estimativa do estoque de carbono total da parte aérea da árvore, lenho comercial e resíduo, baseado na coleta destrutiva de amostras em 56 árvores

Modelos preditivos do carbono na árvore	R^2_{ajd}	r_{xy}	S_{yx}	RMSE (kg.árv ⁻¹)	RMSE (%)
$\text{Ln}(C_{total}) = - 2.87 + 1.95 \text{Ln}(dap) + 0.44\text{Ln}(Ht)$	0,97	0,98	0,12	4,57	12,38
$\text{Ln}(C_{leco}) = - 3.89 + 1.72 \text{Ln}(dap) + 0.83\text{Ln}(Ht)$	0,97	0,98	0,12	2,73	11,04
$\text{Ln}(C_{rsd}) = - 2.61 + 2.49 \text{Ln}(dap) + 0.47\text{Ln}(Ht)$	0,97	0,97	0,12	1,44	11,24

R^2_{ajd} : Coeficiente de determinação ajustado; r_{xy} : Correlação linear de Pearson entre os valores observados versus os valores estimados; S_{yx} : Erro padrão residual; RMSE: Raiz quadrada do erro quadrático médio absoluto e percentual.

Analisando os parâmetros selecionados para avaliar a qualidade dos ajustes estatísticos apresentados na Tabela 11, verifica-se que as três equações se ajustam bem aos dados observados. Segundo os coeficientes de determinação ajustados (R^2_{ajd}), o logaritmo das

variáveis DAP e Ht apresentam um poder explicativo que varia em torno de 97% do comportamento da variável resposta carbono. Além disso, verifica-se também um alto índice de correlação linear de Pearson entre os valores estimados e observados. Adicionalmente observam-se baixos erros dos modelos representados pelos valores encontrados nos RMSEs, o que garante uma maior exatidão aos modelos ajustados.

Os coeficientes que compõem os modelos ajustados foram todos significativos a um nível de 99% de probabilidade, pelo teste *t* de Student (Tabela 12).

Tabela 12 - Estatísticas para os coeficientes dos modelos empregados para a estimativa do carbono total e nos componentes da árvore pelo inventário convencional

Modelos	Variáveis	Estimativa	SE	t valor	Pr (> t)	Sign.
Ln(C _{total})	Intercepto	-2,87	0,21	-13,61	$<2,0 \times 10^{(-16)}$	***
	Ln(DAP)	1,95	0,12	16,02	$<2,0 \times 10^{(-16)}$	***
	Ln(Ht)	0,44	0,14	3,15	0,0028	**
Ln(C _{leco})	Intercepto	-3,89	0,21	-18,16	$<2,0 \times 10^{(-16)}$	***
	Ln(DAP)	1,72	0,12	14,25	$<2,0 \times 10^{(-16)}$	***
	Ln(Ht)	0,83	0,13	6,03	$2,62 \times 10^{(-7)}$	***
Ln(C _{rsd})	Intercepto	-2,61	0,19	-13,41	$<2,0 \times 10^{(-16)}$	***
	Ln(DAP)	2,49	0,12	20,89	$<2,0 \times 10^{(-16)}$	***
	Ln(Ht)	-0,46	0,13	-3,456	0,00116	**

SE: Erro padrão; Sign.: Significância: '***' 0,001, '**' 0,01.

Observando os resultados obtidos pelos testes de Shapiro-Wilk e Breusch-Pagan na Tabela 13, verifica-se que os modelos preditivos do carbono foram todos aceitos quanto aos pressupostos da normalidade e homogeneidade de variâncias.

Tabela 13 - Teste de normalidade pelo método do Shapiro-Wilk e homogeneidade de variâncias pelo teste de Breusch-Pagan para os modelos ajustados

Modelos	Shapiro-Wilk		Breusch-Pagan	
	Estatística	Sign.	Estatística	Sign.
Ln(C _{total})	0,98	0,52	2,98	0,08
Ln(C _{leco})	0,97	0,47	3,21	0,07
Ln(C _{rsd})	0,97	0,27	3,21	0,07

Sign: Significancia do teste a 95 % de probabilidade. Sign. > 0,05, não rejeita a hipótese de que os dados apresentam distribuição normal e homogeneidade de variâncias.

As estatísticas de posição referentes aos valores observados do carbono e estimados pelos modelos ajustados resumidas na Tabela 14 confirmam que os modelos se ajustaram adequadamente os dados.

Tabela 14 - Estatísticas de posição referente ao carbono observado e estimado ($\text{kg.}\dot{\text{a}}\text{rv}^{-1}$)

Carbono		N	Mín	I.Q	Mediana	Média	III. Q	Máx
Ln(C_{total})	Observado	52	4,65	16,72	33,10	36,94	54,09	92,95
	Estimado		4,34	19,25	34,97	36,50	54,03	84,43
Ln(C_{leco})	Observado	49	2,70	11,32	22,48	24,79	34,98	57,07
	Estimado		2,64	12,93	24,09	24,56	35,00	55,82
Ln(C_{rsd})	Observado	48	1,96	5,73	12,52	12,89	17,86	30,33
	Estimado		1,73	6,73	12,03	12,80	17,32	32,33

N: número de observações, Mín: mínimo, I.Q: primeiro quartil, III.Q: terceiro quartil e Max: máximo

Os ajustes estatísticos dos modelos, quando analisados segundo uma perspectiva gráfica (item “a” nas Figuras 22-24) também confirmam que os valores estimados se aproximam dos valores observados. Os parâmetros estatísticos testados para validade dos modelos confirmam esse comportamento, pois representam graficamente valores de RMSE e r coerentes com os apresentados na Tabela 11.

Nas relações entre os valores de carbono observados em campo versus estimados pela validação cruzada (item “c” nas Figuras 22-24), verifica-se que os modelos, tanto para a estimativa do carbono total como para a estimativa do carbono no lenho comercial e nos resíduos da árvore, refletem coerência e acurácia. A precisão dos modelos indicada pela alta correlação de Pearson e baixo RMSE também é confirmada pela validação cruzada (item “b” nas Figuras 22-24). A exatidão das estimativas é complementarmente confirmada pela relativamente baixa amplitude dos valores dos resíduos ordinários aleatoriamente distribuídos ao longo de todo o intervalo de predição (item “d” nas Figuras 22-24).

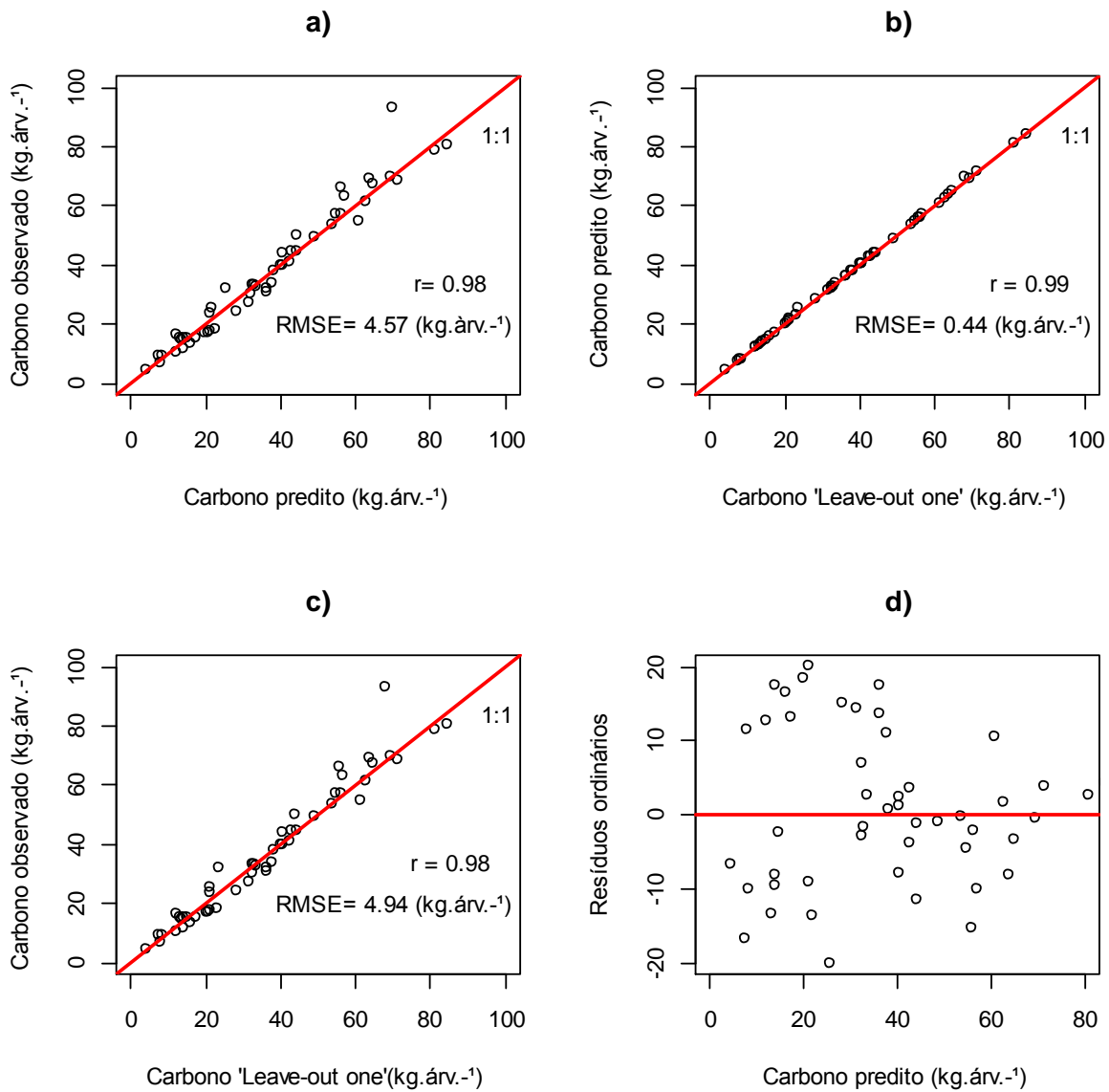


Figura 22 - Relação valores observados versus estimados para carbono total (N=52): a) carbono observado versus estimado; b) carbono estimado pelo modelo versus carbono estimado na validação cruzada; c) carbono observado versus carbono estimado pela validação cruzada e d) resíduos ordinários versus carbono estimado

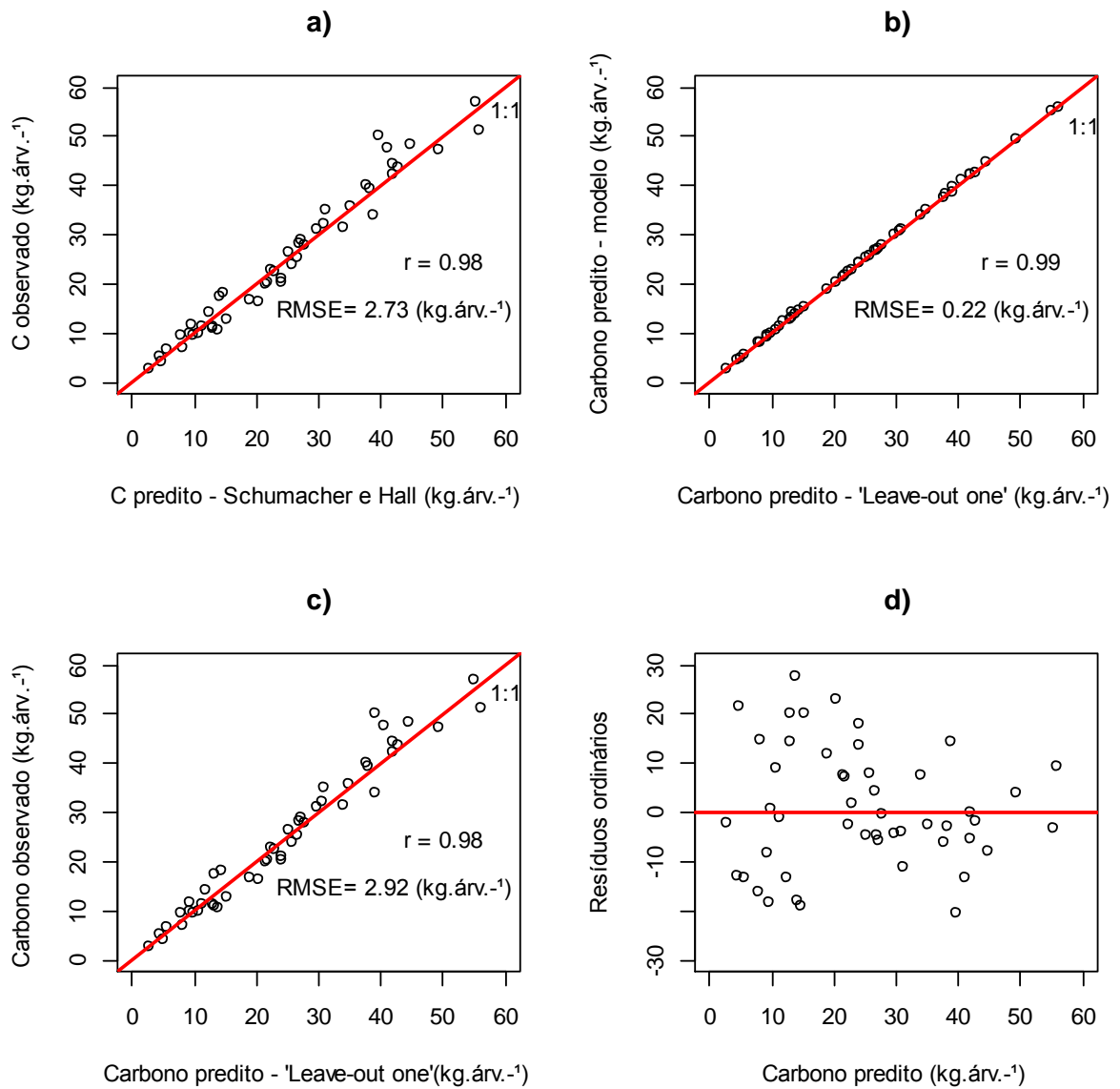


Figura 23 - Relação valores observados versus estimados para carbono no lenho comercial (N=48): a) carbono observado versus estimado; b) carbono estimado pelo modelo versus carbono estimado na validação cruzada; c) carbono observado versus carbono estimado pela validação cruzada e d) resíduos ordinários versus carbono estimado

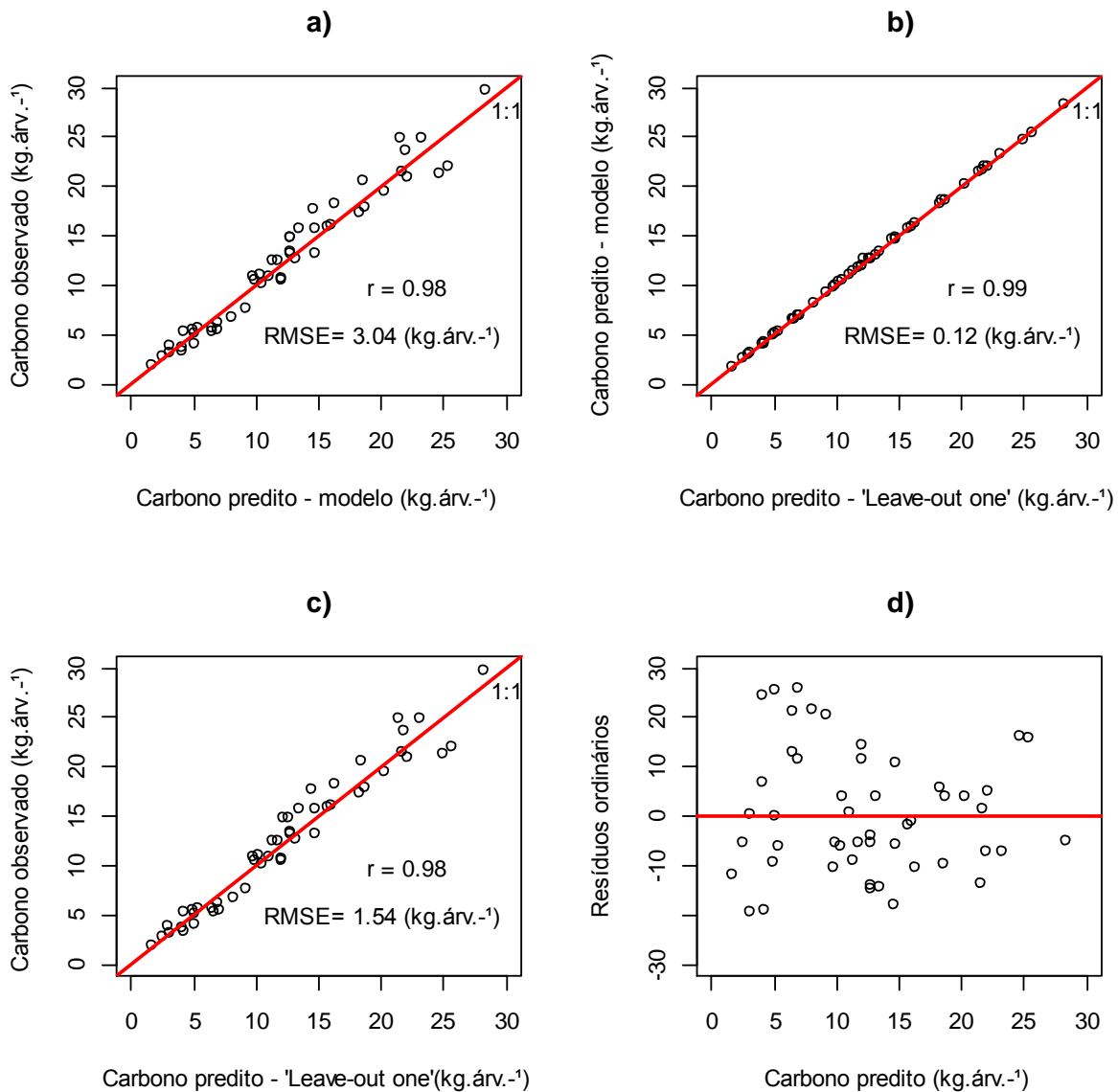


Figura 24 - Relação valores observados versus estimados para carbono nos componentes residuais da árvore (N=52): a) carbono observado versus estimado; b) carbono estimado pelo modelo versus carbono estimado na validação cruzada; c) carbono observado versus carbono estimado pela validação cruzada e d) resíduos ordinários versus carbono estimado

3.4 Conclusões

Após as análises, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- i) O teor de carbono médio presente na biomassa aérea florestal (lenho, folhas, casca, galhos) foi de 46,33%;
- ii) O lenho contribuiu, em termos médios, com 74,0% (29.1 kg. árv.⁻¹) do carbono presente na biomassa total mensurado por indivíduo, seguido da casca, com

- 17,64% (6,8 kg.árv⁻¹), dos galhos vivos com 4,9% (1,9 kg.árv⁻¹), das folhas com 2,8% (1,1 kg.árv⁻¹) e dos galhos secos com 1,1% (0,4 kg.árv⁻¹);
- iii) O lenho comercial e a parte residual das árvores em termos médios contribuíram com 68,9% (27,11 kg.árv⁻¹) e 31,1% (12,33 kg.árv⁻¹) do carbono presente na biomassa seca total das árvores abatidas em campo;
- iv) As equações para estimativa do carbono presente na biomassa total, lenho comercial e parte residual (folha, galho, ponteiro do fuste e casca) de árvores individuais de eucalipto, em função do logaritmo do diâmetro a altura do peito (DAP) e do logaritmo da altura total da árvore (Ht), apresentaram-se precisas e acuradas, com coeficientes de determinação (R^2) da ordem de 97,0%, coeficiente de correlação de Pearson (r) e Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE%) para os valores observados e estimados da ordem de 0,97 a 0,98 e 11,04 a 12,38%, respectivamente;
- v) E, espera-se que os modelos ajustados possa servir para obtenção das estimativas do estoque de carbono que serão modeladas com dados LiDAR no capítulo seguinte.

Referências

ALVES, A.M.C. **Quantificação da produção de biomassa e do teor de carbono fixado por clones de eucalipto, no pólo gesseiro do Araripe – PE**. 2009. 143 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011**. 7. ed. Brasília, 2012. 150 p.

BREUSCH, T.S.; PAGAN, A.R. A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. **Econometrica**, Philadelphia, v. 47, n. 5, p. 1287–1294, Sept. 1979.

CASTRO, E.A. de. **Biomass, nutrient pools and response to fire in the Brazilian Cerrado**. 1996. 128 p. Thesis (Master of Science) – Oregon State University, Oregon, 1996.

DALLAGNOL, F.S.; MOGNON, F.; SANQUETTA, C.R.; CORTE, A.P. . Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus compartimentos. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 4, p. 410-416. out./dez. 2011.

GATTO, A.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; SILVA, I.R.D.; LEITE, H.G.; VILLANI, E.M.A. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 895-905, abr. 2011.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Land use change and forestry. In: _____. **Revised 1996 guidelines for national GHG inventories**: reference manual. Geneva, 1996. p.5.1-5.75.

MELLO, S.L.M.; GONÇALVES, J.L.M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 101-111, jan. 2008.

NEVES, J.C.L. **Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo**. 2000. 191 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2000.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America; American Society of Agronomy, 1996. pt. 3: Chemical methods, p. 961-1010.

PAIXÃO, F.A. **Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de alternativas de uso de um povoamento de eucalipto**. 2004. 50 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004

PAIXÃO, F.A.; SOARES, C.P.B.; JACOVINE, L.A.G.; SILVA, M.L.; LEITE, H.G.; SILVA, G.F. Quantificação do estoque de carbono e análise econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 411-420, maio 2006.

REIS, M.G.F.; KIMMINS, J.P.; RESENDE, G.C.; BARROS, N.F. Acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no Cerrado, em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 9, n. 2, p. 149-162, abr. 1985.

REZENDE, A.V. O estoque de carbono no cerrado: um estudo de caso. In: SANGUETA, C. R.; WATZLAWICK, L.F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M.A.B. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: Imprensa Universitária, 2002. p. 175-191.

SANQUETTA, C.R.; WATZLAWICK, L.F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M.A.B. **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, Imprensa Universitária, 2002. 265 p.

SILVA, R.F.; SOARES, C.P.B.; JACOVINE, L.A.G.; SILVA, L.M.; LEITE, H.G.; SILVA, G.F. Projeção do estoque de carbono e análise da geração de créditos em povoamentos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 979-992, out. 2008.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H.S.; SANQUETTA, C.R.; ARCE, J.E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 185-266, jan./mar. 2008.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H.S.; SANQUETTA, C.R.; ARCE, J.E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 185-266, jan./mar. 2008.

SCHUMACHER, F; HALL, F. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 47, p. 719-734, 1933.

SCHUMACHER, M.V.; WITSCHORECK. R.; CALIL, F.N. Biomassa em povoamentos de *Eucalyptus* spp. de pequenas propriedades rurais em Vera Cruz, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 17-22, jan./mar. 2011.

SOARES, C.P.B.; OLIVEIRA M.L.R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 533-539, set. 2002.

SOARES, C.P.B., LEITE, H.G.; GÖRGENS, E.B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 711-718, set. 2005

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, London, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, Dec. 1965.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 3/4.p. 920–930, Sept. 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p.

TRUGILHO, P.F.; ARANTES, M.D.C.; PÁDUA, F.A.; ALMADO, R.P.; ANA, E.R.B. Estimativa de carbono na madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 33-40, jan. 2010.

YU, C.M. **Sequestro florestal do carbono no Brasil**: dimensões políticas socioeconômicas e ecológicas. São Paulo: Annablume; IEB, 2004. 280 p.

4 ESTIMATIVAS DO ESTOQUE DE CARBONO NA BIOMASSA AÉREA FLORESTAL COM O USO DA TECNOLOGIA LIDAR

Resumo

A comunidade científica internacional tem alertado para um aumento acentuado das concentrações de dióxido de carbono na atmosfera terrestre, e para o efeito desse aumento sobre as mudanças climáticas. Parte do carbono liberado para a atmosfera tem origem na variação dos estoques que constituem a biomassa florestal e que, devido ao desmatamento em diversas regiões do planeta, tem diminuído nas últimas décadas. O monitoramento dos estoques de carbono na biomassa florestal, portanto, é uma atividade essencial para o entendimento da forma como as florestas se relacionam com as mudanças climáticas. Atualmente os métodos existentes para medir o estoque de carbono na biomassa florestal são caros e demorados, principalmente se realizados em extensas áreas. É fundamental aprimorar a eficiência e precisão dos métodos de quantificação de carbono tanto em florestas nativas como plantadas. Em especial, as florestas plantadas de rápido crescimento se caracterizam pela rapidez com que absorvem e convertem carbono disponível na atmosfera em biomassa. A quantificação dos estoques de carbono nessas florestas, em geral cara e imprecisa, pode ser grandemente simplificada com o uso de equipamentos laser aerotransportados. Nesse sentido, o presente trabalho avaliou o uso de dados gerados pela tecnologia LiDAR (Light Detection And Ranging) aerotransportada (Airborne LASER scanning) para estimar o estoque de carbono total, lenho comercial e parte residual presentes na biomassa aérea em plantações de *Eucalyptus* spp.. No campo, foram coletados dados biométricos em parcelas convencionais de inventário, e derrubadas árvores para a coleta de material que posteriormente em laboratório permitiu a precisa aferição do seu conteúdo de carbono. Os dados gerados nessas atividades foram correlacionados com as métricas produzidas pelo levantamento LiDAR. Usadas como variáveis independentes, essas métricas foram correlacionadas com os dados de campo para a construção dos modelos de carbono. O processamento e análise de dados LiDAR foram realizados em softwares de acesso livres e os modelos construídos foram avaliados segundo a raiz quadrada do erro médio (RMSE), coeficiente de determinação (R^2) e correlação de Pearson (r). Para o estoque de carbono total, o melhor modelo resultou em um R^2 de 0,89, RMSE de $7,48 \text{ Mg ha}^{-1}$ (13,17%) e r de 0,92; para o estoque de carbono em toras comerciais o melhor modelo mostrou R^2 igual a 0,91, RMSE de $5,03 \text{ Mg ha}^{-1}$ (13,26%) e r de 0,94, e para o estoque de carbono presente na parte residual o melhor resultado indicou um R^2 de 0,85, RMSE de $2,47 \text{ Mg ha}^{-1}$ (13,27%) e r de 0,89. Tomando como referência as parcelas localizadas em plantios com a idade de 6,1 anos, as amostras apontaram para uma estimativa do estoque de carbono de $69,76 \text{ Mg.ha}^{-1}$ para o carbono total, de $47,67 \text{ Mg.ha}^{-1}$ para o lenho comercial e de $21,65 \text{ Mg.ha}^{-1}$ para a parte residual. Desta forma, com os resultados obtidos nesse trabalho, constata-se que os dados LiDAR podem ser aplicados para as estimativas do estoque de carbono total, lenho comercial e parte residual da biomassa aérea em plantações de *Eucalyptus* spp, com elevada acurácia quando comparados aos métodos convencionais de inventário.

