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

**Avaliação do efeito da face de exposição solar sobre o crescimento
de plantios comerciais de *Eucalyptus* sp na região sudoeste do
estado de São Paulo**

Débora Romano Camilo Gonçalves

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

**Piracicaba
2015**

Débora Romano Camilo Gonçalves
Engenheira Florestal

Avaliação do efeito da face de exposição solar sobre o crescimento de plantios comerciais de *Eucalyptus* sp na região sudoeste do estado de São Paulo

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

Piracicaba
2015

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

Gonçalves, Débora Romano Camilo

Avaliação do efeito da face de exposição solar sobre o crescimento de plantios comerciais de *Eucalyptus* sp na região sudoeste do estado de São Paulo / Débora Romano Camilo Gonçalves. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.

90 p. : il.

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

1. Produtividade florestal 2. LiDAR 3. Laser aerotransportado 4. Planejamento florestal I. Título

CDD 634.9734
G635a

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

Aos meus pais, que sempre se esforçaram para que eu pudesse ter as melhores oportunidades.

À minha irmã, que com seu exemplo acadêmico me inspirou.

Aos meus avós que mesmo sem estudo formal sempre nos deram exemplo de sabedoria em suas atitudes.

DEDICO

Ao amor da minha vida, Érico, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Deus, a maior riqueza da minha vida, que ilumina diariamente meu caminho na busca de Sua sabedoria.

Ao Prof. Luiz Carlos que me confiou essa oportunidade e acreditou no meu trabalho, além de me ajudar a olhar a vida profissional sob outro ângulo e sempre lembrar que sem sacrifício não há vitória.

À Prof. Taciana e ao Prof. Thadeu pelas discussões estatísticas.

À toda equipe Fototerra, principalmente: Cesar, Lídia, Vinicius e Pedro.

Agradeço à toda equipe da Suzano Papel e Celulose que me apoiou e patrocinou esse projeto de pesquisa. À equipe de geoprocessamento e aos Gava (Izabel e José Luiz) pelas contribuições.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Florestais, sempre dispostos, em especial ao Jefferson e à Giovana.

Aos alunos de pós graduação do CMQ, em especial à equipe do GT-LiDAR. Meu muito obrigada pela paciência ao Eric Gorgens, e a todos da equipe pelo companheirismo e incentivo. Ao André por sua atenção no ensinar e à Danitiele pelas contribuições e correções.

Ao Padre Vilson que com seu discernimento me ajudou com suas palavras doces e verdadeiras.

Aos meus amigos e familiares, em especial à Ana Elisa, Flavia e Daniele, que entenderam minha ausência e mesmo à distância me incentivaram a perseverar. A todos que direta ou indiretamente me ajudaram ao longo dessa jornada, muito obrigada.

*Não haverá borboletas se a vida não passar por longas
e silenciosas metamorfoses...*

Rubem Alves

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	13
LISTA DE FIGURAS.....	15
LISTA DE TABELAS.....	17
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	19
1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 Objetivos e hipóteses.....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 Florestas plantadas: competitividade e evolução da produtividade.....	25
2.2 Fatores bióticos e abióticos que interferem na produtividade florestal.....	28
2.2.1 Comportamento genético.....	30
2.2.2 Condições climáticas e fisiográficas.....	31
2.2.3 Manejo florestal.....	33
2.3 Tecnologia de escaneamento a laser.....	37
2.3.1 Na área florestal.....	41
2.3.2 No Brasil.....	42
2.3.3 Potencial de uso.....	42
2.4 A altura como estimador de performance florestal.....	44
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	47
3.1 Área de estudo.....	47
3.1.1 Caracterização climática.....	48
3.2 Planejamento de voo e mobilização.....	49
3.2.1 Licença do Ministério da Defesa.....	49
3.2.2 Plano de voo gráfico e analítico.....	49
3.2.3 Referência geodésica.....	50
3.3 Equipamentos, softwares e materiais de voo.....	50
3.3.1 Sensor laser aerotransportado.....	51
3.3.2 Aeronave e equipe técnica.....	52
3.4 Realização do voo.....	52
3.4.1 Condições de voo.....	52
3.4.2 Parâmetros de voo.....	53
3.4.3 Ficha técnica do aeródromo.....	54

3.5 Processamento de dados.....	54
3.5.1 Pré-análise dos dados laser captados.....	54
3.5.2 Processamento do escaneamento a laser aerotransportado.....	56
3.5.3 Análise da base de dados laser.....	57
3.5.4 Delineamento estatístico.....	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1 Plantios homogêneos de Eucalyptus com idade inferior aos 4 anos.....	67
4.2 Plantios homogêneos de Eucalyptus com idade superior aos 5 anos.....	72
4.3 Considerações.....	79
5 CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS.....	83

RESUMO

Avaliação do efeito da face de exposição solar sobre o crescimento de plantios comerciais de *Eucalyptus* sp na região sudoeste do estado de São Paulo

As regiões de cultivo de eucalipto apresentam um grande número de variações ambientais em nível microrregional, como pode ser facilmente constatado quando se observam as diferenças expressivas entre as produtividades florestais de cada área. No entanto, para se avaliar um ambiente, é necessário identificar segmentos específicos dentro de uma paisagem, tratando-se de uma propriedade florestal e, dentro desse estudo, buscar a compreensão das interações que aí se processam. Este trabalho contribui para entender o efeito da face de exposição solar no crescimento de plantios comerciais de *Eucalyptus*. A proposta metodológica apresentada leva em consideração o conhecimento do meio físico - tendo como base a fisiografia para distinção das faces de exposição solar- além disso, a interação dos fatores fisiográficos com os fatores biológicos são discutidos para subsidiar a tomada de decisão. A acentuada interação genótipo x ambiente presente em muitas culturas faz com que estudos de adaptabilidade a ambientes específicos sejam parte integrante dos programas de pesquisa florestal. A resposta diferenciada dos genótipos a ambientes favoráveis e desfavoráveis pode auxiliar o gestor florestal na alocação assertiva dos materiais genéticos para maximizar a produtividade. O escaneamento a laser aerotransportado, ferramenta de uso precoce no Brasil, é um sensor óptico ativo que mede a distância até os objetos-alvo e foi utilizado para a obtenção da altura das árvores. A área de estudo está localizada na região sudoeste do estado de São Paulo. Dentre as métricas disponíveis do processamento utilizou o percentil 90 de altura para estimar a altura de plantios comerciais homogêneos de *Eucalyptus*. Elaborou-se a análise de variância considerando um delineamento fatorial contemplando a face de exposição solar (norte e sul) e o material genético (clones comerciais), além da interação entre ambos para observar o efeito da face no crescimento em altura do povoamento. Para florestas abaixo de quatro anos de idade observou-se que os plantios de face sul cresceram menos que os da face norte. Para florestas acima de 5 anos essa diferença entre face continua, contudo, quando concluído o desdobramento da interação fatorial observou-se que os materiais genéticos plantados em face norte não diferem entre si, mas a diferença se mantém para florestas em face sul.