Palavras-chave: LiDAR; Perfilhamento a LASER aerotransportado; Estoque de carbono; *Eucalyptus*

Abstract

The international scientific community has warning for an increase in the concentration of the greenhouse gases (e.g. CO₂) in the atmosphere, and its effect on climate change. Part of the carbon released into the atmosphere comes from deforestation worldwide. The frequent monitoring of the carbon stocks in forest, is an essential for understanding how there forests are relate to climate change. M methods for measuring carbon stocks in forest are usually expensive and time consuming, especially in large areas. Therefore, it is essential to improve methods for quantifying carbon stocks in both natural and commercial forests. Fast growing forests quickly convert CO₂ available in the atmosphere into biomass and are of special interest. The quantification of carbon stocks in large-scale forest plantations are usually very expensive and inaccurate and can be greatly simplified with the use of airborne laser scanning (ALS) technology. This study evaluate airborne LiDAR (Light Detection And Ranging) also known as airborne laser scanning (ALS) techniques to estimate above ground carbon stocks (i.e., the carbon content stored in the commercial logs and residuals of the harvesting process such as bark, leaves and branches). Biometric measurements were collected from conventional forest inventory sample plots. Sampled disks at regular intervals were cutted from the felled trees for a precise determination in the laboratory of their carbon content. The correlation of the Carbon content obtained from these plots was performed with several metrics extracted from the LiDAR data. Several statistical regressions were proposed afterwards. Open source softwares were used to process the LiDAR data and to proceed with the statistical analysis. The best models were selected taking into account their root mean square error (RMSE), coefficient of determination (R²) and Pearson correlation coefficient (r) values. The best model for the above ground carbon content showed a R² of 0.89, a RMSE of 7.48 MgC ha⁻¹ (13.17%) and a r of 0.92. For the commercial logs, the best model showed values of R², RMSE and r values of 0.91, 5.03 Mg ha⁻¹ (13.26%) and 0.94, respectively. The residual part (bark, leaves and branches) showed a R², RMSE and r values equal to 0.85, 2.47 Mg ha⁻¹ (13.27%) and 0.89. The sample plots located in forest at the age of 6.1 years showed an estimate of carbon stock of 69.76 Mg.ha⁻¹ for the above ground section. Whereas 47.67 Mg.ha⁻¹ for the commercial logs and 21.65 Mg.ha⁻¹ for the residual part. This study shows that LiDAR derived metrics can be used to estimate carbon stocks in *Eucalyptus* spp. plantations efficiently.

Keywords: Light detection and Ranging LiDAR; Airborne Laser Scanning ALS; Carbon stock; *Eucalyptus*

4.1 Introdução

O dióxido de carbono (CO₂) é um dos mais importantes gases do efeito estufa (IPCC, 2007), e o aumento da concentração deste gás na atmosfera devido à ação humana, principalmente com a queima de combustíveis fósseis e mudanças do uso da terra, como os desmatamentos florestais, têm potencializado alterações na temperatura da terra, e provocando as mudanças climáticas globais.

As florestas representam um importante estoque natural de carbono. As plantas, através da respiração e fotossíntese, desempenham um importante papel para o equilíbrio do ciclo de carbono pelo processo de emissão e assimilação de CO₂ atmosférico. Segundo

Ketterings et al. (2001), a estimativa de biomassa acima do solo é imprescindível aos estudos do balanço global de carbono, e de acordo como Cerri et al. (2001) o carbono estocado em ecossistemas tropicais (solo e vegetação) representa cerca de 20 a 25 % do carbono terrestre mundial.

As plantações florestais com espécies do gênero *Eucalyptus* são as mais extensas no Brasil, com 4,87 milhões de hectares, correspondendo a 74,8% da área total reflorestada do país (ABRAF, 2012). Preconiza-se que essas plantações florestais, quando bem estabelecidas, podem fixar entre 100 e 400 MgC.ha⁻¹ durante a fase de crescimento (ECOAR, 2003). Neste contexto, a quantificação do estoque de carbono total na floresta, assim como de cada segmento de uma árvore (raiz, tronco, folha, galhos e casca) em florestas de rápido crescimento tem recebido mais atenção, tanto pela possibilidade destas de emitirem CO₂, quanto pelo potencial de servirem como reservatórios de carbono e/ou sumidouros desse gás (CASTRO, 1996; YU, 2004).

As técnicas existentes para mensurar o estoque de carbono em plantações florestais, atualmente são limitadas por questões orçamentárias e temporais, inviabilizando a realização de um inventário completo dentro de um curto espaço de tempo. Recentemente, as técnicas de sensoriamento remoto, combinadas aos sensores ópticos, têm se apresentado como uma alternativa viável para a estimativa do estoque de carbono em florestas plantadas e naturais (HUDAK et al., 2009, 2012; OMASA et al., 2003). Dentre as técnicas de sensoriamento remoto atuais, o LiDAR (*Light Detection and Ranging*) aerotransportado (*Airborne LASER Scanner*) tem surgido com destaque no cenário florestal (HUDAK et al., 2009, 2012; JENSEN, 2009; LEFSKY et al., 1999, 2000, 2002; NÆSSET, 1997; 2002, 2004a, 2004b, 2007; NÆSSET; BJERKNES, 2001; VIERLING et al., 2011).

No Brasil a utilização da tecnologia LiDAR aerotransportado ainda é recente, porém alguns trabalhos já desenvolvidos e publicados por Rodriguez et al. (2010), Zonete et al. (2010), Zandoná (2007) e Macedo (2009), demonstram o grande potencial da tecnologia aerotransportada para estimativas de parâmetros biométricos em povoamentos florestais.

4.1.1 Objetivos

Os objetivos desse estudo foi avaliar o uso da tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) aerotransportada, também conhecida como ALS (*Airborne LASER Scanner*), como ferramenta eficiente e eficaz para estimar o estoque de carbono na biomassa arbórea em plantações de *Eucalyptus* spp.

Mais especificamente, este trabalho teve os seguintes objetivos:

- (i) Avaliar a possibilidade de substituir as variáveis biométricas convencionais medidas em campo por métricas LiDAR nos modelos de estimação de carbono total e o observado no lenho comercial e na parte residual da árvore;
- (ii) Comparar a qualidade das estimativas de carbono total e no lenho comercial, bem como na parte residual da árvore geradas pelas duas abordagens;
- (iii) E, elaborar com base nos modelos gerados e na nuvem de dados LiDAR, mapas que representem a distribuição espacial do estoque de carbono de um plantio de *Eucalyptus* spp.

4.1.2 Hipótese

O presente estudo fundamenta-se na hipótese de que a tecnologia LiDAR gera uma correlação de precisão superior à obtida por outras metodologias florestais convencionalmente utilizadas para o inventário florestal em plantações equiâneas de rápido crescimento no Brasil, tendo como ênfase, principalmente a acurácia nas estimativas do estoque de carbono sequestrado presente na biomassa aérea florestal.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado a partir de dados coletados em um conjunto de parcelas permanentes e temporárias de inventário florestal instaladas em áreas comerciais pertencentes à empresa Fibria Celulose S/A, situada no estado de São Paulo. As parcelas foram distribuídas em oito fazendas, codificadas por: F987, F986, F849, F950, F146, F184, F166 e F634 (Figuras 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, e 37). As fazendas estão localizadas no Vale do Paraíba Paulista, uma das mesorregiões do estado de São Paulo, próximas aos municípios de Jacareí, São Luiz do Paraitinga e Paraibuna (Figura 25). Para escolha das áreas de estudo levou-se em consideração as regiões com maiores diferenças ambientais, tais como o relevo, buscando obter uma maior diversidade de situações na coleta dos dados LiDAR.

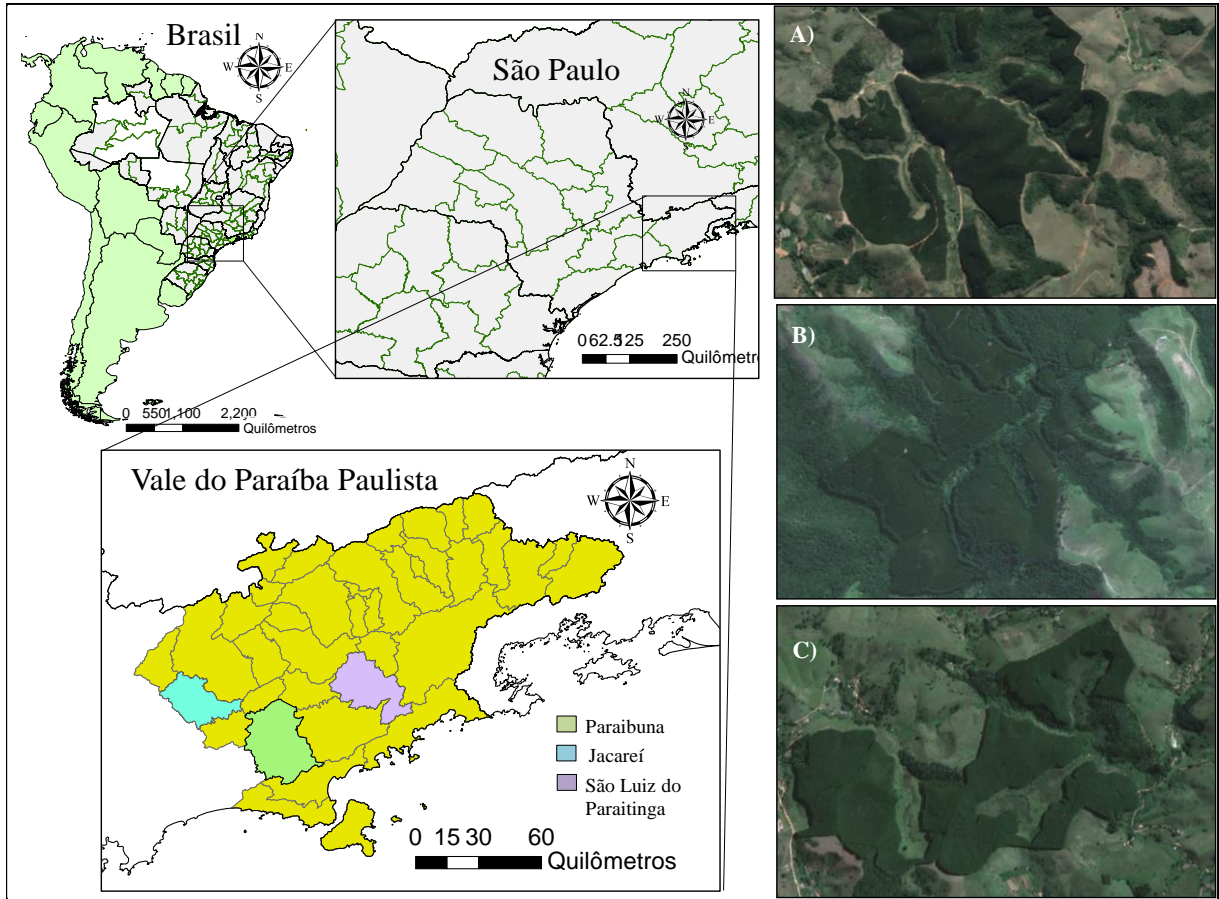


Figura 25 - Ilustração da região de estudo, com destaque às fazendas pertencentes aos municípios de Jacareí, imagem A (coordenadas UTM: 402982 m E; 7416869 m S), Paraibuna, imagem B (coordenadas UTM: 424939 m E; 7408151 m S) e São Luiz do Paraitinga, imagem C (coordenadas UTM: 459893 m E; 7432066 m S), estado de São Paulo

O clima da região, segundo Köppen é do tipo Cwa, caracterizado por um clima temperado úmido, com inverno seco e verão quente. As precipitações anuais encontram-se em torno de 1.200 a 1.232 mm e as temperaturas médias do ar oscilam entre 17,1 °C no mês mais frio (julho) e 23,9 °C em fevereiro. A distribuição da temperatura e da precipitação ao longo dos anos nos municípios pertencentes à área de estudo estão representados nas Figuras (Figura 27, 28, 29). Segundo Macedo (2009), os solos da região são predominantemente do tipo Latossolo Vermelho, com textura argilosa, perfil A moderado ou proeminente, com relevo suave ondulado a forte ondulado ou montanhoso.

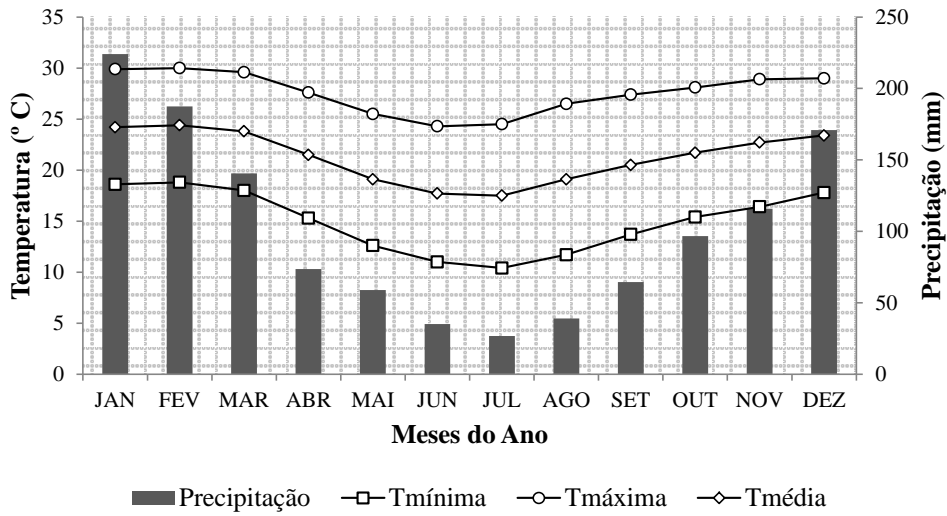


Figura 26 - Distribuição da temperatura do ar e da precipitação ao longo do ano no município de Jacareí, São Paulo. Fonte: Ajustado de CPA (2013)

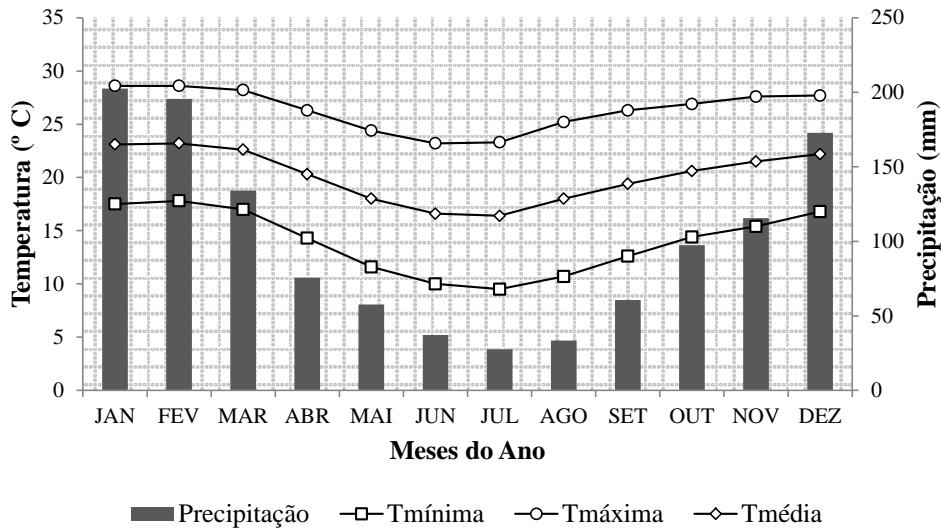


Figura 27 - Distribuição da temperatura do ar e da precipitação ao longo do ano no município de São Luiz do Paraitinga, São Paulo. Fonte: Ajustado de CPA (2013)

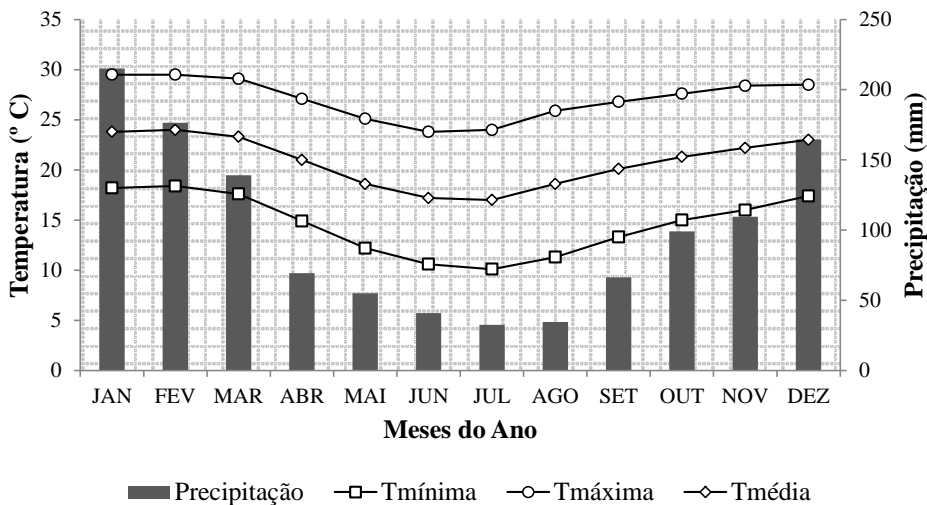


Figura 28 - Distribuição da temperatura do ar e da precipitação ao longo do ano no município de Paraibuna, São Paulo. Fonte: Ajustado de CPA (2013)

As parcelas foram instaladas em plantios clonais de *Eucalyptus* spp., com idades que variam entre dois e oito anos, estratificadas em classes de materiais genéticos, e manejadas por meio de regimes silviculturais de alto fuste em espaçamento médio predominante de 3,0 x 2,0 m, que em média resulta em uma densidade de plantio de 1.667 covas por hectare (Tabela 15).

Tabela 15 - Características das fazendas em estudo

Fazendas	Município (SP)	Área (há)	Idade (anos)	Material Genético
F987_Santa Terezinha VI	Jacareí	39,53	2,3	C219H e P4295H
F986_Santa Terezinha V	Jacareí	94,16	3,3	P4294H
F849_São José III	São Luiz do Paraitinga	138,96	4,7	VR3709H
F950_Urutay	Paraibuna	86,72	5,5	C219H
F184_Santa Cecília	São Luiz do Paraitinga	58,34	5,9	VR3709H
F166_Santa C. Sertãozinho	São Luiz do Paraitinga	84,35	6,1	TC50G
F948_Jataí	Paraibuna	79,33	6,8	VR3709H
F634_Patizal do vale feliz	Paraibuna	84,80	8,0	P4295H e TC31H

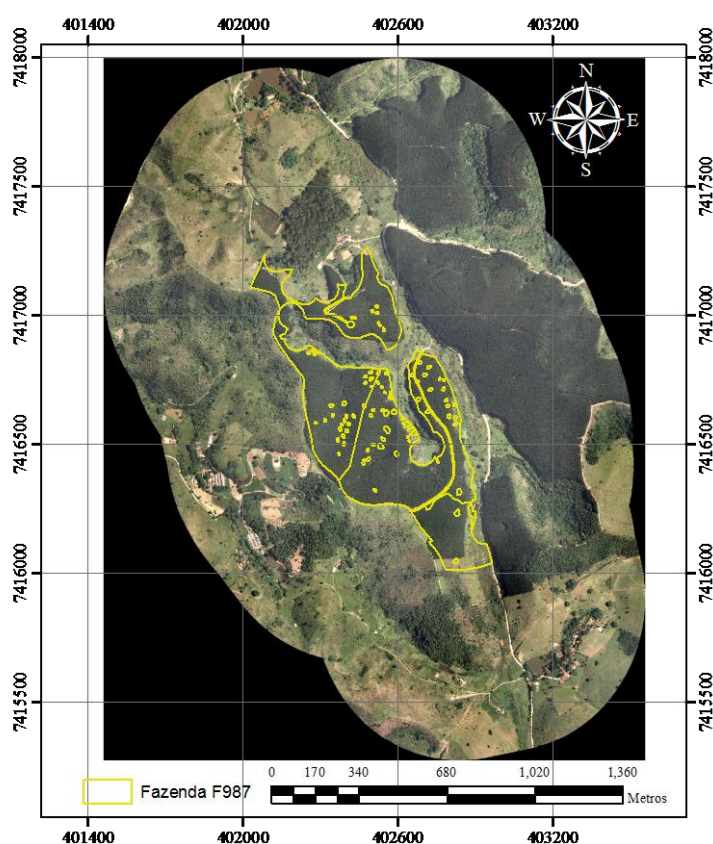


Figura 29 - Área de estudo, fazenda F987_Santa Terezinha VI. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais

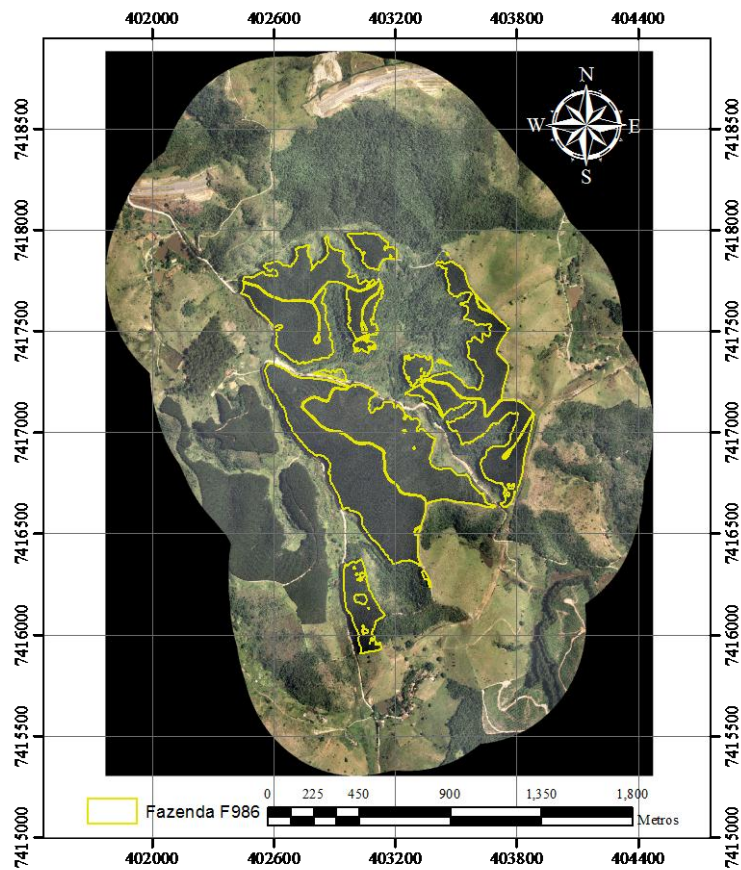


Figura 30 – Área de estudo, fazenda F986_Santa Terezinha V. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais

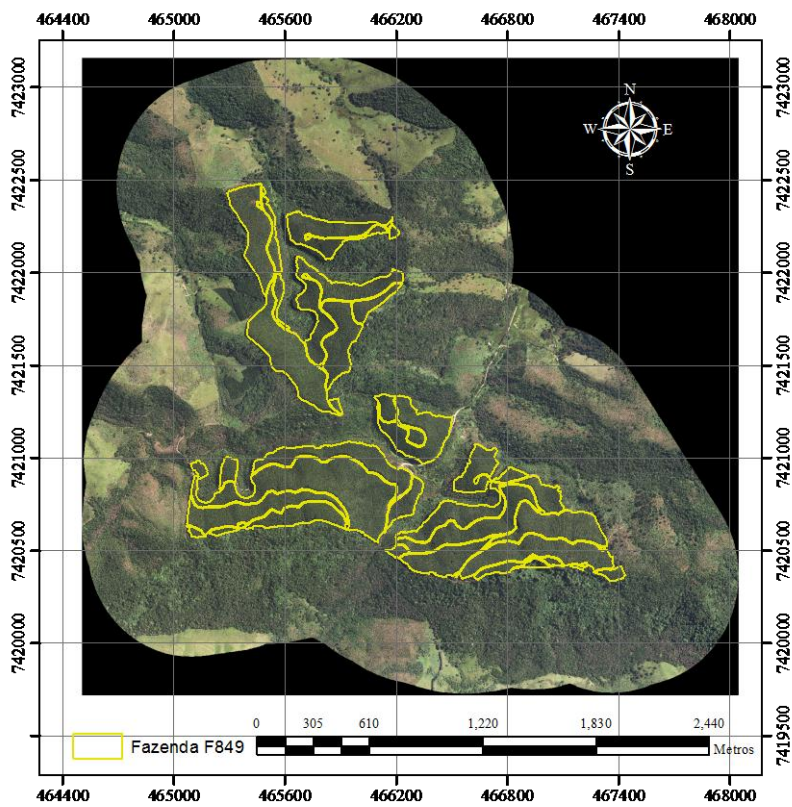


Figura 31 - Área de estudo, fazenda F849_São José III. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais

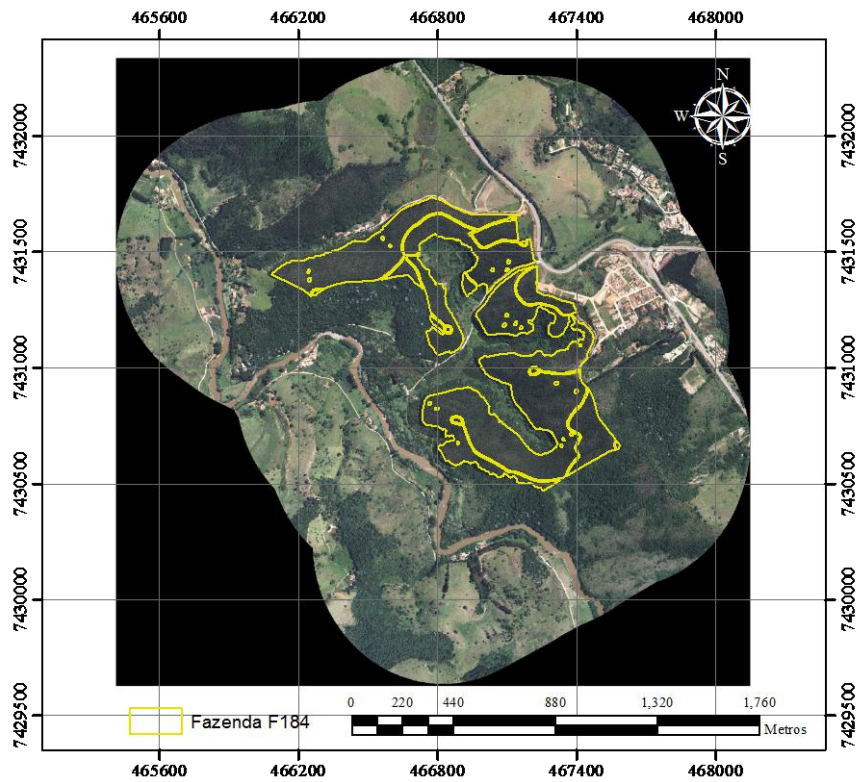


Figura 32 - Área de estudo, fazenda F184_Santa Cecília. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais

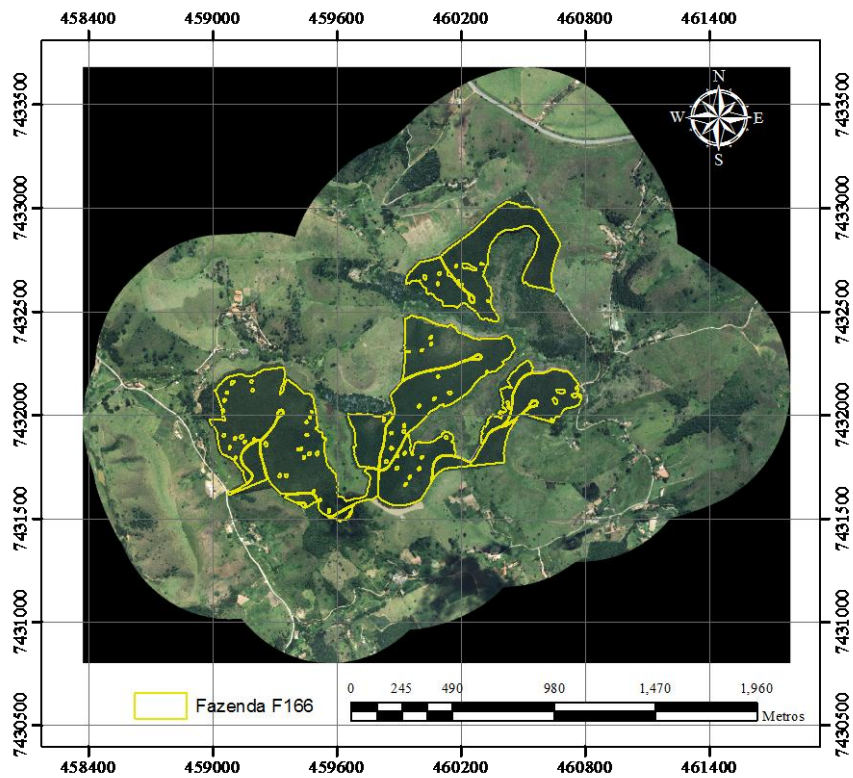


Figura 33 - Área de estudo, fazenda F166_Santa Cruz do Sertãozinho. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais

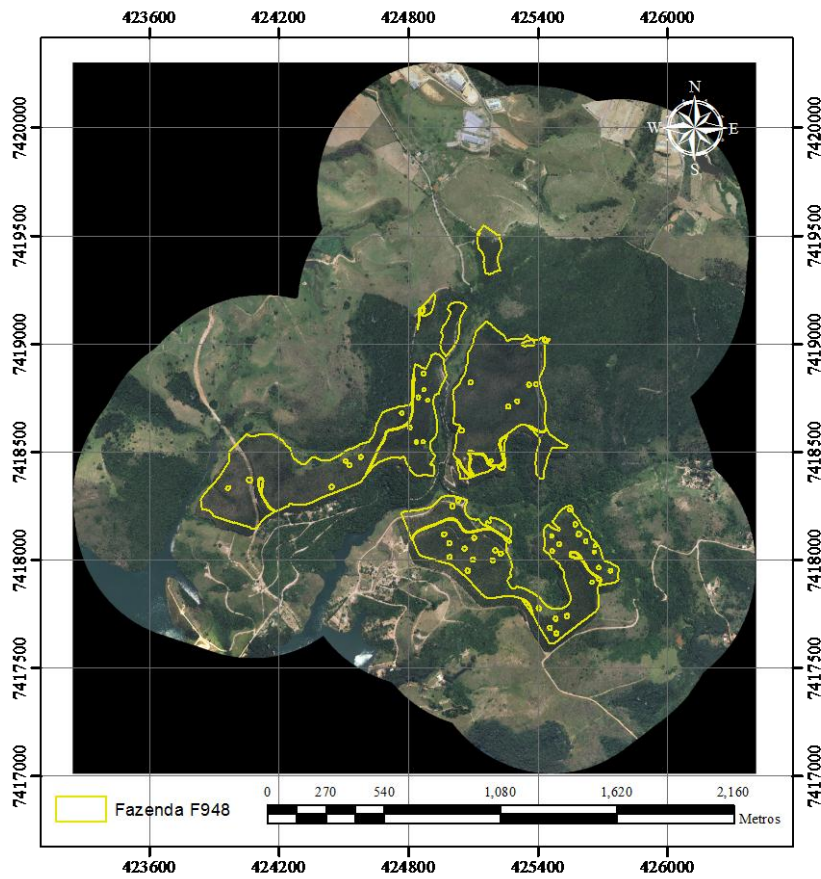


Figura 34 - Área de estudo, fazenda F984_Jataí. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais

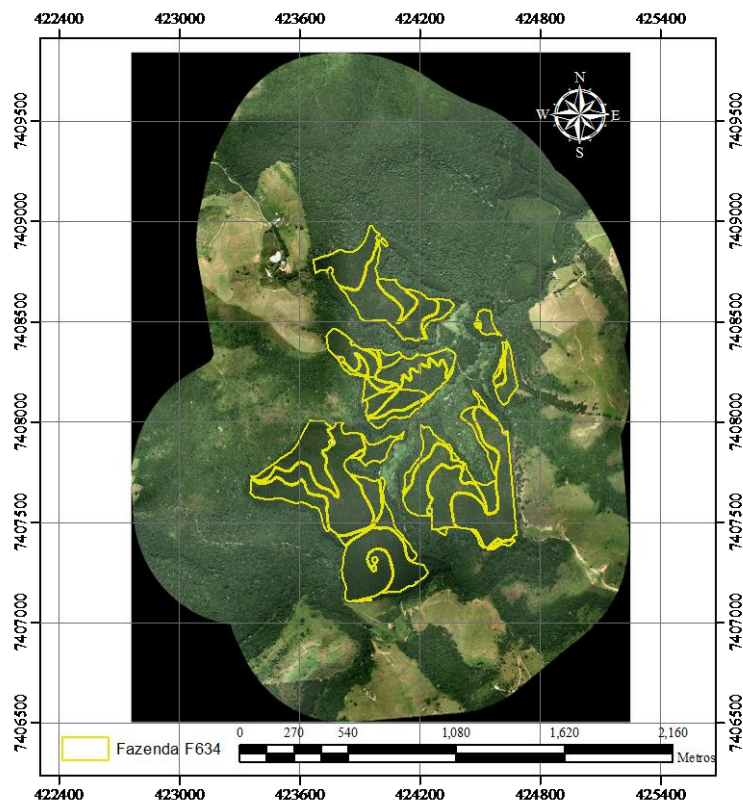


Figura 35 - Área de estudo, fazenda F634_Patzal do vale feliz. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais

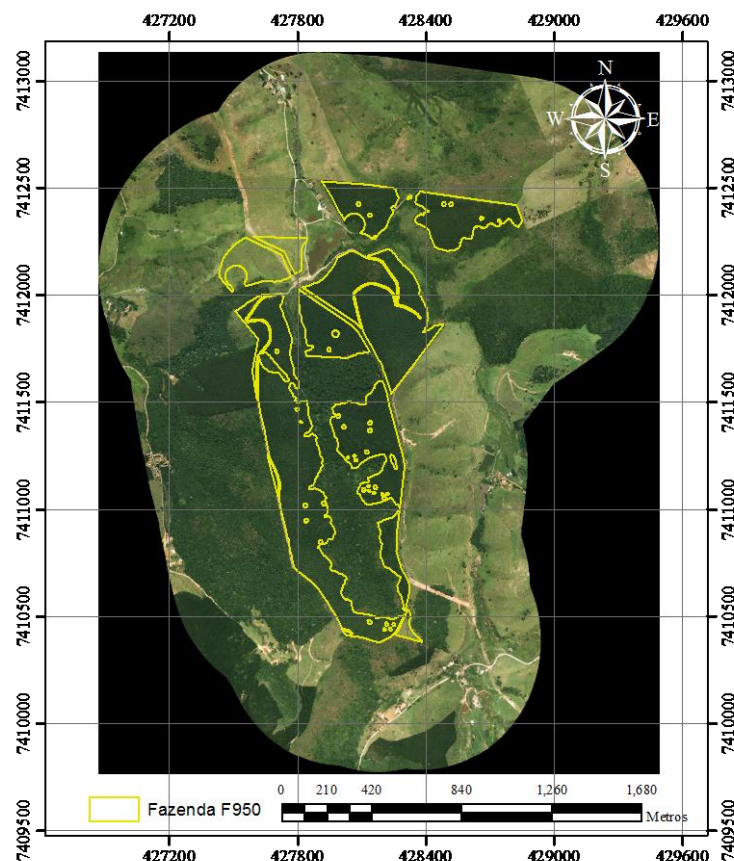


Figura 36 - Área de estudo, fazenda F950_Urutay do Vale Feliz. Fotografia aérea ortoretificada com delimitação dos talhões florestais

4.2.2 Estimativa do estoque de carbono em campo

Para o inventário do estoque de carbono em campo, foram mensuradas 141 parcelas instaladas nas fazendas contempladas com o estudo. As parcelas, de formato circular com área de 400 m², foram todas georeferenciadas com GPS geodésico (modelo Trimble ProXRT), garantindo precisão em escala centimétrica de aproximadamente 10 cm no pós-processamento. Nas parcelas foram contados os indivíduos, avaliados os aspectos fitossanitários e qualitativos das árvores, medidos o diâmetro à altura do peito [DAP (cm)] de todos os indivíduos da parcela e a altura [Ht (m)] de 15% dos indivíduos presentes na parcela. Para a mensuração do DAP foi utilizada suta, e para medição das alturas foi utilizado o clinômetro. Para as árvores na parcela que não tiveram as alturas medidas diretamente, a equipe de inventário da empresa disponibilizou estimativas calculadas a partir de equações hipsométricas de acesso reservado apenas a funcionários da empresa. Os valores médios de DAP e Ht para as parcelas mensuradas nas fazendas contempladas do estudo estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores descritivos de parte das características biométricas da rede de parcelas inventariadas na área de estudo

Fazendas	DAP (cm)		Ht (m)		Nº parcelas	Ind.ha ⁻¹
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ		
F948_Jataí	13.91	0.63	22.69	1.45	12	1550
F634_Patizal	13.70	1.20	23.29	1.68	17	1600
F849_São José III	15.26	1.20	25.24	2.35	26	1465
F184_Santa Cecilia	14.14	0.60	22.16	1.54	14	1675
F166_Santa C. S.	14.57	0.70	23.74	1.19	17	1550
F986_Santa Terezinha V	14.59	0.95	24.17	1.38	21	1650
F987_Santa Terezinha VI	12.73	0.76	18.60	1.45	16	1600
F950_Urutay	8.82	1.57	11.65	2.55	18	1225

\bar{x} : Média, σ : desvio padrão.

Após a mensuração do DAP e da Ht para as árvores presente nas parcelas avaliadas, a estimativa do carbono total, lenho comercial e parte residual (kg.árv.⁻¹) em campo, foram obtidas empregando modelos alométricos em nível de árvore, nos quais empregaram-se como variáveis dependentes os logaritmos do carbono total, lenho comercial e parte residual, e como variáveis independentes os logaritmo do DAP e da Ht, como seguem as equações apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Modelos de regressão ajustados para a estimativa do estoque de carbono total da parte aérea da árvore, lenho comercial e resíduo, baseados na coleta destrutiva de amostras em 56 árvores

Modelos preditivos do carbono na árvore	R ² _{ajd}	r _{xy}	S _{yx}	RMSE (kg.árv. ⁻¹)	RMSE (%)
$\text{Ln}(C_{\text{total}}) = - 2.87 + 1.95 \text{Ln}(\text{dap}) + 0.44\text{Ln}(\text{Ht})$	0,97	0,98	0,12	4,57	12,38
$\text{Ln}(C_{\text{leco}}) = - 3.89 + 1.72 \text{Ln}(\text{dap}) + 0.83\text{Ln}(\text{Ht})$	0,97	0,98	0,12	2,73	11,04
$\text{Ln}(C_{\text{rsd}}) = - 2.61 + 2.49 \text{Ln}(\text{dap}) + 0.47\text{Ln}(\text{Ht})$	0,97	0,97	0,12	1,44	11,24

R²_{ajd}: Coeficiente de determinação ajustado; r_{xy}: Correlação linear de Pearson entre os valores observados versus os valores estimados; S_{yx}: Erro padrão residual; RMSE: Raiz quadrada do erro quadrático médio absoluto e percentual.

Em seguida, as estimativas dos estoques de carbono em Mg.ha⁻¹, foram obtidas conforme a seguinte equação:

$$C_i = \frac{\sum C_{iPj} * 25}{1000}$$

onde:

C_i = Estoque de carbono no i-ésimo compartimento (Mg.ha⁻¹);

C_{ij} = Carbono no i -ésimo (i = total, leco e rsd) compartimento da j -ésima (j = 1,2,3....141) parcela (kg. ha^{-1}).

O resumo das estimativas do estoque de carbono em campo para as fazendas avaliadas está apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Resumo das estimativas de estoque de carbono total, lenho comercial e parte resíduo para as fazendas estudadas (Mg. ha^{-1})

Fazenda	Total		Lenho Comercial		Resíduo		Idade (anos)
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	
F987	14,31	5,29	8,32	3,31	6,44	1,94	2,3
F986	45,45	6,19	28,86	4,36	16,67	1,88	3,3
F849	62,71	6,69	41,72	4,93	20,69	1,94	4,7
F950	63,67	9,96	42,11	6,66	21,27	3,32	5,5
F184	64,59	6,81	43,81	4,81	20,37	2,03	5,9
F166	69,76	9,77	47,67	6,89	21,65	2,91	6,1
F948	60,42	13,12	41,19	9,01	18,86	4,24	6,8
F634	72,54	9,06	50,00	6,75	22,11	2,66	8,0

\bar{x} : Média, σ : desvio padrão.

4.2.3 Estimativa do estoque de carbono via LiDAR

4.2.3.1 Aquisição dados LiDAR

Os dados LiDAR foram adquiridos através de um sistema a Laser Aerotransportado Riegl LMS –Q680I, embarcado em uma aeronave do modelo Piper Seneca II. Os dados referentes ao voo estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Atributos inerentes aos dados de voo, equipamento a laser e resolução espacial a serem utilizadas na coleta dos dados LiDAR

Atributos	Valores
Densidade de pulso laser	10 pontos/m ²
Resolução espacial	0.15m
Bandas	RGB e IR
Resolução espectral	8bits
Velocidade	57 m/s (205.20 km/h)
Altura de voo	422.94 m
Ângulo de varredura	45°
Precisão	10 – 15 cm (Precisão da IMU)
Largura da faixa de cobertura	350,37 m
Frequência de varredura	400 kHz
Câmera	Z/1 DMC
IMU/GPS	Applainix 510
Datum	SIRGAS 2000 / UTM Zona 23S

4.2.3.2 Processamento dos dados LiDAR

Para o processamento dos dados LiDAR utilizou-se o aplicativo FUSION versão 3.3, desenvolvido pelo Serviço Florestal Norte Americano, USDA. O FUSION é um software gratuito e disponível para download na página do *USDA Forest Service*².

Os principais produtos obtidos pelo processamento dos dados LiDAR neste trabalho foram:

- i) Modelo Digital de Terreno (DTM);
- ii) Modelo Digital de Superfície (DSM);
- iii) Modelo Digital de Altura de Copa (CHM);
- iv) Métricas da nuvem de pontos LiDAR.

O processamento teve início aplicando-se a ferramenta *catalog* para produzir informações descritivas da nuvem de pontos LiDAR. Os DTMs e os DSMs, ambos com resolução de pixel de 1 metro e em formato ASCII, foram disponibilizados pela empresa responsável pelo sobrevoo dos dados LiDAR. A avaliação visual desses produtos permitiu a detecção da presença de possíveis falhas e picos indesejáveis. Posteriormente, depois de conferida a qualidade dos dados, aplicou-se a ferramenta *ascii2dtm* para a conversão de arquivos no formato “*dtm*”, e que foram empregados na geração de outros produtos como CHM e métricas LiDAR durante o desenvolver do processamento.

Antes da geração das métricas LiDAR, as nuvens de pontos foram normalizadas aplicando-se a ferramenta *clipdata*. Essa normalização permite a conversão dos valores da cordenada Z, que originalmente refletem a elevação com relação ao datum, para uma escala de altura dos elementos que constituem a nuvem com o solo no nível zero.

Normalizados os dados, foi utilizada a ferramenta *canopymodel* para criar os CHMs, seguida do uso da ferramenta *polyclipdata* para recortar as áreas com os plantios de interesse (parcelas).

As métricas LiDAR foram geradas pela ferramenta *cloudmetrics*, que calcula uma série de parâmetros estatísticos descritivos da nuvem de pontos LiDAR (MCGAUGHEY, 2013). Neste estudo estão sendo usadas 28 métricas, categorizadas segundo a sua origem e a forma como são calculadas.

² <http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html>

Tabela 20 – Lista das métricas LiDAR avaliadas no estudo (aplicativo cloudmetrics – FUSION/LDV)

Categoria	Métricas LiDAR	Simbologia
Altura	Altura máxima	h_{max}
	Altura média	h_{med}
	Desvio Padrão da altura média	h_{desv}
	Variância da altura média	h_{var}
	Coefficiente de variação da altura	h_{cv}
	Percentil 25 da altura	h_{p25}
	Percentil 50 da altura	h_{p50}
	Percentil 70 da altura	h_{p70}
	Percentil 75 da altura	h_{p75}
	Percentil 80 da altura	h_{p80}
	Percentil 90 da altura	h_{p90}
	Percentil 95 da altura	h_{p95}
	Percentil 99 da altura	h_{p99}
Intensidade	Intensidade máxima	I_{max}
	Intensidade média	I_{med}
	Intensidade mínima	I_{min}
	Desvio Padrão da intensidade	I_{desv}
	Variância da intensidade	I_{var}
	Coefficiente de variação da intensidade	I_{cv}
	Percentil 25 da intensidade	I_{p25}
	Percentil 50 da intensidade	I_{p50}
	Percentil 70 da intensidade	I_{p70}
	Percentil 75 da intensidade	I_{p75}
	Percentil 80 da intensidade	I_{p80}
	Percentil 90 da intensidade	I_{p90}
	Percentil 95 da intensidade	I_{p95}
Percentil 99 da intensidade	I_{p99}	
Densidade de copa	Porcentagem de primeiro retorno acima da altura 2 m	d_c

As métricas LiDAR descritas na Tabela 20 geradas pela ferramenta *cloudmetrics*, foram calculadas pelas seguintes equações:

i) Altura média da nuvem de pontos LiDAR (h_{med}):

$$h_{med} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n h_i \quad (19)$$

onde:

h_i = altura do i-ésimo ponto da nuvem de pontos;

n = número de observações (número de pontos na nuvem).

ii) Desvio padrão da altura na nuvem de pontos LiDAR (h_{desv}):

$$h_{desv} = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (h_i - h_{med})^2} \quad (20)$$

onde:

h_{med} = altura média da nuvem de pontos.

iii) Variância da Altura na nuvem de pontos LiDAR (h_{var}):

$$h_{var} = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (h_i - h_{med})^2 \quad (21)$$

iv) Coeficiente de variação em altura na nuvem de pontos LiDAR (h_{cv}):

$$h_{cv} = \frac{h_{desv}}{h_{med}} \quad (22)$$

v) Percentis da altura na nuvem de pontos LiDAR (h_{pi}). O i -ésimo percentil de n pontos representados tradicionalmente na nuvem de pontos LiDAR, ordenados em valores em altura é correspondente ao valor que ocupa a posição K do conjunto de dados, como segue na equação a seguir:

$$K = \frac{h_{pi}(n+1)}{100} \quad (23)$$

onde:

K = valor que ocupa o i -ésimo percentil em altura na nuvem de pontos;

h_{pi} = i -ésimo percentil em altura na nuvem de pontos.

vi) Intensidade média na nuvem de pontos LiDAR (I_{med}):

$$I_{med} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n I_i \quad (24)$$

onde:

I_i = intensidade do i -ésimo ponto na nuvem de pontos.

vii) Desvio padrão da intensidade na nuvem de pontos LiDAR (I_{desv}):

$$I_{desv} = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (I_i - I_{med})^2} \quad (25)$$

onde:

I_{med} = intensidade média na nuvem de pontos.

viii) Variância da intensidade na nuvem de pontos LiDAR (I_{var}):

$$I_{var} = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (I_i - I_{med})^2 \quad (26)$$

ix) Coeficiente de variação da intensidade na nuvem de pontos LiDAR (I_{cv}):

$$I_{cv} = \frac{I_{desv}}{I_{med}} \quad (27)$$

x) Percentis da altura na nuvem de pontos LiDAR (I_{pi}). O i-ésimo percentil de n pontos representados tradicionalmente na nuvem de pontos LiDAR, ordenados em valores de intensidade é correspondente ao valor que ocupa a posição K do conjunto de dados, como segue na equação a seguir:

$$K = \frac{I_{pi}(n+1)}{100} \quad (28)$$

onde:

K = valor que ocupa o i-ésimo percentil de intensidade na nuvem de pontos;

I_{pi} = i-ésimo percentil de intensidade na nuvem de pontos.

xi) Densidade de copa da nuvem de pontos LiDAR (d_c):

$$d_c = \frac{Tpr_{2m}}{Tpr} \quad (29)$$

onde:

Tpr_{2m} = primeiros retornos acima de 2 m de altura na nuvem de pontos;

Tpr = primeiros retornos na nuvem de pontos.

Por fim, o processamento LiDAR conclui-se com a geração de *layers*, um para cada métrica LiDAR rasterizada e obtida pelo *cloudmetrics*. Para obtenção dos *layers* aplicou-se a ferramenta *gridmetrics* automatizada pelo *LTKprocessor*. As etapas do processamento podem ser visualizadas de forma sucinta na Figura 38.

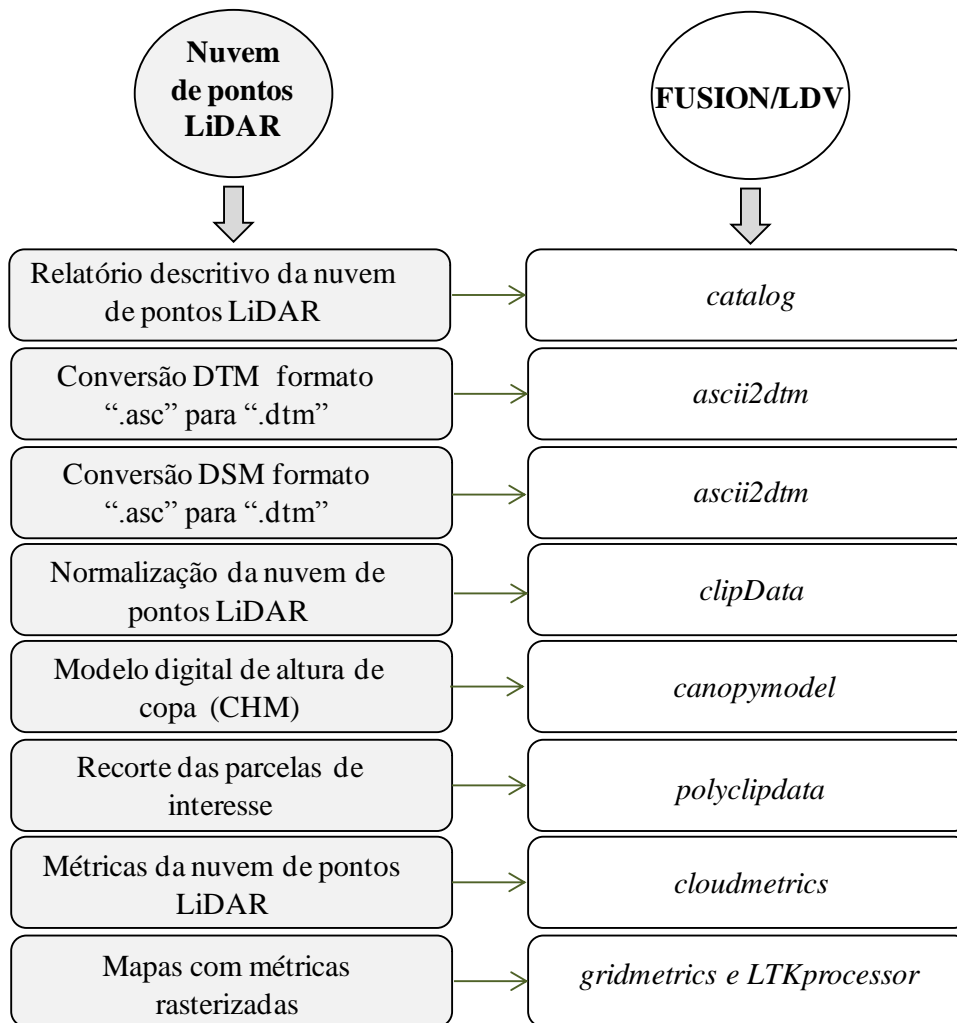


Figura 37 - Etapas do processamento de dados LiDAR para obtenção das métricas e mapas referentes à nuvem de pontos LiDAR. Os DTM, DSM e CHM, com resolução de 1 m x1m

Para construção, validação, aplicação dos modelos preditivos e geração dos mapas representativos do carbono florestal nos compartimentos avaliados, foram utilizados os softwares *LidarData_AnalysisTools*, “R Project for Statistical Computing” (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2004) e ArcGIS 10®.