Palavras-chave: Produtividade florestal; LiDAR; Laser aerotransportado; Planejamento florestal

ABSTRACT

Evaluation of the effect of the aspect on the growth of commercial *Eucalyptus* sp plantations in the southwest region of the state of São Paulo

The eucalyptus cultivation regions boast a large number of environmental variables in micro-regional level, as can easily be seen when studying the expressive differences between the productivity of each forest area. To evaluate an environment, however, it is necessary to identify specific segments within a landscape with regards to a forest property and within that landscape study to seek the understanding of the interactions that takes place in the process. This work contributes to a better understanding of the effect of the aspect on growth in commercial plantations of *Eucalyptus*. The methodological approach presented in this work takes into account the knowledge of the physical environment, based on physiography, for distinction of aspect on environments, in addition to showing the interaction of physiographic factors with biological factors to support the decision-making process. The sharp interaction genotype x environment present in many cultures leads to studies of adaptability to specific environments to become integral parts of forestry research programs. The differentiated response of genotypes to favorable and unfavorable environments can assist forest managers in the allocation of assertive genetic materials to maximize productivity. The airborne laser scanning, which is an early tool used in Brazil, is an active optical sensor that measures the distance to the target objects, was used to obtain the height of the trees. The study area is located in the southwestern region of the State of São Paulo in Brazil. Among the available processing metrics, it was used 90 percentiles in height to estimate the height of homogeneous commercial plantations of *Eucalyptus*. A variance analysis was devised considering a factorial design contemplating the aspect (North and South) and genetic material (commercial clones), besides the interaction between both to observe the effect of the exposure on the height growth of the settlement. To forests below four years of age, it was observed that the plantations of the South exposure grow less than the north exposure. For forests above five years, this difference between aspect continues, however, when the deployment of factorial interactions is done, it's observed that the genetic materials planted in the north exposure do not differ with each other, but the difference stands within forests in the South exposure.

Keywords: Forest productivity; LiDAR; Airborne Laser scanning; Forest planning

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – SÃO MIGUEL ARCANJO E PILAR DO SUL ESTÃO ENTRE OS MUNICÍPIOS DE MAIOR PRODUÇÃO DE MADEIRA PARA PAPEL E CELULOSE DO ESTADO DE SÃO PAULO, COM VALORES NO ANO DE 2012 DE 568 E 536 MIL M ³ , RESPECTIVAMENTE	47
FIGURA 2 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO, SUDOESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO	48
FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL (MM/MÊS) DA REGIÃO DE ESTUDO	49
FIGURA 4 – PLANO DE VOO DA GLEBA 52I	50
FIGURA 5 – SENSOR LIDAR HARRIER 68I DA TRIMBLE	52
FIGURA 6 – À ESQUERDA, AERONAVE UTILIZADA E À DIREITA, PILOTO E OPERADOR DO VOO	52
FIGURA 7 – FOTO DA ÁREA NO DIA DO SOBREVOO LIDAR.....	53
FIGURA 8 – IMAGEM DE VERIFICAÇÃO DO RECOBRIMENTO TOTAL E AUSÊNCIA DE BURACOS ENTRE FAIXAS DE ESCANEAMENTO EXECUTADAS PARA A GLEBA 52I	55
FIGURA 9 – TRAJETÓRIA DO VOO EXECUTADO	55
FIGURA 10 – MAPA PLANIALTIMÉTRICO DA GLEBA 52H.....	59
FIGURA 11 – MAPA PLANIALTIMÉTRICO DA GLEBA 52I	60
FIGURA 12 – RELEVO SOMBREADO (<i>HILLSHADE</i>) GLEBA 52H	61
FIGURA 13 – RELEVO SOMBREADO (<i>HILLSHADE</i>) GLEBA 52I.....	62
FIGURA 14 – CLASSIFICAÇÃO DA FACE DE EXPOSIÇÃO SOLAR ENTRE NORTE E SUL	63
FIGURA 15 – TIPOS DE RELEVO E SOLOS PREDOMINANTES	63
FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO DE TODOS OS DADOS DISPONÍVEIS NO BANCO DE DADOS, ENFATIZANDO A NÃO DISPONIBILIDADE DE TODOS OS MATERIAIS GENÉTICOS EM TODAS AS FACES E NAS DIFERENTES IDADES.....	64
FIGURA 17 – BOXPLOT DA MÉTRICA PERCENTIL 90 DA ALTURA (M) DE PLANTIOS COM IDADE INFERIOR A 4 ANOS, SEGREGANDO A FACE DE EXPOSIÇÃO SOLAR E O MATERIAL GENÉTICO	68
FIGURA 18 – BOXPLOT DA MÉTRICA PERCENTIL 90 DA ALTURA (M) DE PLANTIOS COM MENOS DE 4 ANOS DE IDADE	69
FIGURA 19 – HISTOGRAMA DA ALTURA (M) RELATIVO À FACE DE EXPOSIÇÃO SOLAR EM POVOAMENTOS JOVENS – DETALHE PARA A MÉDIA DE 19.64M (DESVIO PADRÃO DE 1.5) PARA FACE NORTE E 18.75M (DESVIO PADRÃO DE 1.7) PARA FACE SUL	70

FIGURA 20 – ANÁLISE GRÁFICA DA HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIA E NORMALIDADE DOS DADOS PARA FLORESTAS JOVENS	71
FIGURA 21 – BOXPLOT DA MÉTRICA PERCENTIL 90 DA ALTURA (M) DE PLANTIOS COM MAIS DE 5 ANOS DE IDADE.....	74
FIGURA 22 – ANÁLISE GRÁFICA DA HOMOGENEIDADE DE VARIÂNCIA E NORMALIDADE DOS DADOS PARA FLORESTAS COM IDADE SUPERIOR A 5 ANOS.....	74
FIGURA 23 – ALTURAS MÉDIAS NAS FACES NORTE E SUL PARA O MATERIAL GENÉTICO CL_0004.....	76
FIGURA 24 – ALTURAS MÉDIAS NAS FACES NORTE E SUL PARA O MATERIAL GENÉTICO CL_0006.....	76
FIGURA 25 – PLANTIO DO MATERIAL GENÉTICO CL_0001 EM ÁREA DE FACE SUL: FOLHAS MANCHADAS, MENOR CRESCIMENTO E ARRANQUE	78
FIGURA 26 – HISTOGRAMA DO PERCENTIL 90 DA ALTURA (M) RELATIVO À FACE DE EXPOSIÇÃO SOLAR EM POVOAMENTOS COM IDADE SUPERIOR A 5 ANOS	79