O software *LidarData_AnalysisTools*, é um programa desenvolvido pelo *USDA Forest Service - Remote Sensing Applications Center*, escrito em linguagem Python, que trabalha como interface do R. O *LidarData_AnalysisTools* foi projetado para agilizar o processo de análise de regressão estatística envolvendo métricas LiDAR geradas pelo Serviço Florestal Norte Americano e, de fato, funciona como uma interface gráfica para acessar os pacotes de modelagem estatística disponíveis no R que simplificam o processamento de grandes volumes de dados.

4.2.4 Modelagem do estoque de carbono através de dados LiDAR

Para construção dos modelos preditivos de carbono, trabalhou-se com os princípios da regressão linear múltipla, pelo fato de termos uma única variável dependente, o carbono, e 28 variáveis independentes, correspondentes as métricas obtidas pela nuvem de pontos LiDAR. Na regressão linear múltipla assume-se que existe uma relação linear entre uma variável Y (carbono) e k variáveis independentes, x_j ($j=1, \dots, k$ =métricas da nuvem de pontos LiDAR).

O modelo matemático que expressa a equação da regressão linear múltipla tem a seguinte forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (30)$$

onde:

Y = variável dependente (teor de carbono), ou de resposta;

β_0 = intercepto no eixo Y ;

β_i = coeficiente angular da i -ésima variável independente, ou preditiva;

k = número de variáveis independentes, ou preditivas;

ε = erro aleatório.

A regressão linear múltipla tem sido bastante aplicada em trabalhos que procuram identificar, dentre as métricas geradas pelo processamento de dados LiDAR, aquelas com maior potencial preditivo em estudos de quantificação e qualificação da biomassa florestal. Artigos publicados por Hudak et al. (2006), por exemplo, demonstram o uso da regressão linear múltipla para estimar área basal e densidade de indivíduos arbóreos a partir de dados LiDAR e imagens multiespectrais de satélite. Os trabalhos desenvolvidos por pesquisadores da Escandinávia também têm sido importantes como exemplos que aplicaram a regressão linear múltipla para a estimativa de parâmetros biométricos da floresta através de dados LiDAR. O pesquisador Erik Næsset em alguns de seus artigos (NÆSSET, 2001, 2002), demonstrou bons resultados com o ajuste de modelos de regressão linear múltipla através das métricas LiDAR para a estimativa do volume, área basal, densidade, e altura dos indivíduos arbóreos em Valer, sudeste da Noruega.

Para a construção dos modelos, uma análise criteriosa apoiou o processo de seleção das melhores métricas da nuvem de pontos LiDAR candidatas à modelagem. Para esta seleção, primeiramente aplicou-se o teste de correlação linear de Pearson (r^2), presente no pacote “*stats*” do R, para obter a correlação entre as variáveis preditivas e avaliar a possível existência de colinearidade entre elas. As variáveis que apresentaram $R^2 > 0,9$, foram excluídas da análise para evitar a presença de colinearidade. Em segundo passo, foi aplicada a

função *regsubsets* do pacote “*leaps*” no R, para a obtenção de subconjuntos de variáveis independentes candidatas à composição dos modelos definitivos do carbono. Esse método realiza uma busca exaustiva para a seleção das melhores combinações de variáveis independentes, e rearranja-as em subconjuntos que posteriormente poderão dar origem aos modelos selecionados. O *regsubsets* requer o uso de um número máximo (representado pelo argumento *nvmax*) de variáveis independentes para a construção crescente desses subconjuntos. Neste caso, utilizou-se o *nvmax* igual a oito, e os subconjuntos de métricas LiDAR foram organizados em oito possíveis modelos diferentes.

Uma abordagem estatística empregada para selecionar as variáveis filtradas pela função *regsubsets* com maior poder preditivo, apresentado por Mallows (1973), apud Hudak et al. (2006), compara a soma dos erros quadráticos de um modelo reduzido com o erro quadrático médio do modelo completo (todas as variáveis preditivas), de acordo com a seguinte equação:

$$C_p = \frac{SSE}{MSE_{\text{completo}}} - n + 2p \quad (31)$$

onde:

SSE = soma do erro quadrático do modelo reduzido com “p” parâmetros (incluindo o intercepto);

MSE_{completo} = erro quadrático médio do modelo completo (todas as variáveis preditivas).

A combinação das variáveis que geram um subconjunto desejado é indicada quando C_p é aproximadamente igual ao valor de p . As combinações das variáveis preditivas que minimizam o C_p de Mallows constituem o melhor subconjunto de variáveis independentes para a criação dos modelos.

Após a seleção e a combinação das melhores variáveis independentes sugeridas pelo *regsubset*, aplicou-se a função “*lm*” também presente no pacote “*stats*” no R para a construção final dos modelos preditivos de carbono.

4.2.5 Avaliação dos modelos construídos através de dados LiDAR

Os modelos baseados em métricas LiDAR como variáveis preditivas foram primeiramente avaliados quanto ao pressuposto da normalidade e homogeneidade de variâncias pela análise gráfica dos resíduos normalizados e pelos testes estatísticos de Shapiro

Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) e Breusch e Pagan (1979). Em seguida, foram avaliados quanto à precisão pelos seguintes parâmetros estatísticos da regressão:

i) Coeficiente de determinação ajustado	R^2_{ajd}
ii) Erro-padrão residual	S_{yx}
iii) Correlação linear de Pearson para os valores estimados e observados	r_{xy}
iv) Raiz quadrada do erro quadrático médio absoluto	RMSE
v) Raiz quadrada do erro quadrático médio percentual	RMSE%
vi) Validação cruzada da regressão pelo procedimento “leave-one-out”	

Para a comparação entre os modelos criados, e a escolha do melhor modelo para a predição do carbono, foi aplicando o critério de informação estatístico de Akaike corrigido (AICc) segundo Hurvich e Tsai (1989). Foi necessário usar a versão corrigida do critério Akaike por estarmos trabalhando com um tamanho de amostra relativamente pequeno ($n/p < 40$). A escolha do melhor modelo foi realizada pelo menor valor de AICc. O AICc é calculado pela seguinte relação:

$$AICc_i = 2p_i - 2 \ln(L_i) + \frac{2p_i(p_i+1)}{(n-p_i-1)} \quad (32)$$

onde:

$AICc_i$ = critério de informação de Akaike corrigido do i-ésimo modelo;

p_i = número de coeficientes estimados (incluindo a constante) no i-ésimo modelo;

L_i = estimador de máxima verossimilhança da variância do erro no i-ésimo modelo.

Após a escolha do melhor modelo, aplicou-se a validação cruzada pelo procedimento “deixando uma amostra de fora”, também conhecido por “leave-one-out”, como citado por Hudak et al. (2006) usando o aplicativo R. A validação cruzada é uma técnica muito empregada em modelagem cujo objetivo é a predição. Esta avalia a generalização de um modelo a partir de um conjunto de dados, e busca estimar o quão acurado é o modelo ajustado na prática, ou seja, o seu desempenho para um novo conjunto de dados. Esse se adapta bem ao conjunto de dados deste trabalho, pois aproveita ao máximo os dados presentes e não envolve subamostragem aleatória.

Após a seleção do melhor modelo, utilizou-se a função *AsciiGridInput*., disponível no pacote *yalnput* no R (CROOKSTON; FINLEY, 2007), para a visualização das estimativas geradas pelo modelo em um mapa. O mapa expressa um grid onde cada célula representa uma

quadrícula de 5x5 m colorida de acordo com o teor de carbono estimado para essa célula. O *layout* e os ajustes finais do mapa foram desenvolvidos utilizando o ArcGIS 10[®].

4.3 Resultados e discussão

O inventário florestal, por meio da análise de dados LiDAR, tem se mostrado promissor como ferramenta para a estimativa do estoque de carbono em florestas plantadas (OMASA et al., 2003) e naturais (ASNER et al., 2011, 2012; CLARK et al., 2011; HUDAK et al., 2012; NAKAI et al., 2009). Esta seção apresenta os modelos matemáticos preditivos do carbono total, lenho comercial e parte residual, bem como a discussão dos modelos criados e valores estimados encontrados. Por fim, apresenta-se a espacialização do carbono estimado através de mapas ilustrativos para a área de estudo.

4.3.1 Modelos preditivos do carbono pelo LiDAR

Analisando a matriz de correlação linear de Pearson entre as métricas LiDAR (APÊNDICE V), observa-se que muitas delas são colineares, ou seja, apresentam uma correlação $r > 0,90$ entre si. Considerando as 28 métricas LiDAR candidatas à construção dos modelos preditivos de carbono, observa-se que 17 delas são altamente correlacionadas entre si. As 11 métricas restantes, com baixos valores para o índice de correlação linear de Pearson, foram usadas para a construção/seleção dos modelos. Essas 11 métricas LiDAR continuam representando os três grupos básicos de métricas, e associam-se com altura (h_{desv} , h_{cv} , h_{p70} e h_{p75}), intensidade (I_{min} , I_{max} , I_{med} , I_{p80} , I_{p95} , I_{p99}) e densidade de copa (d_c).

A pré-seleção das variáveis realizada pelo teste de correlação linear de Pearson, é um procedimento essencial de modelagem estatística, e garante uma maior confiabilidade durante a pré-construção dos modelos de carbono, como observado em Hudak et al. (2012). A aplicação desse procedimento se justificaria, principalmente em situações onde existe uma elevada quantidade de variáveis explicativas, como, neste estudo, as variáveis obtidas pelos dados LiDAR, e também quando as variáveis candidatas à construção de um modelo matemático empregado para estimativa de uma métrica qualquer estão altamente correlacionadas. Em situações em que esse procedimento não é realizado, o modelo matemático resultante pode ser pouco confiável e preciso, mesmo que apresentando um elevado valor de R^2_{ajd} . Tal fato pode ocorrer quando as variáveis explicativas apresentam, com relação à variável dependente, um comportamento estatístico similar casual, mas sem

nenhuma relação real de causalidade funcional. A Tabela 21 resume os valores da correlação de Pearson das métricas selecionadas pelo teste de correlação.

Tabela 21 - Matriz de correlação entre as métricas LiDAR não colineares

r	I_{\min}	I_{\max}	$I_{\text{méd}}$	I_{p80}	I_{p95}	I_{p99}	d_c	h_{desv}	h_{cv}	h_{p70}	h_{p75}
I_{\min}	1										
I_{\max}	-0,14	1									
$I_{\text{méd}}$	-0,17	0,65	1								
I_{p80}	0,11	0,40	0,23	1							
I_{p95}	0,06	0,49	0,68	0,74	1						
I_{p99}	-0,02	0,67	0,80	0,69	0,82	1					
d_c	-0,06	-0,25	-0,61	-0,30	-0,69	-0,51	1				
h_{desv}	0,31	0,05	0,12	0,46	0,43	0,35	-0,43	1			
h_{cv}	0,18	0,30	0,61	0,35	0,64	0,62	-0,81	0,66	1		
h_{p70}	-0,01	-0,20	-0,53	0,00	-0,45	-0,29	0,72	-0,06	-0,64	1	
h_{p75}	0,27	-0,19	-0,28	0,35	0,11	-0,02	-0,03	0,83	0,15	0,33	1

As combinações das melhores métricas LiDAR obtidas pelo “*regsubset*” após a prévia seleção pela correlação linear de Pearson, proporcionou a construção de oito modelos para cada variável resposta estudada (Tabela 22). Os dados envolvendo as variáveis independentes e dependente foram transformados em raiz quadrada, para que melhor atendam os pré-requisitos de normalidade e homogeneidade da variância, segundo a análise Box-Cox. A transformação de dados é frequentemente aplicada em trabalhos na área florestal utilizando a tecnologia LiDAR (HUDAK et al., 2006, 2012; ZONETE, 2009; ZONETE et al., 2010).

Para a variável C_{total} , os oito modelos construídos apresentaram um elevado valor quanto ao coeficiente de terminação ajustado ($R^2 > 0,7$). As diferenças em valores absolutos entre os modelos foram relativamente baixas, sendo que os R^2_{ajd} variaram de 0,86 a 0,90. As métricas mais frequentes nos modelos foram a H_{p75} (com a presença em todos os modelos), seguidas pela I_{p80} (presente em sete modelos) e d_c (aparecendo em quatro modelos) (Tabela 22). Com este fato, verifica-se que essas variáveis independentes aplicadas para construção dos modelos, apresentam um elevado poder de explicação quanto à variável resposta carbono, pois expressam de 86 a 90% da variabilidade encontrada no carbono total da parte aérea.

O melhor modelo empregado para a estimativa do C_{total} foi o modelo composto por cinco variáveis independentes. Este modelo foi o escolhido, pois apresentou o menor AICc quando comparado com os outros modelos construídos. O AICc variou de 244,14 a 211,33. Assim, o quinto modelo apresentou o menor valor de AICc. Ainda, as variáveis explicativas que compuseram o modelo selecionado foram I_{p80} , d_c , h_{desv} , h_{cv} e h_{p75} , garantindo a presença das três classes de métricas estudadas (altura, intensidade e densidade de copa).

Com relação aos modelos construídos para a estimativa do carbono estimado no lenho comercial de toras (C_{leco}), verifica-se que todos os modelos também apresentaram um alto valor quanto ao coeficiente de determinação ajustado. O R^2_{ajd} variou de 0,88 para o modelo com uma variável independente a 0,91 para o modelo com sete variáveis independentes. As variáveis que mais apareceram na composição desses modelos foram a h_{p75} (com presença em todos os modelos), seguidas pelas variáveis I_{p80} e I_{max} (presente em pelo menos quatro modelos).

O modelo que mais se ajustou quanto ao critério estatístico AICc para a estimativa do carbono na lenho comercial, teve sete variáveis independentes. O AICc variou do maior valor de 190,70 ao menor valor 161,25, sendo o menor valor encontrado no modelo de número sete. As variáveis independentes que compuseram este modelo foram I_{p80} , d_c , h_{desv} , h_{cv} e h_{p75} , o que garantiu também a presença das três classes de métricas estudadas (altura, intensidade, e densidade de copa).

Para a estimativa do carbono contido no resíduo da árvore (C_{rsd}), verifica-se que os coeficientes de determinação ajustados também revelaram que os modelos construídos se ajustaram bem aos dados observados em campo. O R^2_{aj} variou de 0,79 para o modelo composto por somente uma variável independente a 0,84 para os modelos empregando quatro, cinco, seis e sete variáveis explicativas. As variáveis independentes que mais apareceram nos modelos para a estimativa do carbono no resíduo considerado de pós-colheita, foram h_{p75} , I_{p80} , h_{cv} e d_c .

O modelo que mais se ajustou aos dados segundo o AICc foi o modelo composto por cinco variáveis independentes. O AICc variou de 95,38 para o modelo composto por somente uma variável explicativa a 56,97 para o modelo selecionado, que compõe cinco variáveis explicativas. As métricas LiDAR que possui este modelo foram I_{p80} , d_c , h_{desv} , h_{cv} e h_{p75} .

Tabela 22 - Modelos de regressões lineares múltiplas ajustados para a estimativa do estoque de carbono total, no lenho comercial e no resíduo pós-colheita, obtido pelos modelos LiDAR

Carbono	Modelos preditivos do carbono	R ² _{ajd}	AICc
C _{total} ^{1/2}	1 = - 6,73+2,91($h_{p75}^{1/2}$)	0,86	244,14
	2 = - 8,23+0,06($I_{p80}^{1/2}$) + 2,73($h_{p75}^{1/2}$)	0,88	220,56
	3 = - 8,32+0,08($I_{p80}^{1/2}$)-0,01($I_{p95}^{1/2}$) + 2,69($h_{p75}^{1/2}$)	0,89	218,17
	4 = - 8,04-0,04($I_{min}^{1/2}$)-0,002($I_{max}^{1/2}$) + 0,05($I_{p80}^{1/2}$) + 2,79($H_{75}^{1/2}$)	0,88	222,51
	5 = - 34,64+0,06($I_{p80}^{1/2}$) + 1,83($d_c^{1/2}$)-3,45($h_{desv}^{1/2}$) + 12,83($h_{cv}^{1/2}$) + 4,70($h_{p75}^{1/2}$)	0,89	211,33
	6 = - 35,41+0,01($I_{max}^{1/2}$) + 0,06($I_{p80}^{1/2}$) + 1,84($d_c^{1/2}$) - 3,67($h_{desv}^{1/2}$) + 13,26($h_{cv}^{1/2}$) + 4,88($h_{p75}^{1/2}$)	0,89	211,63
	7 = - 34,61-0,05($I_{min}^{1/2}$) + 0,07($I_{p80}^{1/2}$) + 1,89($d_c^{1/2}$) -0,01($I_{p99}^{1/2}$) -3,21($h_{desv}^{1/2}$) + 12,90($h_{cv}^{1/2}$)- 4,54($h_{p75}^{1/2}$)	0,90	212,04
	8 = - 11,22-0,04($I_{min}^{1/2}$) + 0,01($I_{max}^{1/2}$) + 0,09($h_{p80}^{1/2}$) - 0,01($I_{p95}^{1/2}$) - 0,01($I_{p99}^{1/2}$) + 0,32($d_c^{1/2}$) +0,43($h_{desv}^{1/2}$) -2,45($h_{p75}^{1/2}$)	0,89	223,67
C _{leco} ^{1/2}	1 = - 6,47+2,56($h_{p75}^{1/2}$)	0,88	190,70
	2 = - 7,62+0,04($I_{p80}^{1/2}$) + 2,44($h_{p75}^{1/2}$)	0,89	171,51
	3 = - 7,70+0,06($I_{p80}^{1/2}$)-0,01($I_{p95}^{1/2}$) + 2,40($h_{p75}^{1/2}$)	0,90	168,98
	4 = - 7,87+0,01($I_{max}^{1/2}$)-0,06($I_{p80}^{1/2}$) - 0,01($I_{p99}^{1/2}$) + 2,42($h_{75}^{1/2}$)	0,90	169,74
	5 = - 28,87+0,05($I_{p80}^{1/2}$) + 1,44($d_c^{1/2}$) -2,95($h_{desv}^{1/2}$) + 10,75($h_{cv}^{1/2}$) + 4,12($h_{p75}^{1/2}$)	0,90	163,27
	6 = - 29,38+0,003($I_{max}^{1/2}$) + 0,05($I_{p80}^{1/2}$) + 1,45($d_c^{1/2}$) - 3,10($h_{desv}^{1/2}$) +11,03($h_{cv}^{1/2}$) + 4,24($h_{p75}^{1/2}$)	0,90	164,27
	7 = - 26,83+0,007($I_{max}^{1/2}$)- 1,87($I_{med}^{1/2}$) + 0,04($I_{p80}^{1/2}$) +1,27($d_c^{1/2}$)-3,22($h_{desv}^{1/2}$) + 12,05($h_{cv}^{1/2}$) + 4,24($h_{p75}^{1/2}$)	0,91	161,25
	8 = - 0,27+0,01($I_{max}^{1/2}$) -1,83($I_{med}^{1/2}$) + 0,04($I_{p80}^{1/2}$) - 0,001($I_{p95}^{1/2}$) +1,26($d_c^{1/2}$) -3,20($h_{desv}^{1/2}$) +1,20($h_{cv}^{1/2}$) +4,24($h_{p75}^{1/2}$)	0,90	163,53
C _{resd} ^{1/2}	1 = - 2,15+1,32($h_{p75}^{1/2}$)	0,79	95,38
	2 = - 3,13+0,04($I_{p80}^{1/2}$) + 1,21($h_{p75}^{1/2}$)	0,83	66,12
	3 = - 10,16+0,04($I_{p80}^{1/2}$) -0,30($d_c^{1/2}$) + 1,20($h_{p75}^{1/2}$)	0,83	63,99
	4 = - 10,16+0,04($I_{p80}^{1/2}$) +0,65($d_c^{1/2}$) + 1,06($h_{cv}^{1/2}$) + 2,42($h_{p75}^{1/2}$)	0,84	62,70
	5 = - 18,45+0,04($I_{p80}^{1/2}$) + 1,11($d_c^{1/2}$)-1,70($h_{desv}^{1/2}$) + 6,71($h_{cv}^{1/2}$) + 2,16($h_{p75}^{1/2}$)	0,84	56,97
	6 = - 2,32-0,04($I_{min}^{1/2}$) + 0,005($I_{max}^{1/2}$) -1,20($I_{med}^{1/2}$) +0,03($I_{p80}^{1/2}$) +0,46($h_{cv}^{1/2}$) + 1,22($h_{p75}^{1/2}$)	0,84	65,18
	7 = - 3,51-0,04($I_{min}^{1/2}$) +0,006($I_{med}^{1/2}$) - 1,34($I_{med}^{1/2}$) +0,03($I_{p80}^{1/2}$) -0,65($h_{desv}^{1/2}$) + 2,33($h_{cv}^{1/2}$) + 1,60($h_{p75}^{1/2}$)	0,84	65,83
	8 = - 21,10-0,03($I_{min}^{1/2}$) -0,003($I_{med}^{1/2}$) + 0,007($I_{p80}^{1/2}$) + 0,005($I_{p95}^{1/2}$) +1,34($d_c^{1/2}$) -2,11($h_{desv}^{1/2}$) +7,63($h_{cv}^{1/2}$) +2,57($h_{p75}^{1/2}$)	0,83	70,82

Analisando os parâmetros estatísticos empregados para a avaliação dos modelos selecionados para estimativa do carbono total, tora comercial e nos resíduo da árvore pela análise dos dados LiDAR, verifica-se que os modelos se ajustam bem aos dados observados. Segundo os coeficientes de determinação ajustados (R^2_{ajd}), as variáveis independentes, presentes nos modelos, apresentam um poder explicativo em torno de 89 a 91% do comportamento da variável resposta carbono. Além disso, verifica-se também um alto índice de correlação linear de Pearson entre os valores estimados e observados, bem como baixos erros dos modelos representados pelos valores encontrados nos RMSEs, o que garante uma maior exatidão aos modelos ajustados (Tabela 23).

Tabela 23 - Modelos de regressões lineares múltiplas ajustados para a estimativa do estoque de carbono total, na tora comercial e no resíduo pós-colheita, obtido pelos modelos LiDAR

Carbono	Modelos preditivos	R^2_{ajd}	r_{xy}	s_{yx}	RMSE (Mg.ha ⁻¹)	RMSE (%)
$C_{total}^{1/2} =$	$-34,64 - 0,06(I_{p80}^{1/2}) + 1,83(d_c^{1/2}) - 3,45(h_{desv}^{1/2}) + 12,83(h_{cv}^{1/2}) + 4,70(h_{p75}^{1/2})$	0,89	0,92	0,50	7,48	13,17
$C_{tora}^{1/2} =$	$-26,83 + 0,007(I_{max}^{1/2}) - 1,87(I_{med}^{1/2}) + 0,04(I_{p80}^{1/2}) + 1,27(d_c^{1/2}) - 3,22(h_{desv}^{1/2}) + 12,05(h_{cv}^{1/2}) + 4,24(h_{p75}^{1/2})$	0,91	0,94	0,41	5,03	13,26
$C_{rsd}^{1/2} =$	$-19,04 + 0,04(I_{p80}^{1/2}) + 1,12(d_c^{1/2}) - 1,81(h_{desv}^{1/2}) + 7,08(h_{cv}^{1/2}) + 2,28(h_{p75}^{1/2})$	0,85	0,89	0,29	2,47	13,27

R^2_{ajd} : Coeficiente de determinação ajustado; r_{xy} : Correlação linear de Pearson valores observados versus valores estimados; s_{yx} : Erro padrão residual; RMSE: Raiz quadrada do erro quadrático médio absoluto e percentual. Obtidos com valores transformados, exceto o R^2_{ajd} .

Os coeficientes que compõem os modelos ajustados para a estimativa do C_{total} e C_{rsd} foram todos significativos com 99% de probabilidade (**), pelo teste “t”, de Student. A exceção ocorreu para duas métricas empregadas no modelo ajustado para a estimativa do carbono na tora comercial. Neste modelo, as variáveis apresentaram significância ao nível de 95% de probabilidade (**), pelo teste “t”, de Student, como pode ser observados na Tabela 24.