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRODUTIVIDADE (M ³ /HA/ANO) DE ESPÉCIES FOLHOSAS EM DIFERENTES PAÍSES	27
TABELA 2 – COORDENADAS CENTRAIS DAS GLEBAS	47
TABELA 3 – FATORES PARA FLORESTAS COM IDADE INFERIOR AOS 4 ANOS	64
TABELA 4 – FATORES PARA FLORESTAS COM IDADE SUPERIOR AOS 5 ANOS	64
TABELA 5 – MÉDIA DO PERCENTIL 90 DAS ALTURAS (M) DOS TRATAMENTOS (MATERIAL GENÉTICO NA FACE DE EXPOSIÇÃO SOLAR).....	68
TABELA 6 – VARIÂNCIAS DO PERCENTIL 90 DAS ALTURAS DOS FATORES (M).....	68
TABELA 7 – ANOVA DO MODELO	71
TABELA 8 – ANOVA PARA O DESDOBRAMENTO (FACES EM CADA TIPO DE MATERIAL GENÉTICO)	72
TABELA 9 – ANOVA PARA O DESDOBRAMENTO (MATERIAIS GENÉTICOS EM CADA NÍVEL DE FACE)	72
TABELA 10 – TAMANHO AMOSTRAL DOS FATORES POVOAMENTOS ACIMA DE 5 ANOS.....	73
TABELA 11 – MÉDIA DO PERCENTIL 90 DAS ALTURAS (M) DOS TRATAMENTOS COM IDADE SUPERIOR A 5 ANOS	73
TABELA 12 – VARIÂNCIAS DOS PERCENTIS 90 DAS ALTURAS (M) DOS FATORES	73
TABELA 13 – MÉDIA DO PERCENTIL 90 DAS ALTURAS (M) PARA AS DUAS FACES DE EXPOSIÇÃO SOLAR ESTUDADAS EM FLORESTAS COM IDADE SUPERIOR A 5 ANOS.....	73
TABELA 14 – ANOVA DO ESTUDO FATORIAL PARA FLORESTAS ACIMA DE 5 ANOS DE IDADE	75
TABELA 15 – ANOVA PARA O DESDOBRAMENTO (FACES EM CADA TIPO DE MATERIAL GENÉTICO)	75
TABELA 16 – ANOVA PARA O DESDOBRAMENTO (MATERIAIS GENÉTICOS EM CADA NÍVEL DE FACE)	77
TABELA 17 – TESTE DE MÉDIAS (TUKEY) PARA MATERIAIS GENÉTICOS NA FACE SUL (PERCENTIL 90 EM METROS)	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALS	<i>Airborne Laser Scanning</i> (Escaneamento a laser aerotransportado)
°C	graus centígrados na escala Celsius
DEM	<i>Digital Elevation Model</i> (modelo digital de elevação)
DTM	<i>Digital Terrain Model</i> (modelo digital de terreno)
FOV	<i>Field of View</i> (campo de varredura)
h	hora
IMA	Incremento médio anual
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> (unidade de medição inercial)
Km	quilômetro
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação)
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i> (detecção e distanciamento da luz)
M	metros
min	minutos
mm	milímetro
m ²	metro quadrado
m ³	metro cúbico
m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹	metro cúbico por hectare por ano
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
TIMO`s	<i>Timberland Investment Management Organization</i> (fundos de investimento)

1 INTRODUÇÃO

A produtividade de florestas homogêneas e equiâneas é um dos temas mais debatidos entre a comunidade acadêmica e corporativa. As pesquisas têm como objetivo o incremento dessa variável por unidade de área. A produtividade florestal é medida por quantos metros cúbicos são produzidos por ano em um hectare ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$).

Considerando apenas os dois principais gêneros de florestas plantadas no Brasil, *Eucalyptus* e *Pinus*, o primeiro é o mais representativo, com a parcela de 76,6% (5.102.030 hectares), seguido pelo manejo do *Pinus* (23,4%), de acordo com dados da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2013).

A base florestal de povoamentos homogêneos no Brasil é direcionada principalmente para o abastecimento de empresas de celulose, papel, painéis de madeira e energia.

O Brasil é um dos países mais competitivos do mundo em termos de produção florestal. O incremento médio anual de madeira de eucalipto para processamento é de $40,7 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (ABRAF, 2013).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014), em 2012, foram produzidas 73.837 mil toneladas de madeira para papel e celulose no Brasil.

O estado de São Paulo é o segundo com a maior área plantada com o gênero *Eucalyptus* do país, conforme demonstrado no relatório anual da ABRAF (2013). No entanto, é evidente a tendência de evasão do polo florestal para áreas onde os custos de formação florestal são mais acessíveis, como por exemplo, menor custo de aquisição de terras, distância de grandes centros urbanos e alta densidade populacional. A logística de exportação desses produtos também é fator decisivo na implantação de novas unidades industriais. Apesar de todas as características atrativas as quais o Brasil apresenta, Silva (2013), em seu estudo sobre as estratégias de investimento em ativos florestais verificou que as TIMOs (*Timberland Investment Management Organization*) de capital estrangeiro têm receio com relação à infra-estrutura e ao risco político (como a indecisão gerada pelo Código Florestal e a barreira na compra de terras).

A região sudoeste do estado de São Paulo possui municípios cuja característica econômica é a agropecuária (NOGUEIRA, 2005 citado por GONZÁLEZ, 2014). O local permite obter uma das maiores produtividades de eucalipto do Brasil e do

mundo. A vocação florestal dessa região deve-se às suas características edafoclimáticas, apropriadas para a instalação de plantios florestais destinados à indústria como a moveleira (Duratex, MGA e Decormant), de pallets (Rosângela Pallets), de celulose e papel (Suzano Papel e Celulose, Fibria e Klabin), pequenas serrarias, cerâmicas e olarias (GONZÁLEZ, 2014).

A produtividade de povoamentos homogêneos de *Eucalyptus* é influenciada por vários fatores, bióticos e abióticos, tais como: material genético (espécie e procedência), condições edafoclimáticas (características físico-químicas, e biológicas do solo, fertilização, radiação solar, ventos, temperaturas, precipitação, umidade relativa do ar e balanço hídrico), relevo, manejo florestal (limpeza e preparo do solo, tratamentos culturais espaçamento de plantio, corte e condução de brotação) e proteção e sanidade florestal (combate à incêndios e manejo de pragas e doenças). Todos esses fatores justificam as grandes variações da produtividade florestal.

Os principais estudos operacionais buscam materiais genéticos mais adaptados, manejo específico para cada sítio e combate às pragas e doenças. Os profissionais direcionam seus esforços para a gestão dos escassos recursos naturais: independente da especificidade dos projetos de pesquisa, o objetivo final das experimentações é como obter florestas mais produtivas, em um menor espaço e, no menor tempo.

A declividade, dentre outros fatores, é relevante no planejamento, tanto para o cumprimento da legislação quanto para garantir a eficiência das intervenções do homem no meio (ROMANOVSKI, 2001). Desde maio de 2012 vigora a nova lei florestal no Brasil (Lei 12.651), e uma de suas regras é de que áreas com declividade igual ou superior a 45° (em percentual, 100%) são consideradas áreas de preservação permanente (ZAKIA; PINTO, 2013). Para o cultivo de florestas homogêneas de eucalipto a declividade interfere na facilidade (ou possibilidade) de mecanização das atividades de manejo e tratamentos culturais, além da colheita. Quando se relaciona a declividade com a face de exposição solar tem-se o efeito do sombreamento, devido ao movimento rotacional do sol.

A exposição solar é um dos fatores que influencia na produtividade florestal, já que implica, ao longo do ano, em maior ou menor incidência solar nas plantas. Áreas localizadas no hemisfério sul, abaixo do Trópico de Capricórnio, como é o caso da área em estudo, recebem menor radiação solar na face sul. É importante destacar que a declividade possui influência direta na redução de energia recebida.

Para monitorar a produtividade florestal existem métodos convencionais, tais como o inventário florestal. Contudo, diante da escassez de mão-de-obra no campo, das inovações tecnológicas e da garantia de acurácia dos resultados há uma tendência no maior uso de ferramentas relacionadas ao sensoriamento remoto. Nesse trabalho foi utilizada a tecnologia LiDAR como fonte de dados para a pesquisa. Em inglês, LiDAR (*Light Detection and Ranging*), ou, Detecção de Luz e Distância é uma ferramenta recente na mensuração florestal, com potencial promissor para levantamentos de métricas quali-quantitativas dos povoamentos florestais.

Como o crescimento das florestas de eucalipto e o manejo aplicado nos plantios no Brasil são importantes para o incremento da produção nacional de madeira, justifica-se esse trabalho pois estudos nesse sentido são de grande importância para o planejamento da produção, comercialização, previsão e formulação de estratégias para o segmento e, conseqüentemente, para melhorar o desempenho da economia brasileira.

1.1 Objetivos e hipóteses

O foco dessa pesquisa foi avaliar o efeito da face de exposição solar no crescimento de plantios homogêneos de eucalipto, no sudoeste do estado de São Paulo.

O percentil 90, uma das métricas extraídas da nuvem de dados LiDAR utilizada neste estudo, apresenta boa correlação com a altura média do povoamento de eucaliptos analisado e, utilizada como proxy para expressar produtividade, serviu para explorar a hipótese de diferenças de produtividade entre grupos clonais, exposição à face norte e a interação entre esses dois fatores.

Espera-se que o conhecimento da performance produtiva dos povoamentos florestais em função de sua face de exposição solar e declividade do terreno ajudará os gestores florestais no micro planejamento para o manejo silvicultural desse gênero.

As seguintes hipóteses foram estabelecidas para eventual corroboração:

- i) plantios de *Eucalyptus* sp em áreas de face sul apresentam menor crescimento do que aqueles conduzidos em áreas de face norte;
- ii) corroborada a primeira hipótese, especula-se sobre o efeito da exposição também interagir com o material genético, ou seja, da eventual existência de material genético mais suscetível ao efeito negativo da face sul.

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos. Os dois primeiros capítulos, incluindo este, correspondem à contextualização do tema, explicitando os objetivos gerais, pontuando a importância do estudo para as companhias florestais brasileiras e apresentação de uma sucinta revisão bibliográfica, englobando assuntos correlatos ao estudo, tais como: competitividade e evolução da produtividade florestal, fatores que interferem no incremento de madeira e tecnologia a laser aerotransportado. O terceiro capítulo apresenta quais foram os métodos de processamento de dados, características do local de estudo, definições de parâmetros e sequência das análises. O quarto capítulo traz os embasamentos para discussões dos resultados obtidos e, por último, o quinto capítulo conclui esse trabalho com as inferências e fatos que puderam ser observados durante a pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho pretende nivelar e fundamentar conceitos correlatos ao objeto de estudo. Portanto, apresenta-se uma visão geral sobre produtividade de povoamentos de eucalipto, fatores que interferem nessa variável, além de comentar sobre a tecnologia a laser aerotransportado na área florestal e sobre métricas de mensuração para avaliar o desempenho do crescimento florestal.

2.1 Florestas plantadas: competitividade e evolução da produtividade

Com sua enorme função produtiva e de proteção, as florestas desempenharão um papel global crucial nos próximos 300 (trezentos) anos ou mais. O conhecimento teórico e prático da gestão sustentável de florestas terá alta demanda. Como um dos principais recursos naturais renováveis disponíveis para a humanidade, as florestas deverão ajudar a mitigar as mudanças climáticas, proteger o solo e água, fornecer ar puro, conservar a biodiversidade, ajudar a manter a saúde mental dos seres humanos, e a produzir fibra de madeira e outros produtos (BLASER et al., 2013).

De acordo com dados da FAO (2013), florestas plantadas cobrem 264 milhões de hectares no mundo e representam sete por cento de todas as florestas. Em média, essa área se expande a cada ano cerca de 5 (cinco) milhões de hectares. Florestas plantadas são importantes fontes para os produtos florestais (provenientes de madeira roliça, de fibra, de lenha e não-madeireiros) produzidos dentro de contextos ecológicos energeticamente eficientes e sustentáveis. Eles também desempenham um papel importante na preservação dos valores sociais e culturais ligados às florestas, especialmente as florestas naturais, que diminuem de tamanho com o desmatamento (principalmente em países das regiões tropicais e subtropicais em desenvolvimento) ou são designadas para a conservação ou outros fins (principalmente em países desenvolvidos em zonas temperadas).

Os reflorestamentos com eucalipto apresentam viabilidade técnica e econômica, mostrando-se muito promissores. Essa espécie pode ampliar significativamente sua participação na composição da renda agropecuária, com vantagens adicionais, sob a ótica social e ambiental (CORDEIRO et al., 2010 citados por FERNANDES et al., (2012).

No Brasil, segundo dados da ABRAF (2013), o manejo de florestas plantadas equivale a aproximadamente 7,186 milhões de hectares. As condições climáticas e

fundiárias, aliadas aos fatores política de investimento em pesquisa e desenvolvimento, verticalização do setor e qualidade de mão de obra empregada, proporcionam uma maior produtividade por hectare e, conseqüentemente, um menor ciclo de colheita para os plantios florestais estabelecidos no Brasil, em relação aos demais países produtores.

O incremento médio anual (IMA) é a unidade de medida utilizada pelos profissionais da área florestal para mensurar o desempenho da floresta, representando quantos metros cúbicos de madeira uma floresta produziu em um hectare no intervalo de um ano. Campos et al. (2009) definem IMA como sendo a produção até uma idade particular dividida por essa idade, ou seja, a taxa média do aumento da produção desde a implantação do povoamento até uma idade particular.

De acordo com Campos et al. (2009) os principais componentes do crescimento e da produção são:

- a) Mortalidade: volume ou número de árvores existentes inicialmente e que morreram num determinado período.
- b) Ingresso ou *Ingrowth*: árvores medidas numa idade qualquer e que não foram medidas numa idade anterior por não terem alcançado um diâmetro mínimo predeterminado.
- c) Corte: volume ou número de árvores vivas colhidas num determinado período (desbastes).
- d) Produção corrente: crescimento remanescente acumulado até uma idade atual.
- e) Produção futura: crescimento remanescente acumulado até uma idade futura.

A Tabela 1 mostra o posicionamento da produtividade dos principais países produtores de folhosas no mundo.

Tabela 1 – Produtividade (m³/ha/ano) de espécies folhosas em diferentes países

País	Produtividade
	m ³ /ha/ano
Brasil	40,7
China	30,8
Indonésia	25
Austrália	22
Chile	20
Nova Zelândia	18,8
África do Sul	18
Estados Unidos da América	15
Portugal	12
Finlândia	6
Suécia	5,5

Fonte: adaptado de ABRAF (2013)

Em 2012 o Brasil classificou-se como o terceiro maior produtor mundial de celulose entre os produtores integrados, atrás dos Estados Unidos e Canadá, e o primeiro entre os produtores independentes (ABRAF, 2013).

Fatores como o desenvolvimento e o crescimento populacional e econômico estimulam a demanda por produtos provenientes de florestas plantadas de maneira crescente.

Diante desse cenário, o Brasil destaca-se como potência florestal mundial na cultura do *Eucalyptus*.

Povoamentos equiâneos são caracterizados por indivíduos com origem em um mesmo ano, geralmente formado por uma única espécie ou por um grupo de clones. As características desses povoamentos segundo Davis e Johnson (1987) citados por Campos et al. (2009) são: a mortalidade regular eleva-se com a idade; a altura das árvores dominantes e codominantes aumenta com a idade, ao longo da vida do

povoamento; em idades mais avançadas há um acréscimo no diâmetro médio devido à crescente mortalidade de árvores menores; a área basal aumenta ao longo da vida do povoamento; as produções bruta e líquida crescem e tendem a uma estagnação, embora possam reduzir em idades mais avançadas, devido à mortalidade; a produtividade média aumenta e passa por um máximo em uma idade onde a competição entre árvores já se estabeleceu.

É indiscutível a importância de conhecimentos técnicos pelas empresas, organizações e instituições florestais no intuito de compreender os fatores que interferem na produtividade das áreas com tradição no cultivo de *Eucalyptus* e também de áreas com potencial de exploração ainda não iniciado. Há uma tendência clara atualmente no Brasil de novas fronteiras silviculturais, tais como o tríduo Maranhão-Piauí-Tocantins, onde o preço da terra e as vantagens logísticas os diferenciam em termos de custos mais competitivos. Gonçalves et al. (2012) citando o trabalho de Brasil (1991) descrevem que a caracterização ambiental detalhada de uma propriedade rural é imprescindível para seu planejamento técnico e financeiro. O planejamento da pesquisa ou da produção florestal conta com subsídios fundamentais para a definição de práticas mais precisas e adequadas de manejo florestal. Os autores reforçam que essas determinações são obtidas geralmente com base num plano de manejo técnico, fundamentado nas características climáticas, fisiográficas, hídricas, edáficas e florísticas das bacias hidrográficas.