Tabela 24 - Estatísticas para os coeficientes dos modelos empregados para a estimativa do carbono total e nos compartimentos da árvore pelo inventário convencional

Modelos	Variáveis	Estimativa	SE	t valor	Pr (> t)	Sign
$C_{total}^{1/2}$	<i>Intercepto</i>	-34,642	6,805	-5,090	1,180E-06	***
	$I_{p80}^{1/2}$	0,064	0,011	5,855	3,440E-08	***
	$d_c^{1/2}$	1,827	0,496	3,685	3,300E-04	***
	$h_{desv}^{1/2}$	-3,453	1,053	-3,278	1,330E-03	**
	$h_{cv}^{1/2}$	12,828	3,630	3,534	5,600E-04	***
	$h_{p75}^{1/2}$	4,691	0,615	7,632	3,750E-12	***
$C_{leco}^{1/2}$	<i>Intercepto</i>	-26,832	5,782	-4,641	8,210E-06	***
	$I_{max}^{1/2}$	0,008	0,004	2,195	2,992E-02	*
	$I_{med}^{1/2}$	-1,870	0,831	-2,251	2,603E-02	*
	$I_{p80}^{1/2}$	0,042	0,010	4,128	6,420E-05	***
	$d_c^{1/2}$	1,274	0,419	3,043	2,825E-03	**
	$h_{desv}^{1/2}$	-3,219	0,886	-3,633	3,990E-04	***
	$h_{cv}^{1/2}$	12,046	3,058	3,939	1,320E-04	***
	$h_{p75}^{1/2}$	4,245	0,522	8,135	2,560E-13	***
$C_{rsd}^{1/2}$	<i>Intercepto</i>	-19,0383	4,019943	-4,736	5,450E-06	***
	$I_{p80}^{1/2}$	0,04122	0,006486	6,356	2,960E-09	***
	$d_c^{1/2}$	1,122361	0,292888	3,832	1,940E-04	***
	$h_{desv}^{1/2}$	-1,81946	0,622208	-2,924	4,051E-03	**
	$h_{cv}^{1/2}$	7,076382	2,143958	3,301	1,234E-03	**
	$h_{p75}^{1/2}$	2,278942	0,363024	6,278	4,370E-09	***

SE: Erro padrão; Sign: Significância: '***' 0.001, '**' 0.01, '*' 0.05

Observando os resultados obtidos pelos testes de Shapiro Wilk e Breusch Pagan da Tabela 25, verifica-se que os modelos preditivos do carbono utilizando as métricas LiDAR, foram aceitos quanto aos pressuposto da normalidade e homogeneidade de variâncias.

Tabela 25 - Teste de normalidade pelo método do Shapiro – Wilk e de homogeneidade de variâncias pelo teste de Breusch Pagan para os modelos ajustados

Modelos	Shapiro - Wilk		Breusch Pagan	
	Estatística	Sig.	Estatística	Sig.
$C_{total}^{1/2}$	0,99	0,66	2,28	0,13
$C_{leco}^{1/2}$	0,99	0,35	1,87	0,17
$C_{rsd}^{1/2}$	0,98	0,09	2,81	0,09

Sig: Significância do teste a 95 % de probabilidade. Sig. > 0,05, não rejeita a hipótese de que os dados apresentam distribuição normal e homogeneidade de variâncias.

Analisando os valores de carbono estimados pelos modelos representados na Tabela 5 e os observados em campo, observa-se novamente que os modelos se ajustam bem aos dados observados (Tabela 26).

Tabela 26 - Resumo das estatísticas referente ao carbono observado e predito em valores transformados a escala original ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

Carbono		Mín	I .Q	Mediana	Média	III. Q	Máx
$C_{\text{total}}^{1/2}$	Observado	3,097	48,66	60,31	56,80	70,06	89,41
	Predito	2,799	50,29	59,39	56,56	66,98	96,75
$C_{\text{leco}}^{1/2}$	Observado	1,479	31,47	40,71	37,94	46,90	61,36
	Predito	1,608	32,72	40,13	37,78	45,35	67,76
$C_{\text{rsd}}^{1/2}$	Observado	1,050	17,15	19,61	18,63	21,94	27,50
	Predito	2,471	16,89	19,31	18,55	21,65	28,98

N: número de observações, Mín: mínimo, I.Q: primeiro quartil, III.Q: terceiro quartil e Max: máximo

Observando os modelos ajustados pelos dados LiDAR para a estimativa do C_{total} , C_{leco} e C_{rsd} por uma perspectiva gráfica nas Figuras de 41 a 43, confirma-se que os valores estimados pelo LiDAR se aproximam dos valores observados. Os parâmetros estatísticos testados para validade dos modelos também confirmam este comportamento. Eles apresentaram valores adequados quanto às suas amplitudes aceitáveis quando comparados com outros trabalhos realizados para a estimativa do carbono na biomassa aérea florestal (GARCÍA et al., 2010; HATAMI, 2012; HUDAK et al., 2012; KIM et al., 2010; PATENAUDE et al., 2004).

Nas relações entre os valores de carbono observado em campo versus os estimados pela validação cruzada do modelo LiDAR (Figuras 39, 40 e 41c), verifica-se que os modelos tanto para a estimativa do carbono total, como para a estimativa do carbono no lenho comercial e nos resíduos da árvore, se mostram altamente estáveis. A precisão do modelo construído pode ser confirmada pela alta correlação de Pearson e baixo RMSE na relação dos valores estimados pelo modelo ajustado e pelos valores estimados pela validação cruzada (Figuras 39, 40 e 41b). Apesar de haver uma pequena superestimação para os valores mais elevados do carbono, a exatidão das estimativas pode também ser confirmada pela amplitude dos valores dos resíduos ordinários, que demonstram um comportamento normal por estarem aleatoriamente distribuídos, quando correlacionados com os valores estimados pelos modelos ajustados LiDAR (Figuras 39, 40 e 41d).

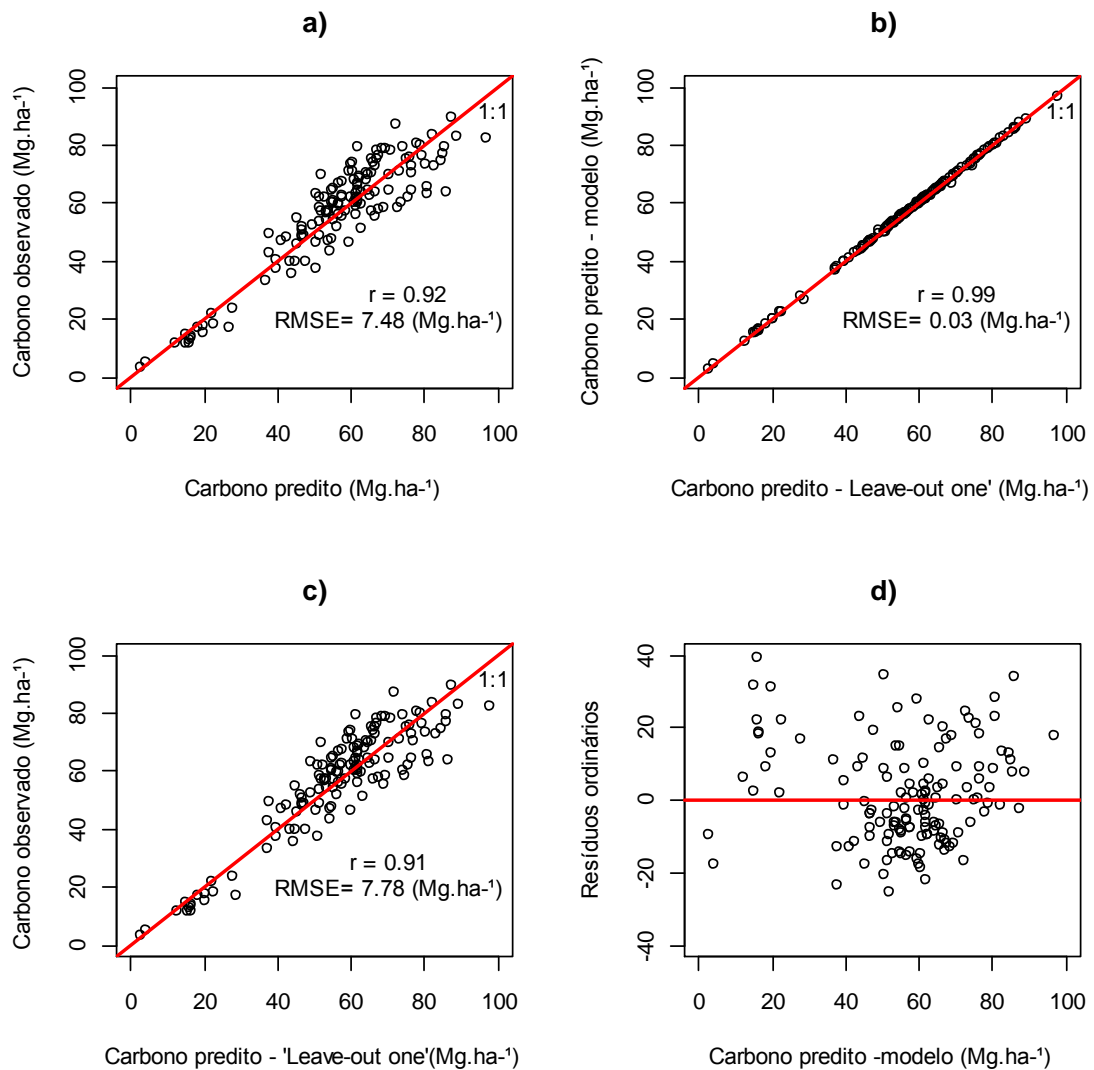


Figura 38 - Relação do carbono total na parte aérea estimado versus observado (N=52). a) Carbono total na parte aérea observado versus estimado pelo modelo LiDAR ajustado, b) carbono total na parte aérea observado versus estimado pelo modelo LiDAR ajustado versus estimado pela validação cruzada LiDAR, c) carbono total na parte aérea observado versus estimado pela validação cruzada e d) gráfico de resíduos ordinários versus carbono total na parte aérea estimado. A linha indica a relação de 1:1

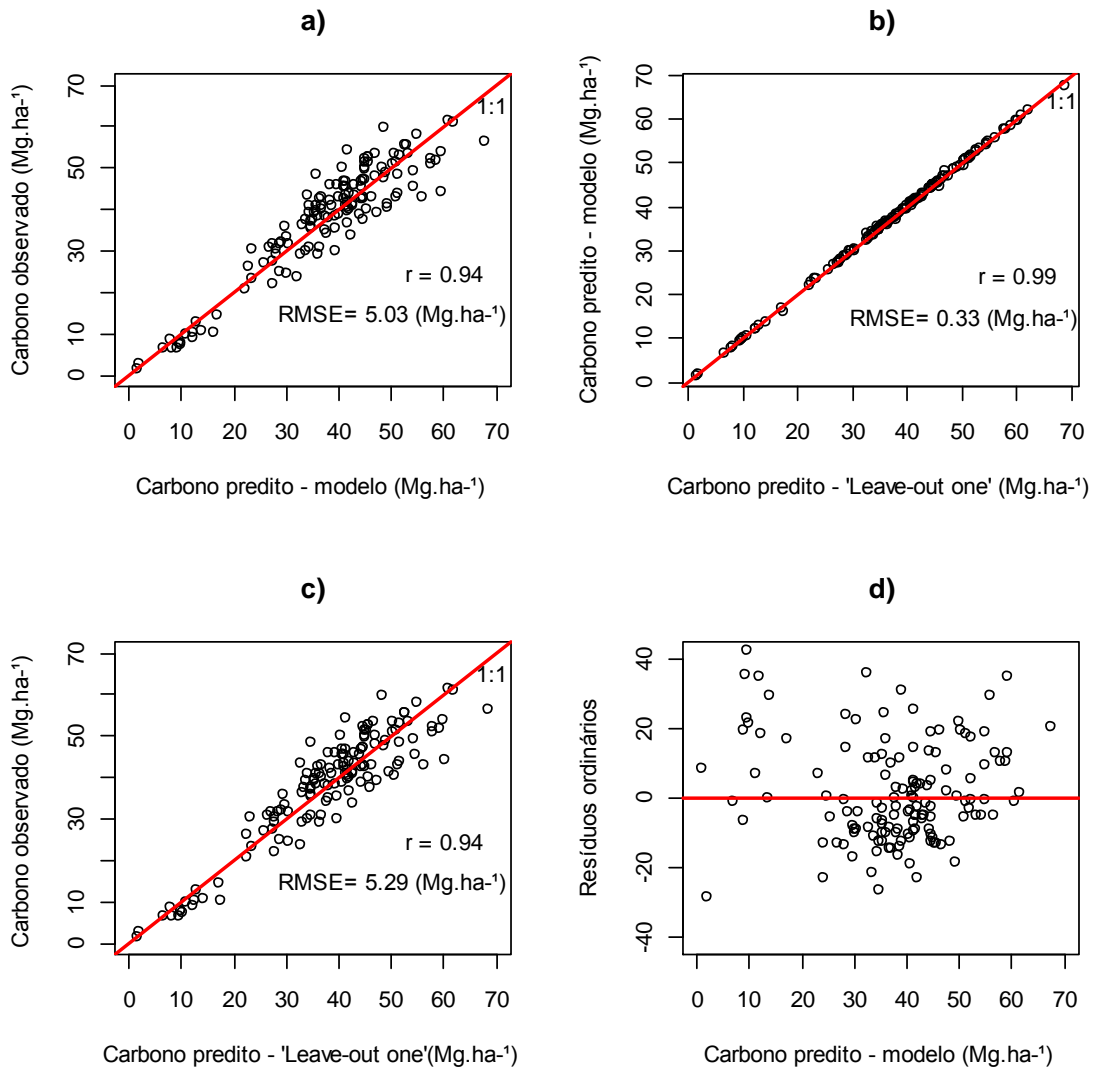


Figura 39 - Relação do carbono total na parte aérea estimado versus observado (N=48). a) carbono no lenho comercial observado versus estimado pelo modelo LiDAR ajustado, b) carbono lenho comercial estimado pelo modelo LiDAR ajustado versus estimado pela validação cruzada LiDAR, c) carbono no lenho comercial observado versus estimado pela validação cruzada e d) gráfico de resíduos ordinários versus carbono no lenho comercial estimado. A linha indica a relação de 1:1

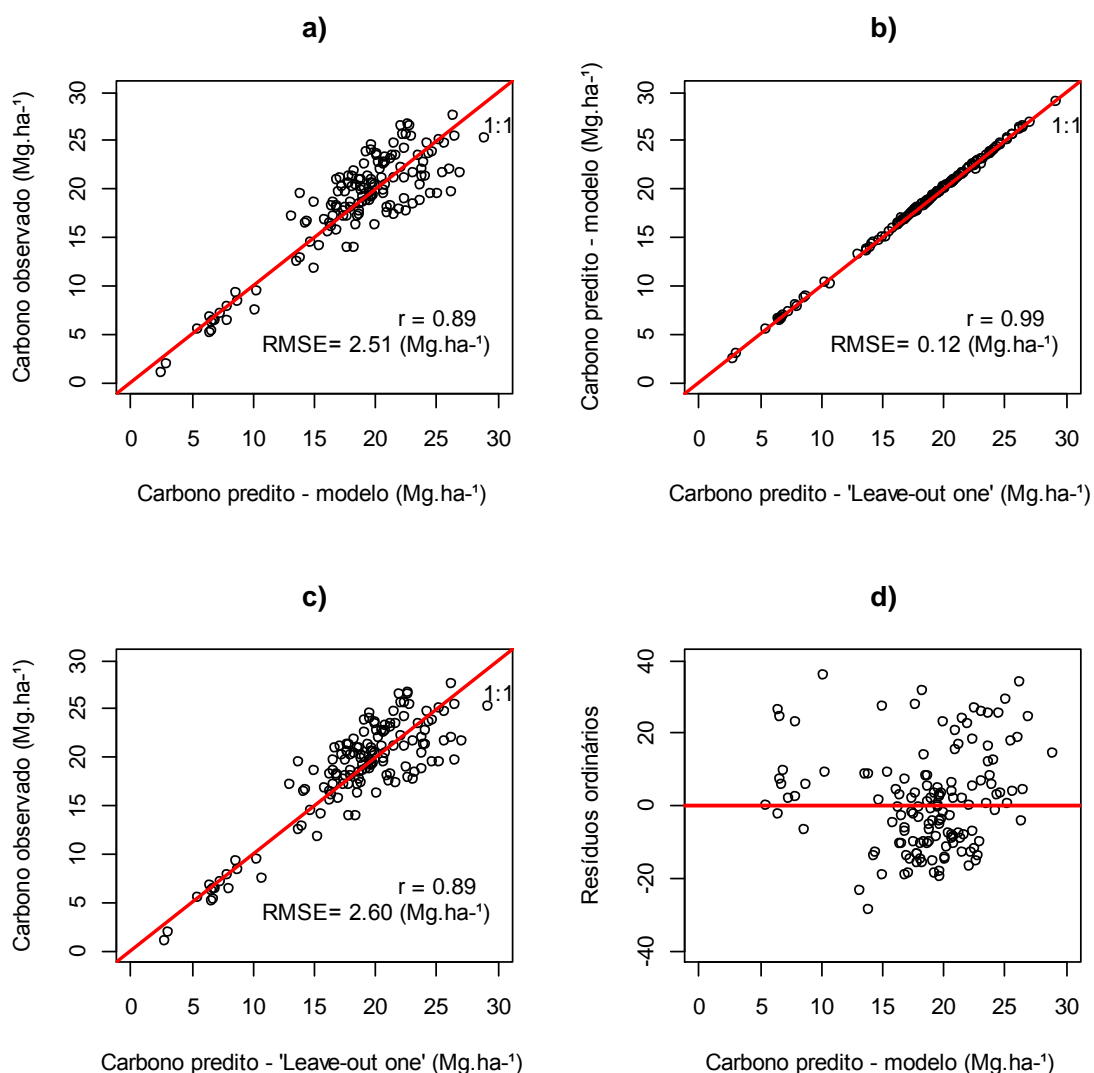


Figura 40 - Relação do carbono total na parte aérea estimado versus observado (N=52). a) carbono no resíduo da árvore observado versus estimado pelo modelo LiDAR ajustado, b) carbono resíduo da árvore estimado pelo modelo LiDAR ajustado versus estimado pela validação cruzada LiDAR, c) carbono no resíduo da árvore observado versus estimado pela validação cruzada e d) gráfico de resíduos ordinários versus carbono resíduo da árvore estimado. A linha indica a relação de 1:1

Nos modelos selecionados para estimação do carbono florestal nos compartimentos avaliados, observa-se a presença em 100% das métricas LiDAR referente as classes de altura, intensidade e densidade de copa. As métricas predominantes nos modelos foram a $h_{p75}^{1/2}$, $h_{cv}^{1/2}$, $h_{desv}^{1/2}$, $d_c^{1/2}$, $I_{p80}^{1/2}$. É evidente a boa correlação entre o percentil 75% da altura representado pela variável $h_{p75}^{1/2}$ e o carbono florestal. As variáveis convencionais altura média das árvores e altura das árvores dominantes juntamente com o DAP são empiricamente empregadas em modelos para a estimativa do carbono florestal (SOARES et al., 2005). Como os povoamentos de *Eucalyptus* são altamente adensados e homogêneos, grande parte dos pontos enviados pelo sensor LiDAR são interceptados pela copa, permitindo uma maior concentração de pontos nas

partes mais altas da nuvem tridimensional. A variável $h_{p75}^{1/2}$ mostrou-se altamente correlacionado com as variáveis $h_{med}^{1/2}$, $h_{max}^{1/2}$, $h_{p90}^{1/2}$ a $h_{p99}^{1/2}$. Desta forma, já era esperada a presença desta variável nos modelos preditivos do carbono florestal.

As métricas referente à intensidade de energia captada pelo sinal de retorno LiDAR, apesar de não estarem normalizadas, também mostraram-se fortemente relacionadas à variabilidade apresentada pelo carbono florestal. Entretanto, Bater et al. (2011) estabelece prudência no uso de métricas de intensidade LiDAR, justamente pela necessidade da sua normalização. A intensidade LiDAR apresenta valores bem distintos para elementos perfilados com características de vegetação e outras feições como rochas, edificações, água, entre outras. A vegetação, em função das características morfológicas da folha, apresenta uma maior interação com a energia emitida pelo sensor LiDAR, o que promove uma maior absorção e uma menor quantidade de energia refletida e captada pelo sinal de retorno. Desta forma, uma floresta mais densa e homogênea terá uma menor quantidade de energia quando comparada com uma floresta aberta e heterogênea. As rochas e os solos são os alvos que mais refletem a energia emitida pelo sensor LiDAR. Isso ocorre por causa do mineral quartzo que apresenta alto poder de refletância. Assim, em uma área cujo uso do solo esteja ocupado por diversas culturas agrícolas e florestais, é evidente e clara a distinção das florestas dos demais cultivos distribuídos na área.

Em uma nuvem de pontos LiDAR, os primeiros pulsos de retornos são quase que em sua totalidades pontos interceptados pela vegetação, principalmente pelo dossel da florestal, quando o perfilhamento laser é realizado em áreas florestais. Esses pontos são representados pelos pontos mais altos da nuvem, e é através deles que é possível obter informações referentes o dossel florestal. Neste estudo, a densidade de copa (d_c) foi obtida pelo total de primeiro retorno acima de dois metros em relação ao total de primeiro retorno presentes na nuvem de pontos LiDAR. O total de primeiros retornos acima de 2 metros é considerado no cálculo com o objetivo de excluir os primeiros retornos que venham a representar a pequena vegetação, tais como o sub-bosque em uma floresta de *Eucalyptus* spp., ou até mesmo o solo, em uma florestal com a presença de clareira. Desta forma, quando mais densa, homogênea e estruturada for uma floresta, mais fechada poderá ser a densidade de copa, e menor será a porcentagem de pontos que interagirão com os estratos inferiores desta.

Os resultados encontrados nesse trabalho apontam para a necessidade de continuar avançando e promovendo o incentivo da aplicação dos dados LiDAR para o inventário florestal em plantações de *Eucalyptus* spp. As métricas LiDAR selecionadas nos modelos deste estudo também são frequentes em outras obras publicadas na literatura. Na Tabela 27

verificam-se as principais métricas LiDAR presente em modelos destinados ao estudo do estoque de carbono e demais biométricas de importância para o inventário florestal.

Tabela 27 - Exemplos de obras na literatura em que se verifica a presença das métricas LiDAR para estimativa de biométricas do inventário florestal, e as métricas LiDAR selecionadas neste trabalho

Autor	Variáveis							
	Dependentes	Independentes						
Hudak et al. (2012)	C	h_{med}						
Stephens et al. (2007)	C	h_{p30}						
Næsset e Gobakken, (2008)	C	lnh_{p90}	lnd_0					
Stephens et al. (2012)	C	h_{p30}	d_c					
Andersen et al. (2005)	B	h_{p25}	h_{p90}	d_c				
Næsset (2002)	V	h_{p80}	h_{max}	d_c				
	G	h_{p80}	h_{max}	d_c				
	N	pOL	h_{cv}	h_{p50}				
García (2010)	B	h_{p30}	h_{p95}	h_{skew}	d_c			
	V	h_{med}	h_{skew}	h_{desv}	d_c			
	G	h_{med}	h_{moda}	h_{p30}	h_{skew}			
	N	h_{p70}	h_{p80}	h_{md}	h_{p95}	h_{skew}	h_{cv}	d_c
Patenaude et al. (2004)	C	h_{med}	h_{p60}	h_{p80}	h_{max}			
Neste estudo	C_{total}	$I_{p80}^{1/2}$	$d_c^{1/2}$	$h_{desv}^{1/2}$	$h_{cv}^{1/2}$	$h_{p75}^{1/2}$		
	C_{leco}	$I_{max}^{1/2}$	$I_{med}^{1/2}$	$I_{p80}^{1/2}$	$d_c^{1/2}$	$h_{desv}^{1/2}$	$h_{cv}^{1/2}$	$h_{p75}^{1/2}$
	C_{rsd}	$I_{p80}^{1/2}$	$d_c^{1/2}$	$h_{desv}^{1/2}$	$h_{cv}^{1/2}$	$h_{p75}^{1/2}$		
García et al. (2010)	B	h_{med}	h_{p50}	I_{p25}	I_{p50}	I_{p99}	I_{cv}	

C: Carbono ($Mg.ha^{-1}$); C_{total} : Carbono total; C_{leco} : Carbono no lenho comercial; C_{rsd} : Carbono na parte residual; B: Biomassa ($Mg.ha^{-1}$); V: Volume ($m^3.ha^{-1}$); G: Área basal ($m^2.ha^{-1}$); N: Densidade ($indivíduos.ha^{-1}$); h_{max} : Altura máxima; h_{med} : Altura média; h_{cv} : coeficiente de variação da altura; h_{desv} : desvio padrão da altura; h_{skew} : coeficiente de assimetria; h_{px} : percentil x das alturas; pOL : percentil 0 de últimos retornos; lnh_{px} : logaritmo do percentil x da altura; $h_{max}^{1/2}$: raiz quadrada da altura máxima; $h_{med}^{1/2}$: raiz quadrada da altura média; $h_{cv}^{1/2}$: raiz quadrada do coeficiente de variação da altura; $h_{desv}^{1/2}$: raiz quadrada do desvio padrão da altura; $h_{med}^{1/2}$: raiz quadrada da altura média; $h_{px}^{1/2}$: raiz quadrada do percentil x da altura média; I_{max} : Intensidade máxima; I_{med} : Intensidade média; I_{cv} : Coeficiente de variação da intensidade; I_{px} : Percentil x das intensidades; $I_{max}^{1/2}$: raiz quadrada da intensidade máxima; $I_{med}^{1/2}$: raiz quadrada da intensidade média; $I_{px}^{1/2}$: raiz quadrada do percentil x das intensidades; lnd_0 : logaritmo da densidade de copa no percentil 0 ed_c : densidade de copa.

4.3.2 Estimativa do estoque de carbono e sua espacialização em área total aplicando os modelos LiDAR ajustados neste estudo.

Os resumos das estimativas de carbono total, lenho comercial e parte residual para as fazendas em estudo estão apresentados nas Tabelas 28 a 30.