2.2 Fatores bióticos e abióticos que interferem na produtividade florestal

De acordo com Campos et al. (2009) de maior interesse em mensuração florestal é o enfoque quantitativo do crescimento e da produção, mais que biológico. O crescimento é um processo caracterizado por mudanças na forma e no tamanho do tronco, com a adição contínua de novas camadas de lenho ao longo de todo o material lenhoso existente. Já a produção expressa a quantidade total do volume, ou outra variável, acumulada num determinado tempo. Biologicamente, diz-se que a produção expressa o tamanho de um organismo em função do tempo. Expressões do crescimento em volume são de uso mais comum, embora algumas outras características sejam usuais, como área basal, altura e massa.

Carvalho et al. (2012) demonstram com uma análise histórica que, nas décadas de 1960 e 70, o efeito produtividade foi o que mais contribuiu para o crescimento da produção de celulose de fibra curta. Os principais fatores que contribuíram foram o

crescimento dos estudos de melhoramento genético e a introdução de novas procedências, bem como as políticas públicas e os incentivos fiscais. Na década de 1980, obteve-se menor crescimento da produção em razão, principalmente, da crise e do término dos incentivos fiscais. Já na década de 1990 as principais indústrias passaram a produzir visando ao mercado internacional, o que acarretou a expansão dos plantios de eucalipto. Nos anos 2000, apesar de ter sido o período em que o reflorestamento mais cresceu, o efeito produtividade foi maior devido à introdução dos clones, aos avanços na mecanização e, também, ao déficit de reflorestamentos que existiu no final da década de 1990.

Paralelamente ao melhoramento genético das espécies, houve melhoria das práticas silviculturais. As principais técnicas adotadas foram: conservação de solo e água, preparo de solo (subsolagem e cultivo mínimo), uso de análises de solo para recomendações de fertilizações, e controles mais rígidos de qualidade de mudas, mato competição, pragas e doenças e de incêndios florestais (GONÇALVES et al., 2002; 2008).

Com a ampliação dos plantios de *Eucalyptus*, tem-se que considerar a especificidade de cada local. Segundo Rosado et al. (2012), uma vez que na maioria das vezes estes ambientes são distintos, há interação entre o genótipo e ambiente, o que afeta o ganho com a seleção e torna necessário estimar a magnitude e a natureza dessa interação. Essas estimativas possibilitam a avaliação do real impacto de seleção e asseguram alto grau de confiabilidade na recomendação de clones para um determinado local ou grupo de ambientes.

Larcher (2006) falando sobre a limitação do trabalho fotossintético pelos fatores ambientais diz que só raramente todos os fatores ambientais favorecem uma intensiva absorção de gás carbônico (CO₂). Na maioria das vezes, outro fator se apresenta em uma intensidade inconveniente. Se as condições muito desfavoráveis ocorrem por um período curto, então a redução do ganho de carbono é pequena. As consequências são piores quando os fatores externos se tornam estressantes para a planta. Limitações temporárias sobre a fotossíntese, por exemplo, falta de água por um curto período ou condições climáticas muito frias ou muito quentes, acarretam uma limitação do ganho de carbono conforme a duração das condições desfavoráveis. Se o estresse é muito intenso ou se dura muito tempo, então a planta necessita de um longo período para reparar os danos causados após a melhora das condições ambientais. Essa situação é conhecida como efeito pós-estresse.

2.2.1 Comportamento genético

Os programas de melhoramento genético também são essenciais para o aumento de produtividade, pois proporcionam a introdução de materiais superiores em termos de crescimento e qualidade da madeira, por serem mais adaptados às características edafoclimáticas da região na qual foram selecionados (CAMPINHOS, 1999).

Em espécies florestais, de modo geral, as estratégias básicas de melhoramento podem ser resumidas em seleção de procedências e seleção individual dentro das populações-base, utilizando-se a variabilidade naturalmente existente dentro das populações e entre os indivíduos. Para recombinação do material genético selecionado, bem como para dar continuidade à seleção recorrente, utilizam-se povoamentos conhecidos como áreas de coleta e produção de sementes ou pomares de sementes por mudas clonais. Testes de progênie convencionais são utilizados para a seleção dos indivíduos superiores. Já por via assexuada, o melhoramento é efetuado por meio do enraizamento de propágulos de árvores selecionadas, muitas vezes híbridas, para a implantação de testes clonais e áreas de multiplicação clonal, fundamentais para a silvicultura intensiva clonal (FERREIRA, 1992 citado por GOLLE et al., 2009).

Golle et al. (2009) com base no estudo de Grattapaglia (2008) citam que as principais características que o melhoramento florestal tem objetivado são referentes ao incremento do crescimento; da produtividade (madeira, fibras e energia renovável); alterações das propriedades químicas da madeira (teor e tipo de lignina e celulose); modificações das propriedades físicas da madeira (ângulo de fibras e espessura de parede); melhoramento visando a resistência à doenças; a tolerância a estresses abióticos (geadas, seca e salinidade); melhoria da capacidade fotossintética; dos caracteres fisiológicos; uso em biorremediação; a produção de compostos farmacêuticos; alterações na arquitetura da árvore (ramos, nós e interceptação de luz), dentre outros.

Além da produtividade volumétrica, hoje, as propriedades tecnológicas da madeira são características essenciais em programas de melhoramento. No caso da produção de celulose, três características podem ser descritas como fundamentais no aspecto econômico do processo produtivo industrial: produtividade de celulose por área plantada (função do incremento volumétrico, densidade da madeira e rendimento de polpa), o custo de produção e o teor de lignina da madeira. Outras

características essenciais na silvicultura industrial são: adaptação, forma da árvore, o número e a distribuição dos ramos, bifurcação e resistência a pragas, doenças, geadas, seca e vento. A adaptação climática refere-se principalmente à adaptação à precipitação e temperatura (ASSIS et al., 2011).

Estudo realizado por Carvalho et al. (2012), tem-se que, entre os anos de 1960 a 2007, o principal fator que explicou o crescimento da produção de celulose foi a produtividade. Entretanto, o baixo valor para o efeito área foi devido ao fato de sua expansão só ter começado na década de 1990. Também, destaca-se que os reflorestamentos no Brasil são muito recentes, em comparação com os de outros países. Os autores afirmam que mesmo assim, o segmento conseguiu tornar-se competitivo, tanto no mercado nacional quanto no internacional.

Recentemente, inúmeros trabalhos têm sido realizados com o objetivo de avaliar as características de crescimento e propriedades da madeira. Caixeta et al. (2003), Moura (2000), Oliveira (2005) e Xavier (2001) mencionados por Botrel et al. (2010) pesquisaram, por meio das propriedades da madeira, os clones que mais se destacaram, direcionando uma seleção que maximizasse a adequação da madeira ao produto final a qual ela se destinava. O estudo desses autores mostrou que para as características de crescimento, propriedades químicas largura e espessura da parede celular, o efeito de clone foi significativo indicando o potencial do material genético para programas de melhoramento.

Golle et al. (2009) concluem que o melhoramento genético é indispensável para que seja possível obter o aumento necessário em produtividade, no setor florestal, tanto por meio do uso de técnicas clássicas, quanto por intermédio da biotecnologia.