Tabela 28 – Estimativa do estoque de carbono presente na biomassa total aérea em plantios de *Eucalyptus* spp. pelo modelo LiDAR ajustado neste estudo

Fazenda	Idade (anos)	Área (ha)	Carbono total (Mg)			
			por hectare		na área total	
			\bar{x}	sd	Qtotal	sd
F987	2,3	39,53	14,31	5,29	565,59	209,25
F986	3,3	94,16	45,45	6,19	4.279,47	582,59
F849	4,7	138,96	62,71	6,69	8.714,13	930,08
F950	5,5	86,72	63,67	9,96	5.520,87	863,84
F184	5,9	58,34	64,59	6,81	3.767,68	397,05
F166	6,1	84,35	69,76	9,77	5.884,23	824,36
F948	6,8	79,33	60,42	13,12	4.793,23	1.041,02
F634	8,0	84,80	72,54	9,06	6.151,83	767,95

Tabela 29 - Estimativa estoque de carbono no lenho comercial da presente biomassa aérea em plantios de *Eucalyptus* spp. pelo modelo LiDAR ajustado neste estudo

Fazenda	Idade (anos)	Área (ha)	Carbono no lenho comercial (Mg)			
			por hectare		na área total	
			\bar{x}	sd	Qtotal	sd
F987	2,3	39,53	8,32	3,31	328,74	130,65
F986	3,3	94,16	28,86	4,36	2.717,75	410,07
F849	4,7	138,96	41,72	4,93	5.797,64	684,61
F950	5,5	86,72	42,11	6,66	3.651,24	577,28
F184	5,9	58,34	43,81	4,81	2.555,74	280,62
F166	6,1	84,35	47,67	6,89	4.020,72	580,97
F948	6,8	79,33	41,19	9,01	3.267,10	714,61
F634	8,0	84,80	50,00	6,75	4.240,18	572,11

Tabela 30 - Estimativa estoque de carbono presente na parte residual biomassa aérea em plantios de *Eucalyptus* spp. pelo modelo LiDAR ajustado neste estudo

Fazenda	Idade (anos)	Área (ha)	Carbono na parte residual (Mg)			
			por hectare		na área total	
			\bar{x}	sd	Qtotal	Sd
F987	2,3	39,53	6,44	1,94	254,49	76,87
F986	3,3	94,16	16,67	1,88	1.569,45	176,62
F849	4,7	138,96	20,69	1,94	2.875,31	270,12
F950	5,5	86,72	21,27	3,32	1.844,60	287,61
F184	5,9	58,34	20,37	2,03	1.188,06	118,37
F166	6,1	84,35	21,65	2,91	1.826,07	245,13
F948	6,8	79,33	18,86	4,24	1.496,46	336,28
F634	8,0	84,80	22,11	2,66	1.875,08	225,76

A espacialização do estoque de carbono total, lenho comercial e parte residual para as fazendas em estudo estão apresentados nas apêndices de A a U.

4.4 Conclusões

De acordo com os resultados encontrados neste trabalho, concluímos que os dados LiDAR podem ser usados para a estimativa do carbono total, no lenho comercial e nos resíduos presente na biomassa aérea em plantações de *Eucalyptus* spp no estado de São Paulo. Comprova-se a existência de uma boa correlação entre as métricas LiDAR com as variáveis de carbono observados pelo inventário em campo. Desta forma, sendo mais específico, neste estudo as seguintes conclusões e recomendações puderam ser delineadas:

- i) Pode-se obter acuradas informações do estoque de carbono total, lenho comercial e parte residual em plantações de eucaliptos com modelos criados através de dados LiDAR;
- ii) As métricas LiDAR que mais estiveram presentes nos modelos foram: $h_{p75}^{1/2}$, $h_{cv}^{1/2}$, $h_{desv}^{1/2}$, $I_{max}^{1/2}$, $I_{med}^{1/2}$, $I_{p80}^{1/2}$ e $d_c^{1/2}$. A presença das três principais métricas confere a robustês dos modelos propostos;
- iii) Apesar das métricas de intensidade LiDAR terem sido representativas nos modelos para o estoque de carbono, recomenda-se a sua normalização em relação a sua geometria de aquisição;
- iv) Há a presença de uma elevada colinearidade entre as métricas LiDAR, sendo necessária uma pré-seleção para qualquer trabalho que venha a ser desenvolvido em plantios comerciais de eucalipto;
- v) A metodologia de processamento de dados LiDAR aqui descrita, pode ser reproduzida em futuras investigações que busquem estimar variáveis biométricas florestais;
- vi) Pode-se obter uma espacialização altamente precisa do estoque de carbono total da parte aérea e nos compartimentos lenho comercial e resíduo da árvore através de dados LiDAR em plantios comerciais de eucalipto de diferentes idades e materiais genéticos, bem como diferentes sítios.

Referências

ANDERSEN, H.; MCGAUGHEY, R.J.; REUTEBUCH, S.E. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, p. 441-449, Feb. 2005.

ASNER, G.P.; CLARK, J.K.; MASCARO, J. ; GALINDO GARCÍA, G.A. ; CHADWICK, K.D.; NAVARRETE ENCINALES, D.A.; PAEZ-ACOSTA, G.; CABRERA MONTENEGRO, E.; KENNEDY-BOWDOIN, T.; DUQUE, Á.; BALAJI, A.; HILDEBRAND, P. VON; MAATOUG, L.; PHILLIPS BERNAL, J.F.; YEPES QUINTERO, A.P.; KNAPP, D.E.; GARCÍA DÁVILA, M.C.; JACOBSON, J.; ORDÓÑEZ, M.F. High-resolution mapping of forest carbon stocks in the Colombian Amazon. **Biogeosciences**, Göttingen, v. 9, n. 7, p. 2683-2696, July 2012

ASNER, G.P.; HUGHES, R.F.; MASCARO, J.; UOWOLO, A. L.; KNAPP, D.E.; JACOBSON, J.; KENNEDY-BOWDOIN, T.; CLARK, K.J. High-resolution carbon mapping on the million-hectare Island of Hawaii. **Frontiers in Ecology and the Environment**, New York, v. 9, n. 8, p. 434-439, Mar. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2012 ano base 2011**. 7. ed. Brasília, 2012. 150 p.

BATER, C.W.; WULDER, M.A.; COOPS, N. C.; NELSON, R.F.; HILKER, T.; NÆSSET, E. Stability of sample-based scanning-LiDAR-derived vegetation metrics for forest monitoring. **Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 49, n. 6, p. 2385–2392, June 2011.

BREUSCH, T.S.; PAGAN, A.R. A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. **Econometrica**, Philadelphia, v. 47, n. 5, p. 1287–1294, Sept. 1979.

CASTRO, E.A. de. **Biomass, nutrient pools and response to fire in the Brazilian Cerrado**. 1996. 128 p. Thesis (Master of Science) – Oregon State University, Oregon, 1996.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; CARVALHO, M.C.S.C.; VOLKOFF, B. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa**: emissões e remoções de dióxido de carbono pelos solos por mudanças de uso da terra e calagem. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2001. 41 p.

CLARK, M.L.; ROBERTS, D.A.; EWEL, J.J.; CLARK, D.B. Estimation of tropical rain forest aboveground biomass with small-footprint lidar and hyperspectral sensors. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 115, n. 11, p. 2931-2942, Nov. 2011.

CROOKSTON, N.L.; FINLEY, A.O. yaImpute: an R Package for k-NN Imputation. **Journal of Statistical Software**, Los Angeles, v. 23, n. 10, p. 1-16, Jan. 2007.

ECOAR – INSTITUTO ECOAR PARA CIDADANIA. **Efeito estufa**. São Paulo, 2003. 5 p.

GARCÍA, G.D. **Estimación de variables de interés forestal basada en datos Lidar en el monte número 117 del C.U.P. término municipal de Cuenca**. 2010. 194 p. Proyecto Fin de Carrera (Ingeniero Forestal) – Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2010.

GARCÍA, M.; RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; DANSON, F.M. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 114, n. 4, p. 816-830, Apr. 2010.

HATAMI, F. **Carbon estimation of individual trees using high laser density data of airborne lidar** (a case study in Bois-Noir, France) carbon estimation of individual trees using high laser density data of. 2012. 61 p. Thesis (Master of Science in Geo-information Science Earth Observation) – Faculty of Science in Geo-information Science Earth Observation, University of Twente, Enschede, 2012.

HUDAK, A.T.; CROOKSTON, N.L.; EVANS, J.S.; FALKOWSKI, M.J.; SMITH, A.M.S.; GESSLER, P.E. Regression modeling and mapping of coniferous forest basal area and tree density from discrete-return LiDAR and multispectral satellite data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Kanata, v. 32, p. 126–138, Jan. 2006.

HUDAK, A.T.; EVANS, J.S.; SMITH, A.M.S. Review: LiDAR utility for natural resource managers. **Remote Sensing**, Basel, v. 1, p. 934–951, Nov. 2009.

HUDAK, A.T.; LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; BERTERRETICHE, M. Integration of LiDAR and Landsat ETM+ data for estimating and mapping forest canopy height. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 82, p. 397–416, Apr. 2009. Tirar a e b no texto

HUDAK, A.T.; STRAND, E.K.; VIERLING, L.A.; BYRNE, J.C.; EITEL, J.U.H.; MARTINUZZI, S.; FALKOWSKI, M.J. Quantifying aboveground forest carbon pools and fluxes from repeat LiDAR surveys. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 82, p. 397–416, Aug. 2012.

HURVICH, C.M.; TSAI, C.L. Regression and time series model selection in small samples. **Biometrika**, New York, v. 76, n. 2, p. 297–307, June 1989.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: Mitigation of Climate Change – Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acesso em: 25 maio 2013.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

KETTERINGS, Q.M.; COE, R.; NOORDWIJK, M. van.; AMBAGAU, Y.; PALM, C. A. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 146, n. 1/3, p. 199-209, June 2001.

KIM, S.R.; KWAK, D.A.; OLEE, W.K.; SON, Y.; BAE, S.W.; KIM, C.; YOO, S. Estimation of carbon storage based on individual tree detection in *Pinus densiflora* stands using a fusion of aerial photography and LiDAR data. **Science China-Life Sciences**, Beijing, v. 53, n. 7, p. 885-897, July 2010.

LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; SPIES, T.A. An evaluation of alternate remote sensing products for forest inventory, monitoring, and mapping of Douglas-fir forests in western Oregon. **Canadian Journal of Forest Research**, Toronto, v. 31, n. 3, p. 78–87, Dec. 2000.

LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; ACKER, S.A.; PARKER, G.G.; SPIES, T.A.; HARDING,

D. LiDAR Remote Sensing of the Canopy Structure and Biophysical Properties of Douglas-Fir Western Hemlock Forests. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 70, n. 3, p. 339–361, Dec. 1999.

LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; HARDING, D.J.; PARKER, G.G.; ACKER, S.A.; GOWER, S.T. LiDAR remote sensing of above-ground biomass in three biomes. **Global Ecology and Biogeography**, Edinburgh, v. 11, p. 393–399, Sep. 2002.

MALLOWS, C.L. Some comments on Cp. **Technometrics**, Milwaukee, v. 15, n. 4, p. 661–675, Nov. 1973.

MACEDO, R.D.C. **Estimativa volumétrica de povoamento clonal de *Eucalyptus* spp. através de laser scanner aerotransportado**. 2009. 143 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2009.

MCGAUGHEY, R.J. **FUSION/LDV**: software for LiDAR Data Analysis and Visualization [Computer program]. Washington: USDA, Forest Service Pacific Northwest Research Station, 2013. 150 p. Disponível em: <http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2013.

NÆSSET, E. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 61, n. 3, p. 246–253, Nov. 1997.

_____. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 80, n. 1, p. 88–99, Apr. 2002.

_____. Estimation of above- and below-ground biomass in boreal forest ecosystems. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Freiburg, v. 36, n. 8, p. 145–148, Oct. 2004a.

_____. Practical large-scale forest stand inventory using a small footprint airborne scanning laser. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Oslo, v. 19, n. 2, p. 164–179, Mar. 2004b.

NÆSSET, E.; BJERKNES, K.O. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 78, p. 328–340, Dec. 2001.

NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T. Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. **Remote Sensing of Environment**, Basel, v. 112, n. 6, p. 3079–3090, June 2008.

NAKAI, Y.; HOSOI, F.; OMASA, K. Estimating carbon stocks of coniferous woody canopy trees using airborne LiDAR and passive optical sensor. In: BRETAR, F; PIERROT-DESEILLIGNY, M; VOSSSELMAN, G. (Ed.). **Laser scanning 2009**. Paris: IAPRS, 2009. v. 38, pt. 3/W8.

- OMASA, K.; QIU, G.Y.; WATANUKI, K.; YOSHIMI, K.; AKIYAMA, Y. Accurate estimation of forest carbon stocks by 3-D remote sensing of individual trees. **Environmental Science & Technology**, Iowa, v. 37, n. 6, p. 1198-1201, Mar. 2003.
- PATENAUDE, G.L.; HILL, R.A.; MILNE, R.; GAVEAU, D.L.A.; BRIGGS, B.B.J.; DAWSON, T.P. Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, Basel, v. 93, n. 3, p. 368-380, Nov. 2004.
- RODRIGUEZ, L.C.E.; POLIZEL, J.L.; FERRAZ, S.F. de B.; ZONETE, M.F.; FERREIRA, M.Z. Inventário florestal com tecnologia laser aerotransportada de plantios de *Eucalyptus* spp. no Brasil. **Ambiência**, Guarapuava, v. 6, p. 67-80, jul. 2010.
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, London, n. 52, v. 3/4, p. 591-611, Dec. 1965.
- SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G.; GÖRGENS, E.B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 711-718, maio 2005.
- STEPHENS, P.; WATT, P.; LOUBSER, D.; HAYWOOD, A.; KIMBERLEY, M. Estimation of carbon stocks in New Zealand planted forests using airborne scanning LiDAR. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Netherlands, v. 36, p. 389-394. 2007.
- STEPHENS, P.R.; KIMBERLEY, M.O.; BEETS, P.N.; PAUL, T.S.H.; SEARLES, N.; BELL, A.; BRACK, C.; BROADLEY, J. Airborne scanning LiDAR in a double sampling forest carbon inventory. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 117, p. 348-357, Feb. 2012.
- YU, C.M. **Sequestro florestal do carbono no Brasil: dimensões políticas socioeconômicas e ecológicas**. São Paulo: Annablume; IEB, 2004. 280 p.
- ZANDONÁ, D.F. **Potencial do uso de dados laser scanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas**. 2006. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- ZONETE, M.F. **Análise do uso da tecnologia laser aerotransportado para inventários florestais em plantios clonais de *Eucalyptus* spp. no sul da Bahia**. 2009. 95 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- ZONETE, M. F.; RODRIGUEZ, L. C. E.; PACKALÉN, P. Estimación de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia : uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 225-235, Jun. 2010.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Comparado às florestas naturais, as florestas plantadas exercem um importante papel na remoção do CO₂ atmosférico, em função das suas extensas áreas e rapidez de crescimento. Conseqüentemente, abrem-se portas para a elaboração de projetos de MDL e a possível obtenção de créditos de carbono em florestas plantadas. Porém, ainda há poucos estudos científicos que investigam o potencial de fixação do carbono atmosférico em diferentes tipologias florestais brasileiras, tanto de florestas plantadas como de florestas nativas. As técnicas de mensuração do carbono estocado nesses ecossistemas ainda são incipientes. Desta forma, e de acordo com os resultados apresentados neste trabalho, foi possível delinear as seguintes considerações finais:

- i) Apesar da análise destrutiva da biomassa ser trabalhosa e onerosa, faz-se necessário o uso dessa técnica para a construção de modelos específicos para determinadas regiões (índices de sitio). Estes modelos construídos podem servir de base à estimativa do estoque de carbono em campo, e à construção de novos modelos baseados em métodos indiretos da estimativa do estoque de carbono florestal em nível de talhão, como os apresentados neste trabalho com dados LiDAR;
- ii) As métricas de inventário *DAP* e *Ht* têm-se mostrado importantes variáveis explicativas em modelos construídos em nível de árvores para a estimativa do estoque de carbono em plantios de eucaliptos, com análise destrutiva da biomassa aérea florestal.
- iii) O lenho tem sido o componente da biomassa aérea que apresenta maior contribuição para o estoque de carbono total em árvores de eucaliptos, seguido da casca, galhos vivos, das folhas e dos galhos secos;
- iv) A maior parte do carbono total presente na biomassa aérea na floresta está presente no lenho comercial, que por sua vez é submetido e convertido em matéria prima nas indústrias de celulose e papel, e basicamente um terço do carbono total permanece no campo pela parte residual da árvore;
- v) A tecnologia LiDAR tem se mostrado nos últimos anos uma importante e potente ferramenta para a estimativa de parâmetros biométricos em plantios florestais. Acuradas informações do estoque de carbono total, lenho comercial

e parte residual foram obtidas em plantações de eucaliptos com modelos criados através de dados LiDAR nesta investigação;

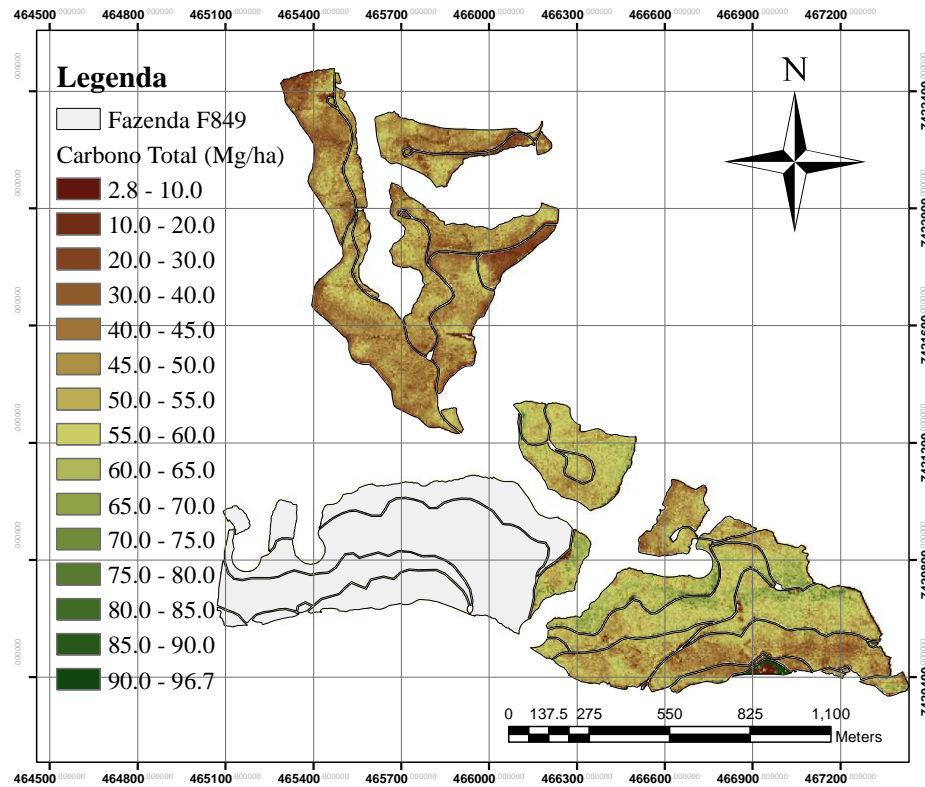
- vi) As métricas LiDAR que tiveram maiores contribuições para os modelos ajustados do carbono total, lenho comercial e parte residual foram: $h_{p75}^{1/2}$, $h_{cv}^{1/2}$, $h_{desv}^{1/2}$, $I_{max}^{1/2}$, $I_{med}^{1/2}$, $I_{p80}^{1/2}$ e $d_c^{1/2}$. A robustez dos modelos propostos é confirmada pela natureza das variáveis selecionadas;
- vii) A metodologia de processamento e análise estatística empregada neste trabalho pode ser aplicada em futuros trabalhos que objetivam a estimativa de parâmetros biométricos em plantios florestais em nível de talhão, tais como volume total e comercial, altura média e dominante, área basal e densidade de indivíduos arbóreos;
- viii) O critério de Akaike corrigido tem sido muito empregado na avaliação de modelos estatísticos, porém, em trabalhos futuros, recomenda-se a avaliação e escolha dos melhores modelos LiDAR também usando critérios envolvendo o conceito de parcimônia;
- ix) Neste estudo, em função da baixa relação parcelas-variáveis, o ajuste dos modelos para estimar estoque de carbono com dados LiDAR não considerou a estratificação dos dados em diferentes idades, material genético e qualidade de sítio. Entretanto, em futuros trabalhos, e com intuito de atingir uma maior acurácia nas estimativas de carbono, recomenda-se que esses ajustes considerem essa estratificação;
- x) Há a presença de uma elevada colinearidade entre as métricas LiDAR, sendo necessária uma pré-seleção. A pré-seleção de variáveis é portanto uma etapa fundamental para qualquer investigação a ser conduzida com dados LiDAR;
- xi) A análise paramétrica, representada neste trabalho pela regressão linear múltipla, tem sido regularmente empregada na construção de modelos LiDAR para a estimativa de parâmetros biométricos de plantios florestais. Neste trabalho todos os modelos foram aceitos quanto aos pressupostos da normalidade e homogeneidade de variâncias, porém para futuros trabalhos recomenda-se a utilização de técnicas não paramétricas de análise estatística, pois algumas métricas LiDAR podem apresentar assimetria na sua distribuição;
- xii) Com os dados LiDAR, além das construções dos modelos de estimação de carbono, pode-se também obter uma espacialização altamente precisa do estoque de carbono total da parte aérea e nos compartimentos lenho comercial

e resíduo da árvore. Entretanto, experimentos envolvendo a integração de dados LiDAR com imagens de natureza multispectral, hiperespectral e de dados de microondas (Radar) também são sugeridas para futuras investigações envolvendo consideráveis extensões territoriais;

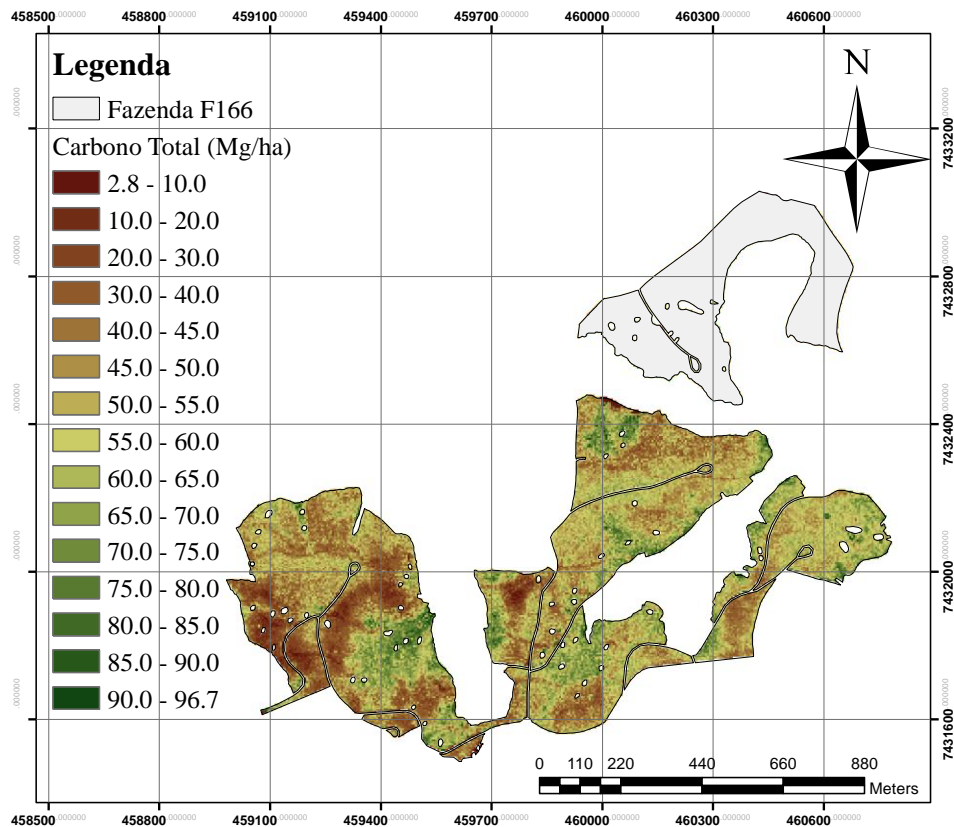
- xiii) Para uma maior acurácia na estimativa do estoque de carbono total, lenho comercial e parte residual, recomenda-se o emprego do processamento de dados LiDAR baseados em árvores individuais;
- xiv) E, considerando que a tecnologia LiDAR é recente no Brasil, e poucos estudos científicos foram concluídos até o presente momento, recomenda-se uma a continuidade das pesquisas com dados LiDAR no setor florestal. Espera-se que em um futuro próximo esta tecnologia se torne operacional nas empresas florestais brasileiras.

APÊNDICES

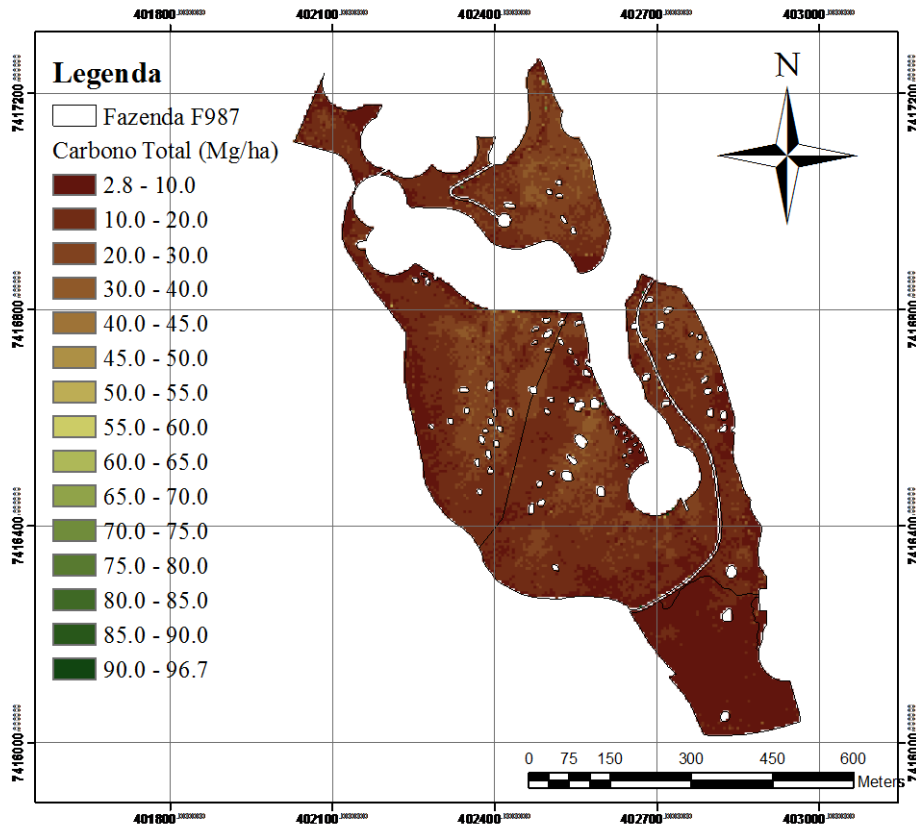
APÊNDICE A - Espacialização do carbono total estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F849.