2.2.2 Condições climáticas e fisiográficas

Dentre as condições climáticas e fisiográficas existentes, destaca-se nesse texto, definições de clima e radiação solar. Para questões fisiográficas, o texto foca na face de exposição solar e na declividade.

Segundo Larcher (2006) o clima pode ser entendido como as condições médias e rotineiras do tempo de uma determinada região. Em altas e médias latitudes predomina o clima sazonal, que, por uma mudança entre um balanço de energia radiante, positivo no verão e negativo no inverno, determina estações iluminadas, quentes e com dias longos e estações frias, pobres em radiação e com dias curtos. Em baixas latitudes e em locais com clima mediterrâneo ocorrem estações chuvosas

e secas. Por meio da topografia da paisagem, o clima local (mesoclima) pode ser modificado consideravelmente; em especial o relevo exerce grande influência sobre alguns fatores climáticos direcionais como a radiação e o vento. O mesmo autor explica que, geralmente, os períodos de mudança dos fatores climáticos ambientais estão relacionados aos cursos anuais e diários da radiação. A rotação da Terra condiciona a alternância entre dia e noite (fotoperiodismo diurno), onde o período do dia é o período de calor e radiação e o período noturno é aquele de resfriamento. Assim, o fotoperiodismo é acompanhado, com um certo atraso, pelo termoperiodismo. Isso acontece porque o horário mais quente do dia não ocorre quando o sol está a pino (mas sim um pouco mais tarde) e a temperatura mínima se dá após o fim da noite.

A radiação solar é a melhor e principal fonte de energia para a vida e um dos fatores determinantes da fisiologia, morfologia, comportamento e história de vida da maioria dos organismos (KIMMINS, 2005 apud BECKSCHÄFER et al., 2013).

Em um determinado local na superfície da Terra, a energia radiante depende da posição do sol. A energia radiante que chega até a superfície da Terra é muito dependente dos movimentos de rotação e translação terrestres, os quais impõem um ritmo climático periódico. A irradiância em um determinado local depende primeiramente da latitude. Nos trópicos, especialmente em regiões de alta pressão onde as nuvens são poucas, a quantidade de radiação solar está acima da média. Em média, 70% da radiação solar penetra na atmosfera limpa acima das regiões secas perto dos trópicos. Em direção aos pólos a soma anual da radiação total diminui. Em níveis muito acima do mar, a atmosfera é menos opaca e a radiação total é maior em relação aos vales. A topografia do local e as condições climáticas determinam a disponibilidade de radiação e são compostas, respectivamente, pelo desenho do terreno, o ângulo de incidência da radiação e pelo estado atmosférico (presença de nuvens ou neblina) (LARCHER, 2006).

Tão importante quanto a quantidade de radiação solar recebida é a eficiência de uso dessa energia. A eq. (1) resume a produção de biomassa de madeira (BINKLEY; STAPE; RYAN, 2004):

$$\text{Produção} = \text{Suprimento} + \text{Eficiência de captura do recurso} + \text{Eficiência de uso do recurso} \quad (1)$$

Na qual, a eficiência do uso do recurso é representada pela quantidade de biomassa produzida por unidade de recurso consumido, tais como: toneladas de biomassa por quilo de nutriente absorvido.

Waring (2000), na Inglaterra, estudando as limitações ambientais na produtividade de abeto (*Picea sitchensis*) com o uso de modelagem ecofisiológica (modelo 3-PG), verificou que a radiação solar associada ao relevo representou quase metade das diferenças observadas no crescimento das plantações, e a variabilidade das temperaturas no inverno reduziu o crescimento dos povoamentos entre 10 a 15%.

Características fisiográficas, como a altitude, a declividade e a orientação de vertentes, que representam, indiretamente, os fatores de ação sobre o crescimento do povoamento, devem ser observadas, como requisitos, na seleção das áreas de implantação e manutenção de florestas comerciais de eucalipto (BRAGA et al., 1999).

Declividade é a relação entre o valor do desnível de altura entre dois pontos no relevo e o valor da distância horizontal entre esses pontos, ou seja, é a medida de inclinação do relevo. Pode ser expressa, geralmente, em graus, porcentagem ou tangente do ângulo de inclinação.

2.2.3 Manejo florestal

Campos e Leite (2009) definem manejo florestal como o desenvolvimento e aplicação de métodos quantitativos e conhecimentos ecofisiológicos, visando gerar produtos, serviços e, ou, benefícios, diretos e indiretos, com a garantia de sustentabilidade (econômica, social e ambiental), a partir de uma floresta, tratando então, do gerenciamento dos recursos florestais. Os mesmos autores citam como e porque a classificação de terras, ou classificação da floresta (primeiro elemento do manejo), gera informações detalhadas sobre a floresta a ser manejada. Tais informações compreendem uma visão espacial da área incluindo tipo de solo, tipo de cobertura florestal, mapas de precipitação, mapas planialtimétricos, informações fisiográficas, malha viária, recursos hídricos, construções e sua distribuição, localização e características de cada compartimento da floresta, quanto a composição de espécies, classes de idade, espaçamento inicial e regime de corte. A classificação implica também definir classes de capacidade produtiva (classes de local).

Dentre os tratos culturais que mais influenciam a produtividade de um povoamento florestal destacam-se os seguintes itens: espaçamento, limpeza e preparo do terreno, fertilização, mato-competição e proteção florestal (pragas, doenças e incêndios).

Gonçalves et al. (2008) relatam que a evolução da produtividade em florestas plantadas no Brasil e sua sustentabilidade são resultados de corretas práticas na determinação de espaçamento, manejo de resíduos florestais, preparo e conservação de solo, fertilização adequada e controle de plantas daninhas.

Um dos principais aspectos envolvidos no manejo florestal refere-se à correta escolha da densidade de árvores por unidade de área, no plantio e ao longo do ciclo da floresta, pois ela influenciará tanto o crescimento individual das plantas como também o seu crescimento conjunto. Esta densidade, determinada pelas distâncias entrelinhas e entreplantas, é uma variável de grande interesse, sendo continuamente estudada em virtude da constante introdução de novas espécies, procedências e clones, bem como devido à expansão de novos projetos florestais em sítios distintos (STAPE, 2005 apud SILVA, 2005).

A densidade local nas plantações florestais corresponde a densidade de plantio a partir da qual é base para a mortalidade. Esse é um dos fatores mais importantes no controle da produtividade no manejo de florestas de *Eucalyptus* (WALTERS, 1980 apud ZHOU et al., 2013). Em estágio inicial de desenvolvimento é de fundamental importância a decisão de replantio. Zhou et al. (2013) argumentam que árvores quanto menores em sua fase inicial depois são totalmente dominadas por árvores de desenvolvimento “normal”, e no final da rotação espera-se que estejam sob o dossel. Essas árvores são, geralmente, negligenciadas pelas empresas em estimativas de biomassa, portanto, alertam a importância da densidade planejada estar próxima a real para obtenção do rendimento esperado.

A uniformidade do povoamento afeta sua produtividade. Boyden et al. (2008), citados por Campoe (2012), avaliaram o efeito de padrões de dominância em plantios clonais e seminais de eucalipto, mostrando que quanto maior a árvore, maior será sua produtividade de madeira, e que árvores dominantes de um povoamento não são afetadas pela competição com árvores vizinhas menores, já árvores pequenas (suprimidas) tem seu crescimento fortemente reduzido pela competição árvores vizinhas maiores.