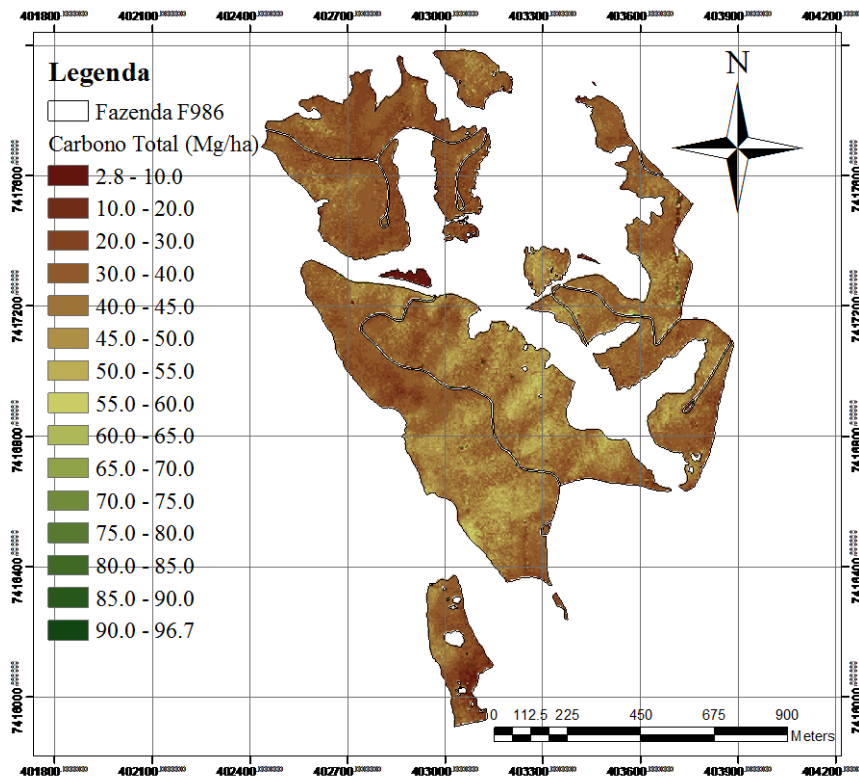
APÊNDICE B - Espacialização do carbono total estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F166.



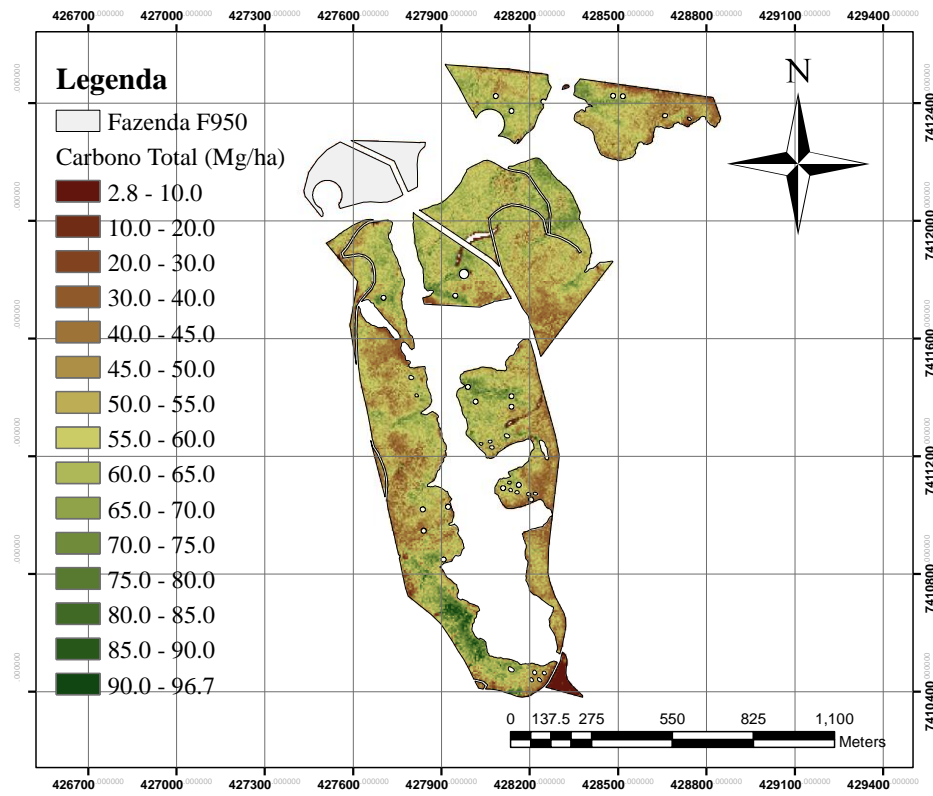
APÊNDICE C - Espacialização do carbono total estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F987



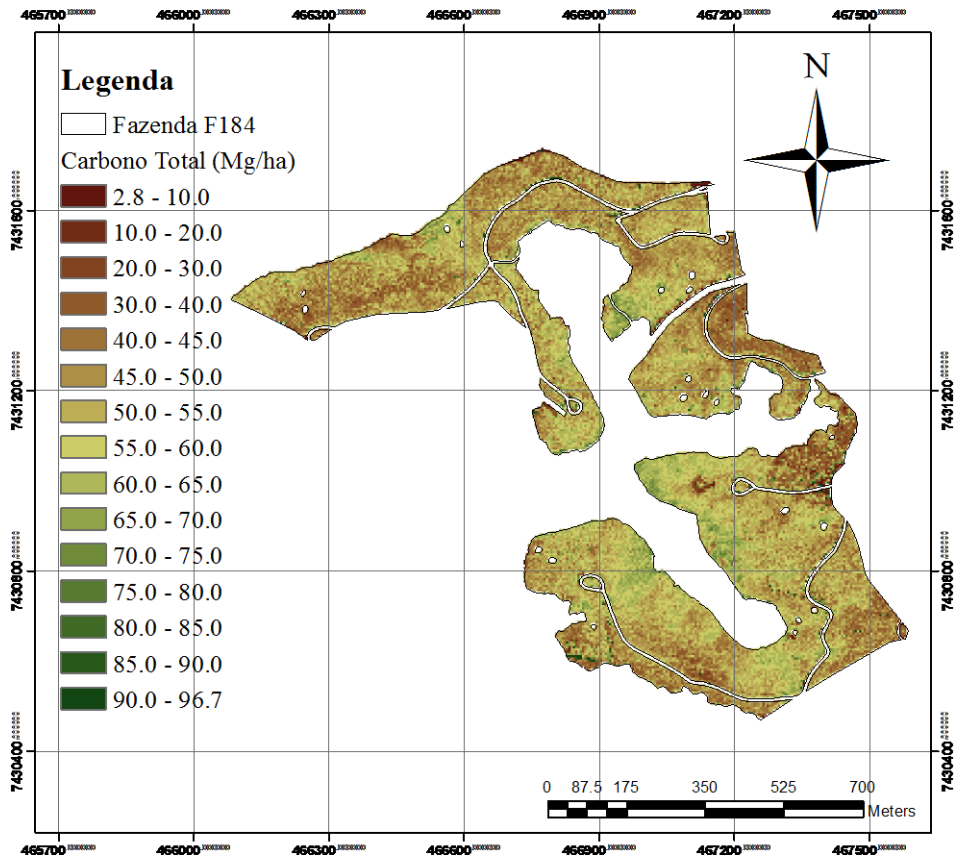
APÊNDICE D - Espacialização do carbono total estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F986.



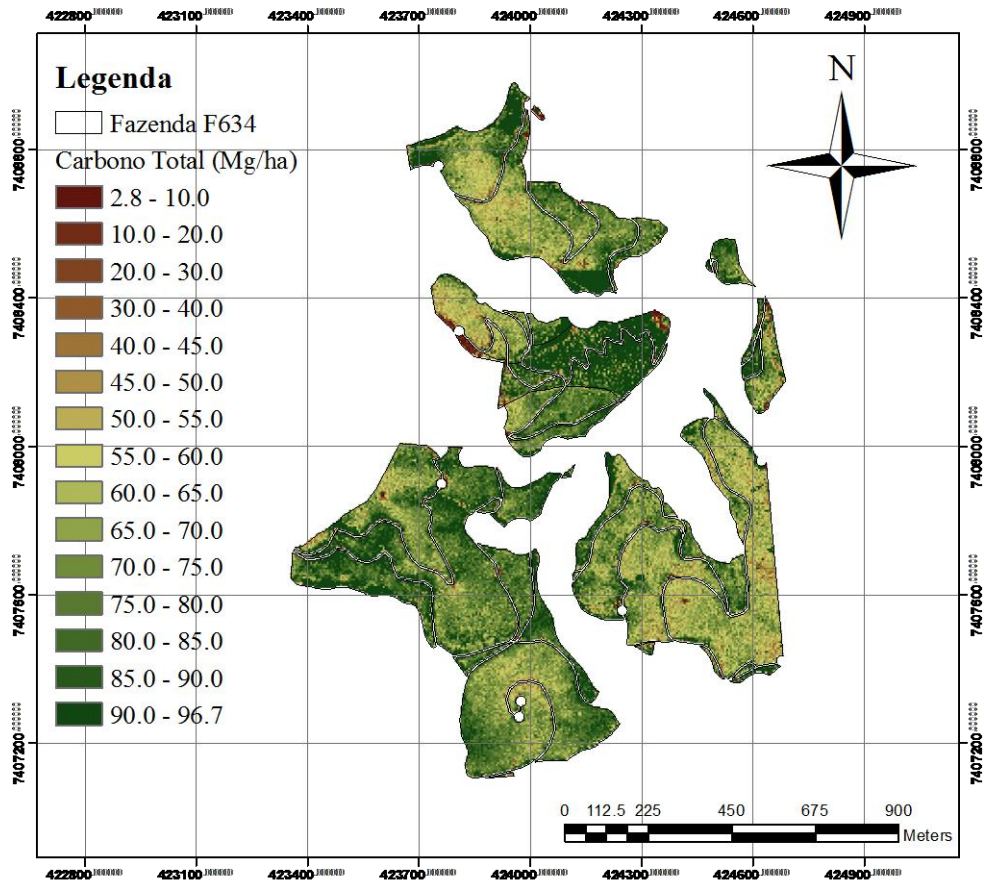
APÊNDICE E - Espacialização do carbono total estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F850



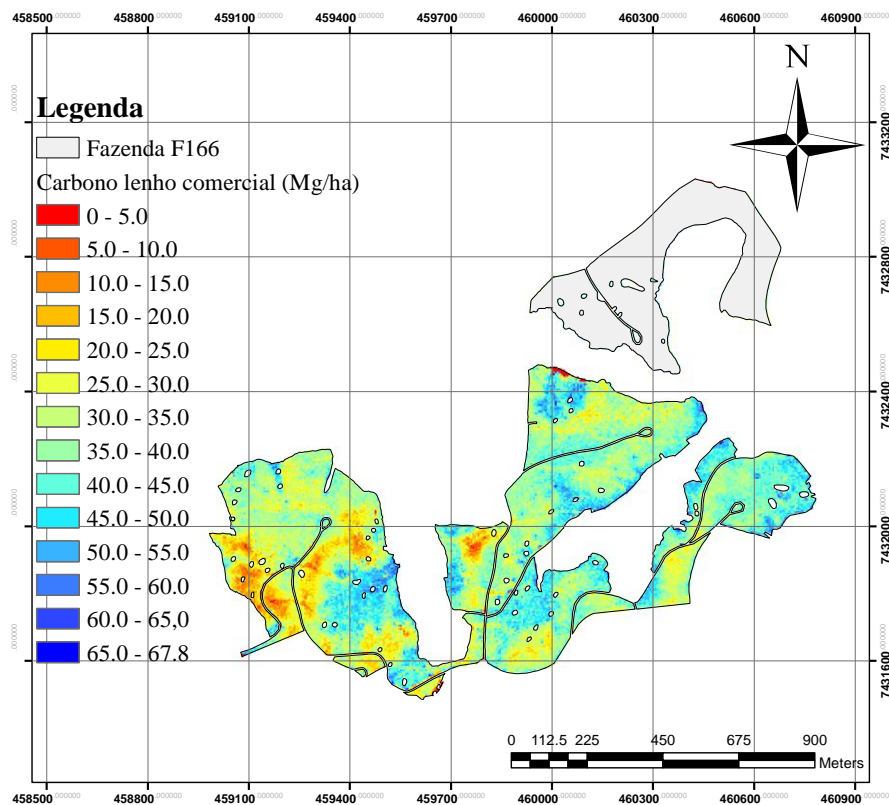
APÊNDICE F - Espacialização do carbono total estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F184



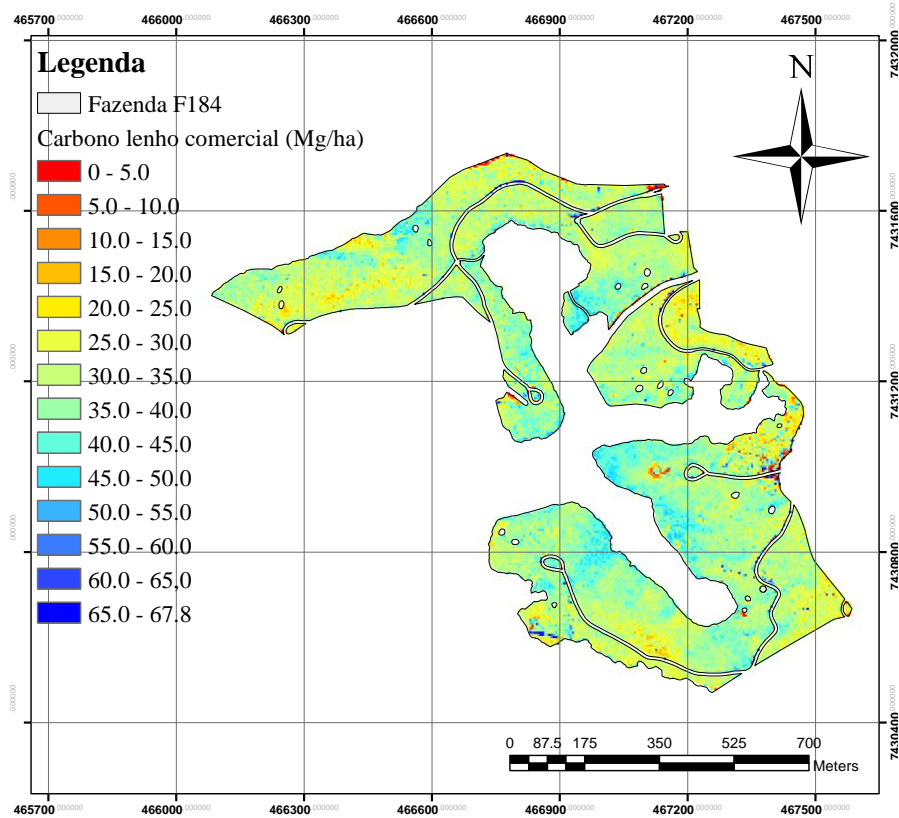
APÊNDICE G - Espacialização do carbono total estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F634



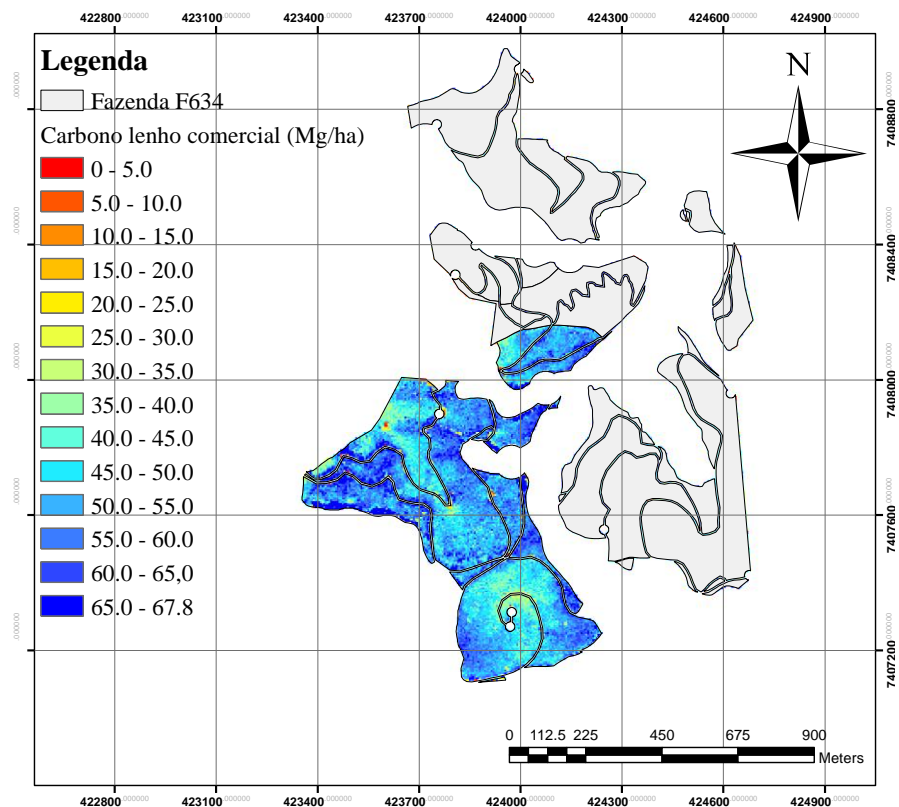
APÊNDICE H - Espacialização do carbono no lenho comercial estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F166



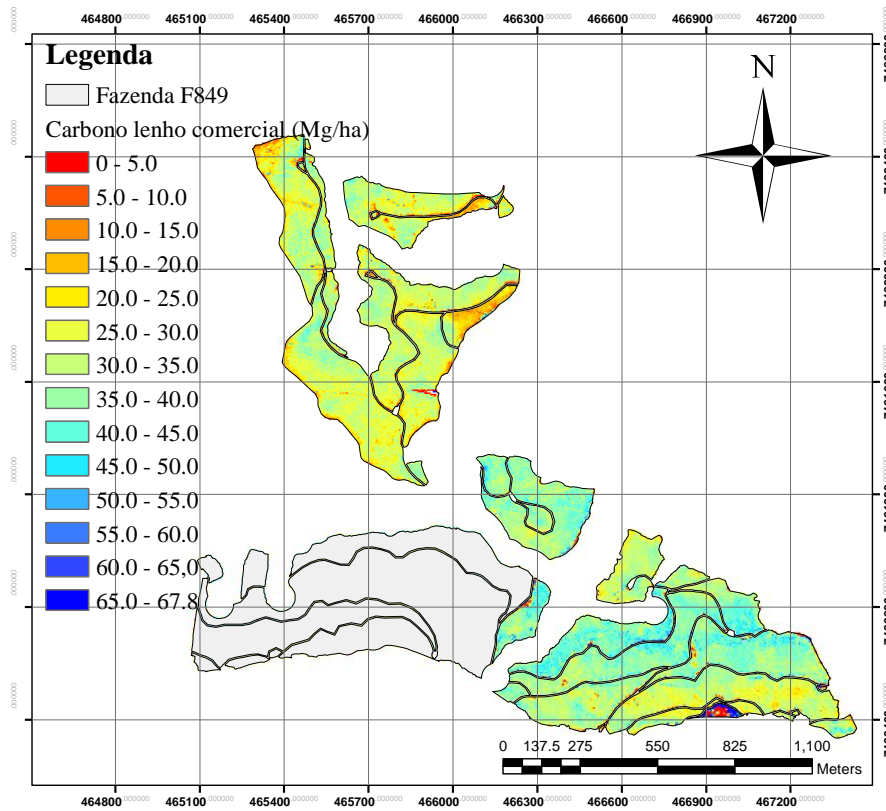
APÊNDICE I - Espacialização do carbono no lenho comercial estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F184



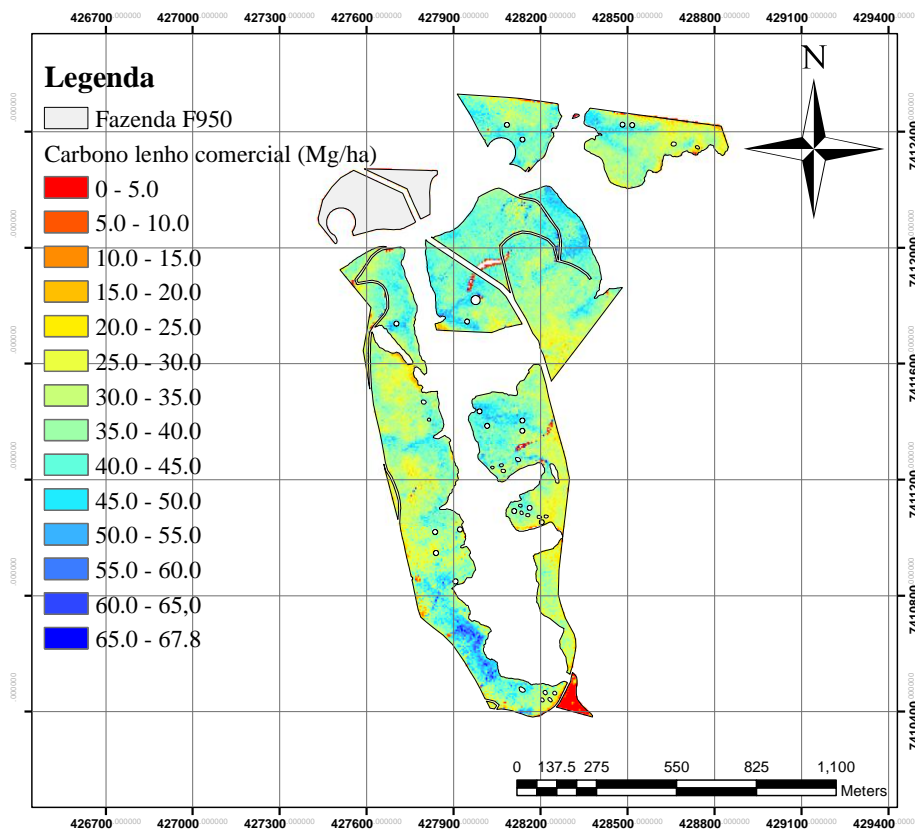
APÊNDICE J - Espacialização do carbono no lenho comercial estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F634



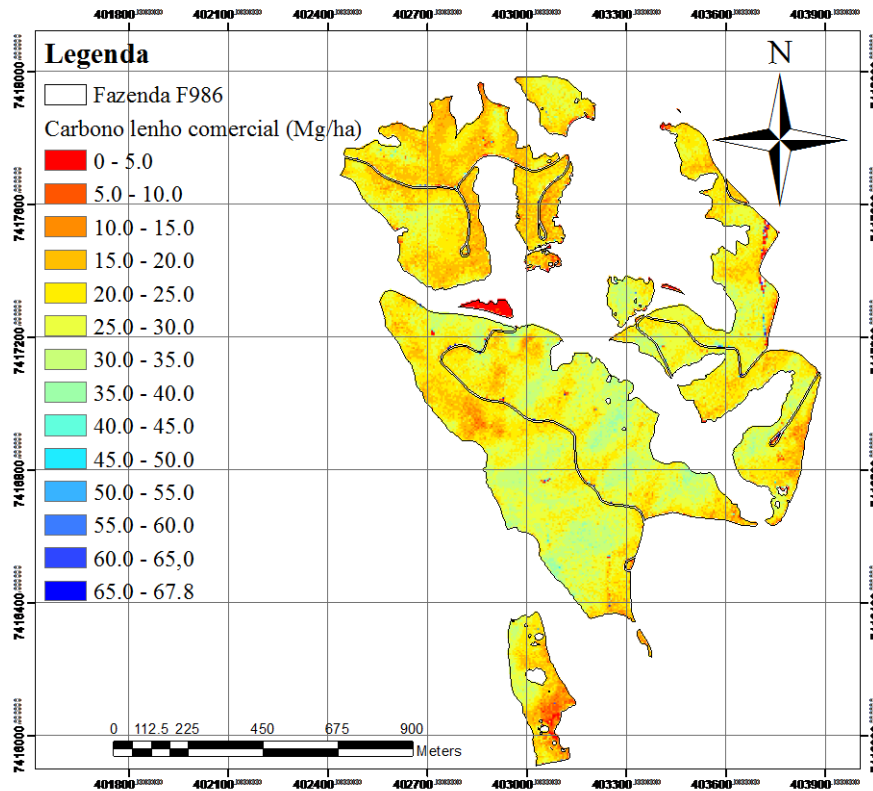
APÊNDICE K - Espacialização do carbono no lenho comercial estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F849



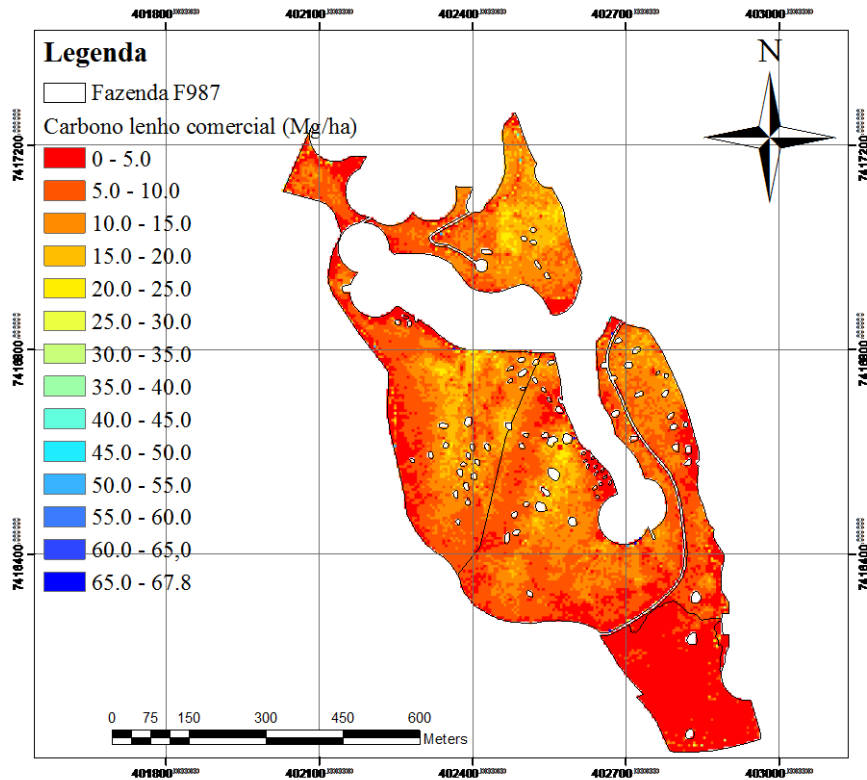
APÊNDICE L - Espacialização do carbono no lenho comercial estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F950



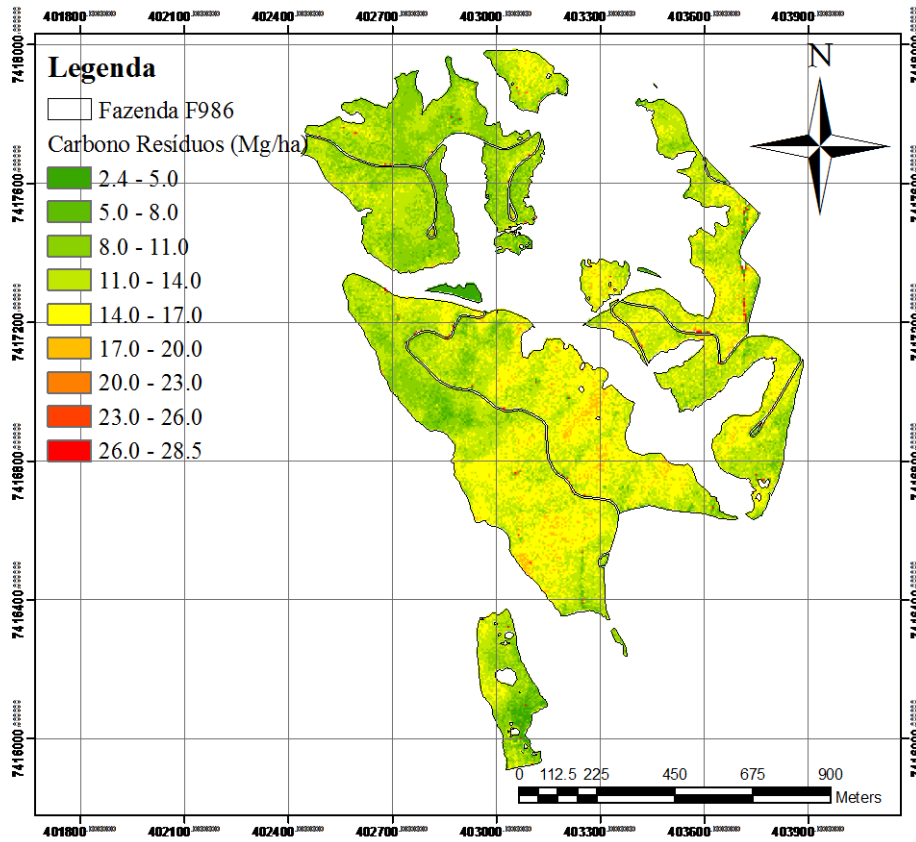
APÊNDICE M - Espacialização do carbono no lenho comercial estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F986



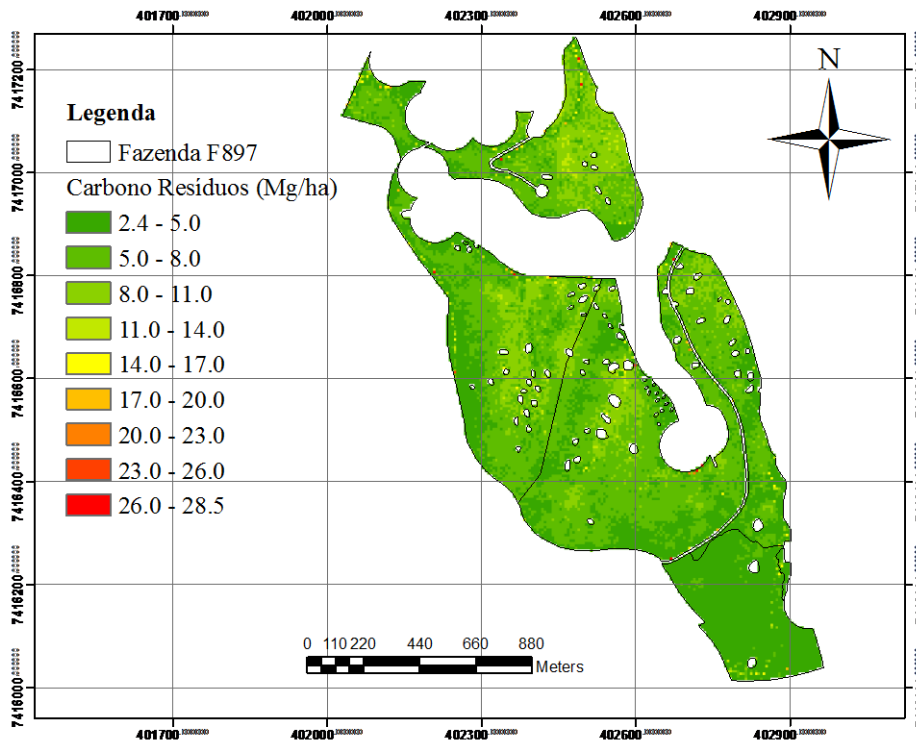
APÊNDICE N - Espacialização do carbono no lenho comercial estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F987



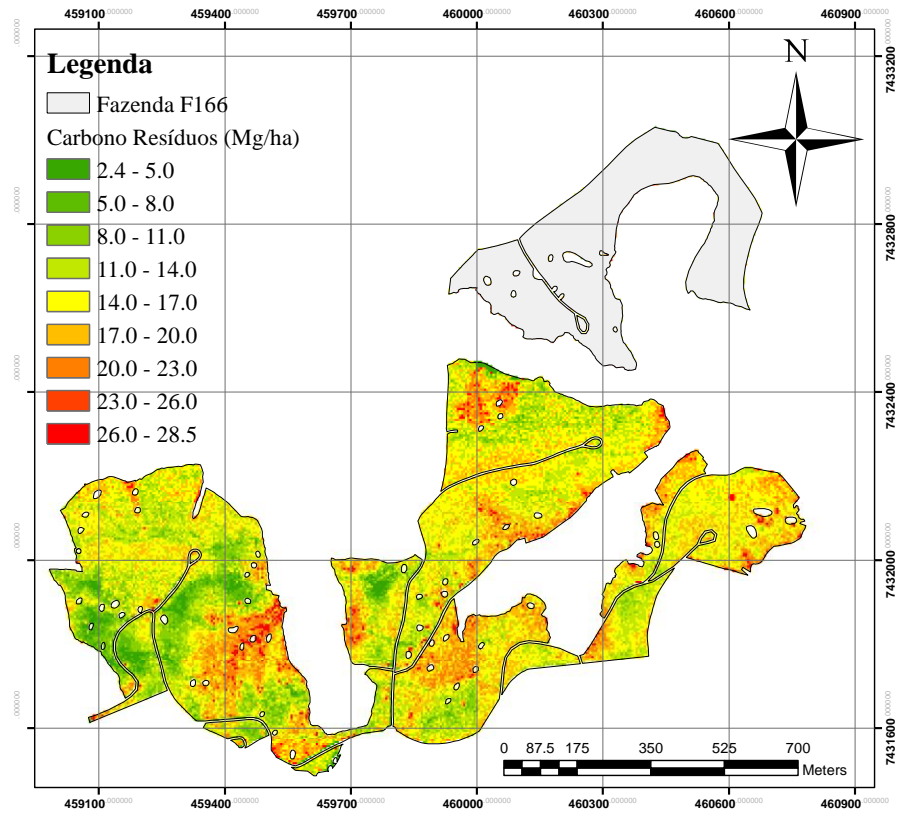
APÊNDICE O - Espacialização do carbono no resíduo da árvore estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F986.



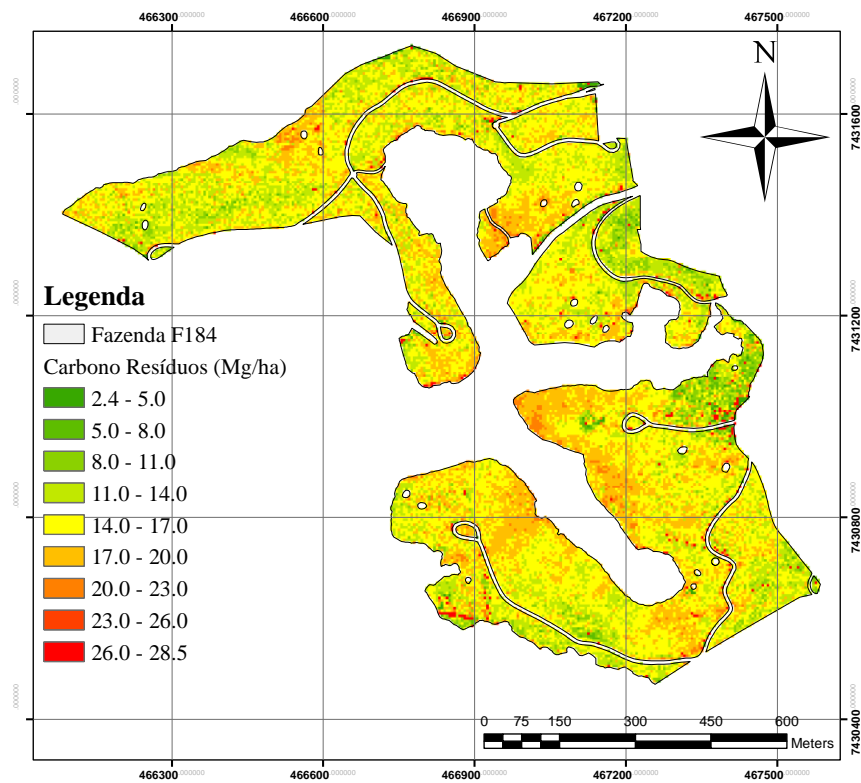
APÊNDICE P - Espacialização do carbono no resíduo da árvore estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F986.



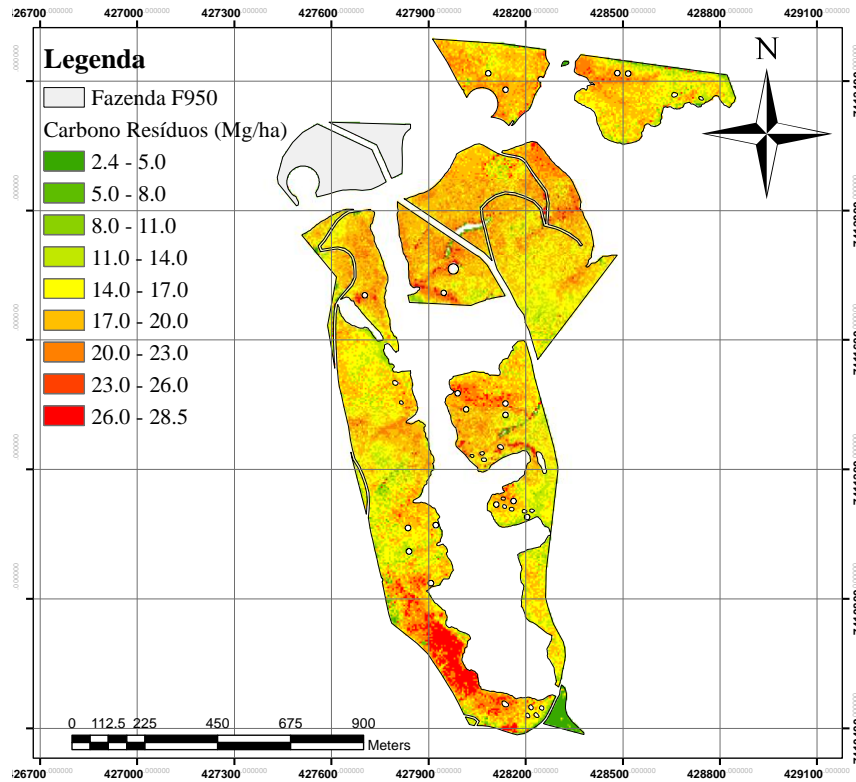
APÊNDICE Q - Espacialização do carbono no resíduo da árvore estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F166.



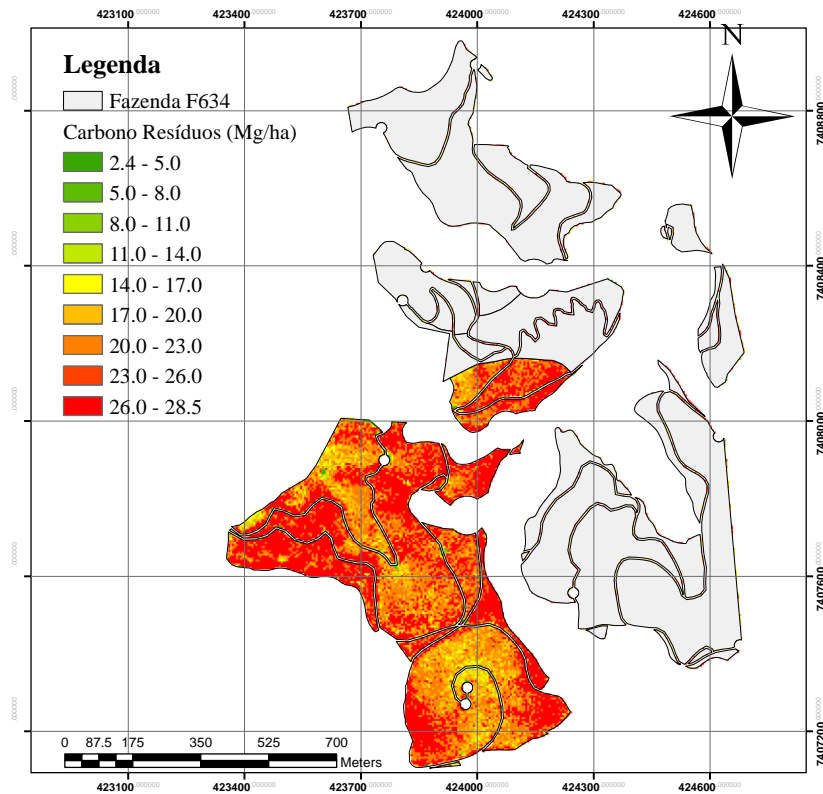
APÊNDICE R - Espacialização do carbono no resíduo da árvore estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F986.



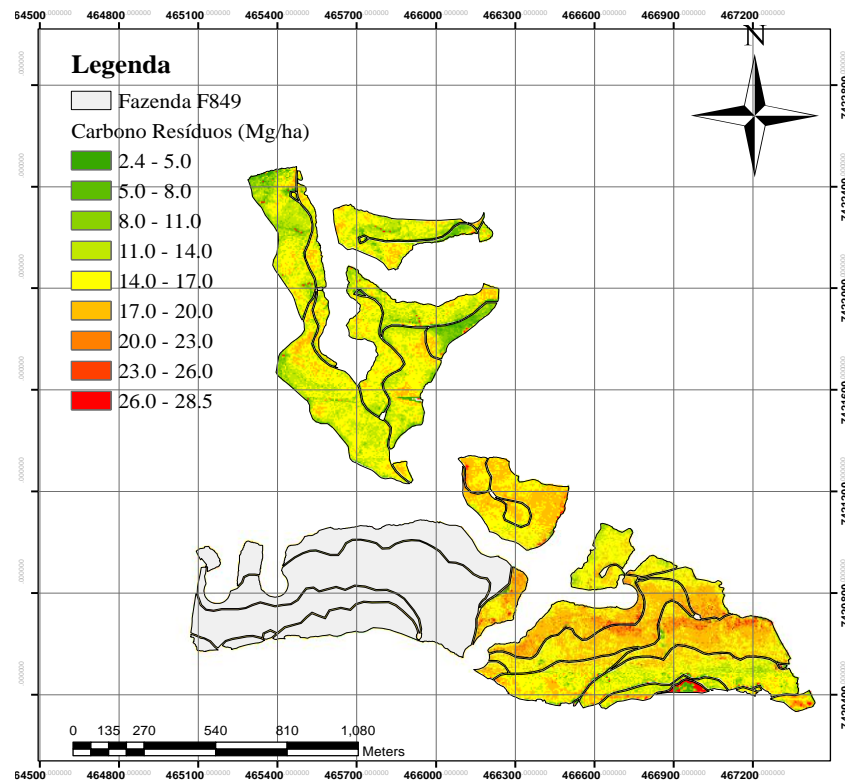
APÊNDICE S - Espacialização do carbono no resíduo da árvore estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F950.



APÊNDICE T - Espacialização do carbono no resíduo da árvore estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F634.



APÊNDICE U - Espacialização do carbono no resíduo da árvore estimado pelo modelo LiDAR na fazenda F849.



APÊNDICE V – Correlação de Pearson entre as métricas LiDAR.

r	H _{max}	H _{med}	H _{desv}	H _{var}	H _{cv}	H _{p25}	H _{p50}	H _{p70}	H _{p75}	H _{p80}	H _{p90}	H _{p95}	H _{p99}	I _{max}	I _{med}	I _{min}	I _{desv}	I _{var}	I _{cv}	I _{p25}	I _{p50}	I _{p70}	I _{p75}	I _{p80}	I _{p90}	I _{p95}	I _{p99}	C _{dossel}
H _{max}	1	0.90	0.81	0.81	0.16	0.30	0.93	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.00	0.29	-0.23	0.18	-0.04	-0.08	-0.29	0.24	0.27	0.28	0.27	0.26	0.15	0.06	-0.07	-0.05
H _{med}	0.90	1	0.59	0.56	-0.21	0.59	0.95	0.93	0.93	0.92	0.92	0.92	0.91	0.19	-0.27	0.13	-0.19	-0.22	-0.49	0.28	0.29	0.29	0.27	0.25	0.03	-0.11	-0.20	0.30
H _{desv}	0.81	0.59	1	1.00	0.66	-0.06	0.78	0.82	0.83	0.83	0.83	0.82	0.82	0.31	0.05	0.47	0.36	0.32	0.12	0.44	0.46	0.46	0.46	0.46	0.43	0.43	0.35	-0.43
H _{var}	0.81	0.56	1.00	1	0.68	-0.10	0.77	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.32	0.04	0.45	0.35	0.30	0.12	0.41	0.43	0.43	0.43	0.43	0.42	0.42	0.33	-0.45
H _{cv}	0.16	-0.21	0.66	0.68	1	-0.64	0.07	0.14	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.18	0.30	0.47	0.63	0.60	0.61	0.28	0.30	0.31	0.32	0.35	0.52	0.64	0.62	-0.81
H _{p25}	0.30	0.59	-0.06	-0.10	-0.64	1	0.39	0.33	0.33	0.32	0.31	0.31	0.31	-0.01	-0.20	-0.13	-0.37	-0.39	-0.53	0.11	0.08	0.06	0.04	0.00	-0.31	-0.45	-0.29	0.72
H _{p50}	0.93	0.95	0.78	0.77	0.07	0.39	1	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.25	-0.17	0.29	0.02	-0.02	-0.31	0.39	0.41	0.40	0.39	0.36	0.20	0.10	0.00	0.08
H _{p70}	0.98	0.93	0.82	0.81	0.14	0.33	0.98	1	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.27	-0.18	0.27	0.02	-0.02	-0.29	0.35	0.37	0.38	0.37	0.35	0.21	0.11	-0.01	-0.02
H _{p75}	0.98	0.93	0.83	0.81	0.15	0.33	0.97	1.00	1	1.00	1.00	1.00	0.99	0.27	-0.19	0.27	0.02	-0.02	-0.28	0.34	0.37	0.37	0.36	0.35	0.21	0.11	-0.02	-0.03
H _{p80}	0.99	0.92	0.83	0.81	0.15	0.32	0.97	1.00	1.00	1	1.00	1.00	0.99	0.27	-0.19	0.26	0.01	-0.03	-0.28	0.33	0.36	0.36	0.36	0.34	0.21	0.11	-0.02	-0.03
H _{p90}	0.99	0.92	0.83	0.81	0.16	0.31	0.96	0.99	1.00	1.00	1	1.00	1.00	0.28	-0.20	0.25	0.00	-0.04	-0.28	0.31	0.34	0.35	0.34	0.33	0.20	0.10	-0.03	-0.04
H _{p95}	0.99	0.92	0.82	0.81	0.16	0.31	0.96	0.99	1.00	1.00	1.00	1	1.00	0.28	-0.21	0.23	-0.01	-0.05	-0.29	0.29	0.32	0.33	0.33	0.31	0.19	0.09	-0.04	-0.04
H _{p99}	1.00	0.91	0.82	0.81	0.16	0.31	0.95	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1	0.29	-0.22	0.21	-0.03	-0.06	-0.29	0.27	0.30	0.31	0.31	0.29	0.17	0.08	-0.06	-0.04
I _{max}	0.29	0.19	0.31	0.32	0.18	-0.01	0.25	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.29	1	-0.14	0.12	-0.02	-0.03	-0.17	0.21	0.16	0.13	0.13	0.11	0.07	0.06	-0.02	-0.06
I _{med}	-0.23	-0.27	0.05	0.04	0.30	-0.20	-0.17	-0.18	-0.19	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.14	1	0.48	0.65	0.63	0.65	0.33	0.34	0.37	0.38	0.40	0.45	0.49	0.67	-0.25
I _{min}	0.18	0.13	0.47	0.45	0.47	-0.13	0.29	0.27	0.27	0.26	0.25	0.23	0.21	0.12	0.48	1	0.87	0.85	0.40	0.91	0.95	0.95	0.96	0.97	0.94	0.86	0.81	-0.42
I _{desv}	-0.04	-0.19	0.36	0.35	0.63	-0.37	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	-0.01	-0.03	-0.02	0.65	0.87	1	0.99	0.79	0.63	0.67	0.71	0.72	0.76	0.88	0.94	0.96	-0.60
I _{var}	-0.08	-0.22	0.32	0.30	0.60	-0.39	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.04	-0.05	-0.06	-0.03	0.63	0.85	0.99	1	0.79	0.61	0.65	0.68	0.70	0.73	0.88	0.95	0.94	-0.60
I _{cv}	-0.29	-0.49	0.12	0.12	0.61	-0.53	-0.31	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.29	-0.29	-0.17	0.65	0.40	0.79	0.79	1	0.08	0.11	0.16	0.18	0.23	0.47	0.68	0.80	-0.61
I _{p25}	0.24	0.28	0.44	0.41	0.28	0.11	0.39	0.35	0.34	0.33	0.31	0.29	0.27	0.21	0.33	0.91	0.63	0.61	0.08	1	0.97	0.93	0.91	0.89	0.75	0.63	0.62	-0.18
I _{p50}	0.27	0.29	0.46	0.43	0.30	0.08	0.41	0.37	0.37	0.36	0.34	0.32	0.30	0.16	0.34	0.95	0.67	0.65	0.11	0.97	1	0.99	0.98	0.97	0.82	0.67	0.64	-0.20
I _{p70}	0.28	0.29	0.46	0.43	0.31	0.06	0.40	0.38	0.37	0.36	0.35	0.33	0.31	0.13	0.37	0.95	0.71	0.68	0.16	0.93	0.99	1	1.00	0.99	0.86	0.69	0.66	-0.23
I _{p75}	0.27	0.27	0.46	0.43	0.32	0.04	0.39	0.37	0.36	0.36	0.34	0.33	0.31	0.13	0.38	0.96	0.72	0.70	0.18	0.91	0.98	1.00	1	1.00	0.87	0.71	0.67	-0.25
I _{p80}	0.26	0.25	0.46	0.43	0.35	0.00	0.36	0.35	0.35	0.34	0.33	0.31	0.29	0.11	0.40	0.97	0.76	0.73	0.23	0.89	0.97	0.99	1.00	1	0.90	0.74	0.69	-0.30
I _{p90}	0.15	0.03	0.43	0.42	0.52	-0.31	0.20	0.21	0.21	0.21	0.20	0.19	0.17	0.07	0.45	0.94	0.88	0.88	0.47	0.75	0.82	0.86	0.87	0.90	1	0.92	0.76	-0.58
I _{p95}	0.06	-0.11	0.43	0.42	0.64	-0.45	0.10	0.11	0.11	0.11	0.10	0.09	0.08	0.06	0.49	0.86	0.94	0.95	0.68	0.63	0.67	0.69	0.71	0.74	0.92	1	0.82	-0.69
I _{p99}	-0.07	-0.20	0.35	0.33	0.62	-0.29	0.00	-0.01	-0.02	-0.02	-0.03	-0.04	-0.06	-0.02	0.67	0.81	0.96	0.94	0.80	0.62	0.64	0.66	0.67	0.69	0.76	0.82	1	-0.51
C _{dossel}	-0.05	0.30	-0.43	-0.45	-0.81	0.72	0.08	-0.02	-0.03	-0.03	-0.04	-0.04	-0.04	-0.06	-0.25	-0.42	-0.60	-0.60	-0.61	-0.18	-0.20	-0.23	-0.25	-0.30	-0.58	-0.69	-0.51	1