O preparo do solo compreende um conjunto de práticas que, quando usadas racionalmente, podem manter ou elevar os índices de produtividade florestal, a médio e longo prazo, reduzir a erosão hídrica e eólica, e melhorar a relação custo/benefício dos recursos disponíveis: mão-de-obra, máquinas e implementos, combustíveis e insumos. Inadequadamente usadas, as técnicas de preparo podem degradar física, química e biologicamente o solo em poucos anos de uso, reduzindo seu potencial produtivo (GONÇALVES et al., 2005).

O efeito do preparo do solo não depende apenas do implemento empregado, mas também da forma e intensidade de seu uso. Sob o ponto de vista da conservação do solo, o melhor cultivo é aquele que se consegue com o menor número possível de operações e que deixa sobre sua superfície a maior quantidade de resíduos vegetais (GONÇALVES et al., 2002). Esses autores afirmam que o desadensamento do solo na linha ou cova de plantio no sistema de cultivo mínimo deve possibilitar rápido crescimento radicular, conseqüentemente, maior aproveitamento da água e nutrientes adjacentes às mudas.

Dentre os recursos naturais necessários para o desenvolvimento das plantas temos: a água, a luz e os nutrientes. Desses, a nutrição é o fator de maior facilidade de manipulação em plantações florestais, podendo ser manejada através de práticas de conservação de solos e fertilizações. Além da disponibilidade desses recursos, a maneira como a planta consegue utilizá-los, isto é, a eficiência com que ela consegue usar os recursos disponibilizados é determinante para a resposta e crescimento desse indivíduo.

Smethurst (2010), em sua revisão comparando as práticas de fertilização florestal com a agricultura, mostrou que a estratégia de fertilização florestal considera a ciclagem interna e externa dos nutrientes e a profundidade do sistema radicular. Ele destaca que a modelagem do nitrogênio é a mais avançada dentre os nutrientes e que uma opção para melhorar a eficiência no uso dos nutrientes, tanto na área florestal quanto na área agrícola, é o desenvolvimento de tecnologias que utilizem a rizosfera e o mix de espécies. O autor destaca a importância da continuidade das pesquisas para aumentar o conhecimento sobre a relação nutriente-crescimento.

As características de solo, seja pelos fatores químicos (relacionados com a fertilidade e disponibilidade de nutrientes) ou pelos atributos físicos (condicionantes do regime hídrico do solo), influenciam na produtividade e na resposta às fertilizações. Gava (2005) demonstrou correlação positiva entre produtividade e teor

de argila do solo e entre água disponível e o teor de argila do solo, contribuindo para o entendimento da maior produtividade em solos argilosos.

Pulito (2009) demonstrou em seu estudo de resposta à fertilização nitrogenada em plantações de *Eucalyptus* que, em média, em povoamentos mais jovens de 1 a 2,2 anos de idade, a fertilização resultou num aumento de 12% de produtividade de madeira, enquanto que numa idade intermediária (entre 3 e 4 anos) essa resposta caiu para 6% e na idade de corte não foi observada resposta à fertilização.

Silva et al. (2013), identificaram que o *Eucalyptus* responde positivamente a doses crescentes de fertilizantes, resultando numa maior produtividade, contudo, os efeitos dessas maiores doses reduzem no segundo ano após o plantio.

Em amplo estudo com uma rede experimental de *Eucalyptus* no Brasil, Stape et al. (2010) comprovaram aumento de 30% na produtividade devido à irrigação. A fertilização extra não diferenciou da adubação convencional, destacando a água como fator limitante. O mesmo estudo mostra que o período inicial de desenvolvimento do povoamento apresenta taxas baixas de crescimento do lenho enquanto que a copa tem seu aumento máximo. O período de tempo necessário para o desenvolvimento completo da copa pode ser reduzido aumentando-se a densidade plantio (espaçamento), mas esse valor pode depender, em parte, da hidrologia geral do site. Os resultados obtidos por esses autores indicam que a uniformidade no sítio de produção influencia substancialmente no crescimento da madeira. A competição entre árvores é influenciada pela qualidade do site assim como o arranjo do povoamento, que incorpora o tamanho da árvore e o espaçamento (FORRESTER et al., 2013).

A elevada incidência de radiação solar e a baixa disponibilidade de água no solo estão em primeiro lugar entre os fatores que limitam o estabelecimento e a produtividade das plantas. O aumento excessivo da incidência de luz sobre o uso da capacidade fotossintética pode condicionar um estresse chamado de 'fotoinibição' (BARBER; ANDERSON, 1992 apud LAGE-PINTO et al., 2012).

A mato-competição também se destaca como um dos fatores que interfere na produtividade, já que as plantas daninhas utilizam água, energia e nutrientes para seu desenvolvimento, comprometendo, assim, o crescimento da cultura de interesse principal.

Com relação à sanidade florestal, incluem doenças e insetos-praga associados ao cultivo do *Eucalyptus*, podendo ser nativos ou exóticos. Cupins, besouros

desfolhadores, lagartas desfolhadoras e as formigas cortadeiras, sendo esta a principal praga no país, se destacam dentre os nativos (ZANUNCIO et al., 1990; ZANUNCIO, 1993). Dentre as pragas exóticas, as brocas do eucalipto *Phoracantha semipunctata* e *P. recurva*, os gorgulhos-do-eucalipto *Gonipterus platensis* e *G. pulverulentus*, o psílideo-de-concha *Glycaspis brimblecombei*, a vespa-de-galha *Leptocybe invasa* e o percevejo-bronzeado *Thaumastocoris peregrinus* - são as principais causadoras da perda de produtividade florestal (WILCKEN et al., 2002, 2003, 2008, 2010; FIRMINO, 2004; WILCKEN; BERTI FILHO, 2008).

2.3 Tecnologia de escaneamento a laser

A obtenção abrangente de dados de inventário florestal, oportuna e confiável é geralmente cara e trabalhosa, principalmente para grandes áreas (KANGAS et al., 2006 apud TSUI et al., 2013).

As novas tecnologias de sensoriamento remoto têm-se mostrado eficientes para monitoramentos na área florestal. Lillesand et al. (2004) apud Viana (2013) definem sensoriamento remoto como “a ciência e a arte de se obter informações sobre um objeto, uma área ou fenômeno por meio da análise de dados obtidos por dispositivos que não entram em contato direto com este objeto, área ou fenômeno sob investigação”. Sieber (2003) citado por Viana (2013) diz que o uso de ferramentas de sensoriamento remoto e de Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) é de grande valia no auxílio da gestão e proteção dos recursos naturais e suas aplicações vão desde comparações temáticas de distribuição de pobreza e de produtos tóxicos, a modelos de manejo sustentável de florestas, até simulação de cenários, planejamento, e gestão dos inúmeros serviços e infraestruturas das cidades.

Assim, o advento da tecnologia de sensoriamento remoto tem proporcionado um meio prático e econômico para medir e monitorar a estrutura de cobertura vegetal, especialmente em grandes conglomerados (XIE et al., 2008 citados por TSUI et al., 2013).

Os estudos da propagação e da produção de luz, bem como seus mecanismos de interação com a matéria estão alocados em uma subdivisão da física, a óptica. A grande aplicabilidade da óptica na ciência se deve, bastante, ao desenvolvimento do raio *LASER* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Essa fonte de luz possui características únicas que a tornam um excelente instrumento de uso científico e tecnológico (BAGNATO, 2001 apud SILVA, 2011). O mesmo autor cita o

trabalho de Gonçalves (2007) que pontua o estudo de Albert Einstein, por volta de 1917, como conceito que possibilitou a criação de lasers, cuja previsão é de que seria possível estimular um corpo a liberar energia em forma de radiação eletromagnética com características uniformes e constantes. Contudo, devido às limitações tecnológicas na época do cientista, somente a partir de 1950 começaram as pesquisas com essa tecnologia.

Apesar do *LASER* não ser uma nova tecnologia, a sua utilização para dados geográficos é relativamente recente. O uso em sistemas LiDAR vem demonstrando uma excelente capacidade de aquisição de grande quantidade de informações em pequeno intervalo de tempo. A tecnologia LiDAR é baseada nos mesmos princípios utilizados no sistema de RADAR (*Radio Detection and Ranging*), ela utiliza pulsos laser, ao contrário daquelas que usam ondas de rádio para localizar objetos de interesse (ALVES, 2010).

O LiDAR é uma das novas ferramentas de sensoriamento remoto, sendo um sensor opticamente ativo, acoplado a pequenas aeronaves.

Wehr e Lohr (1999) citados por Montaghi et al. (2013) definem o LiDAR (*Light Detection and Ranging*) como uma técnica na qual para cada pulso de laser emitido obtemos informações sobre a distância dos objetos refletidos, o dossel e os elementos do sub-bosque. Assim, em comparação com fotogrametria tradicional essa metodologia oferece novas maneiras de descrever a estrutura florestal em 3D, uma vez que essa técnica de sensoriamento remoto ativo pode medir a localização de objetos em três dimensões (x, y e z) no interior do dossel. O pulso de laser emitido atinge uma superfície alvo (solo e vegetação) e devolve uma parte da energia para o sensor. O tempo decorrido entre a emissão do pulso e a detecção produz a distância de ida e volta entre o sensor e o alvo, e a distribuição vertical de superfícies é gravada usando dados contínuos. Essa metodologia foi desenvolvida ao longo dos últimos 20 anos para fins de mapeamento de terreno.

Os lasers pulsados são sistemas que transmitem um pulso de laser e determinam a distância para a superfície (a copa da árvore ou no solo) de acordo com o tempo necessário para o pulso viajar de volta para o sensor. Um pulso pode passar verticalmente através de um dossel da floresta, e pode haver vários retornos secundários como a luz de um único pulso é refletida dentro de camadas de dossel de vegetação. Um sensor pode gravar o primeiro ou o último retorno, ou armazenar toda sequência refletida. No primeiro caso, a altura da árvore pode ser calculada

para os pulsos que não atingiram o solo como a diferença entre o retorno registrado (a copa) e um nível determinado dos pulos que chegaram ao solo. Neste último caso, a altura da árvore pode ser calculada como a diferença entre o primeiro e o último retorno significativo (NAESSET, 1997).

Nos sistemas de pulso, o princípio de funcionamento do sistema de escaneamento *LASER* consiste na emissão de um pulso *LASER* de uma plataforma (aérea, terrestre ou orbital) com uma elevada frequência de repetição. O tempo de retorno dos pulsos laser entre a plataforma e os alvos é medido pelo sensor, permitindo a estimativa destas distâncias (WAGNER et al., 2004 citados por ALVES, 2010) à distância (D), e pode ser obtida pela eq. (2) (BALTSAVIAS, 1999 apud ALVES, 2010).

$$D = c (t/2) \quad (2)$$

em que,

c = velocidade da luz ~ 300.000 k/s

t = tempo de emissão e recepção de um pulso (ns)

Atualmente diversos termos são designados para o mesmo sensor: ALS, LiDAR, LaDAR, laserscanner e laserscanning. Nesse trabalho optou-se pelo uso do termo LiDAR, cuja tradução também é conhecida como varredura, escaneamento ou perfilhamento a laser.

Um único pulso de laser pode resultar em vários pulsos de retorno. Quando o laser dispara um pulso de luz, a energia se espalha para fora, uma vez que se desloca a partir do sensor, comportando-se de um modo semelhante ao de uma luz a partir de uma lanterna. Se o pulso bate em terra nua, como um estacionamento, um único pulso de energia é refletido de volta para o sistema LiDAR e o eco é registrado. No entanto, se uma parte da energia da luz atinge o galho de uma árvore em seu caminho para o chão, parte do pulso de saída reflete de volta para o sensor, mas uma parte da energia continua a frente e ecoa quando alcançar a terra. Neste cenário, dois ecos, ou retornos, são registrados pelo sensor de um único pulso de luz laser, criando dois pontos discretos x , y , z . Isso resulta em grandes conjuntos de dados, especialmente quando você adiciona imagens digitais coletadas simultaneamente com o LiDAR.

Nos levantamentos para escaneamento a laser aerotransportados as informações usadas na área de inventário florestal podem ser classificadas como subprodutos do voo LiDAR, visto que o foco principal desse levantamento está relacionado a área de sensoriamento remoto (mapeamento dos modelos digitais de terreno e modelos digitais de superfície). O censo das alturas das árvores além do número de indivíduos são as principais variáveis extraídas dessa nuvem de pontos, que podem ser muito úteis para o inventário florestal, sendo no cálculo de falhas, no diagnóstico de pragas e doenças, na verificação deficiências nutricionais e principalmente na estimativa de quantificação de estoque de madeira. Ozdemir et al. (2013) concluíram que é possível usar dados LiDAR e obter bom potencial para estimar e mapear a diversidade de tamanhos de árvores em áreas florestais com um bom nível de precisão em estudo realizado na Inglaterra.

Uma de suas aplicações práticas é o mapeamento de árvores individuais, incluindo o cálculo da provisão de serviços do ecossistema com base nas características intra-específicas, a derivação de análises relacionadas à conservação que são baseadas no conhecimento de informações individuais e respectiva configuração espacial de espécies de árvores, mais especificamente, esses mapas podem ajudar na sequência das informações obtidas no inventário de parcelas florestais para escalas espaciais maiores por identificar o número e a posição de espécies de árvores individuais entre parcelas de inventário (ENGLER et al., 2013).

O uso dessa ferramenta no Brasil ainda mostra-se pequeno diante do potencial para o setor florestal, contudo, países norte americanos, como os Estados Unidos e Canadá, Austrália e em alguns países da Europa (MONTAGHI et al., 2013) o uso é mais difundido.

A revisão elaborada por Montaghi et al. (2013) sobre o uso da tecnologia LiDAR na Itália mostra que as pesquisas explorando esses dados para aplicações florestais iniciou-se em 2003 e tem aumentado desde então. O alto custo é a principal razão desses dados não serem usados em toda a extensão do país. Eles enfatizam que em alguns países muitos métodos baseados no uso da tecnologia laser em larga escala são base para desenvolver mapeamentos e monitoramento de recursos florestais, como recentemente ocorreu na Nova Zelândia que foi o primeiro país a usar dados laser como meio de estimativa total de estoque de carbono para o relatório do protocolo de Kyoto. Nesse trabalho mostram que o uso do laser na Europa teve sua primeira aplicação para obtenção de atributos de florestas nos

países nórdicos e atualmente tornou-se o método dominante de inventário florestal na Noruega e Finlândia.

O alto custo, observado quando o levantamento com o sistema LiDAR é feito em pequenas áreas, deixa de existir quando extensões maiores são sobrevoadas. Nesses casos, o valor pode ser inferior a US\$ 5/hectare (RODRIGUEZ et al., 2010). Montaghi et al. (2013) argumentam que uma redução de custos de aquisição de um investidor público ou privado poderiam ser implementadas levando-se em consideração que os dados LiDAR obtidos de pesquisas podem ser usados para diversos fins (tais como: inventário florestal, análises hidrológicas, planejamento urbano, arqueologia, geografia, geologia e geomorfologia) e vendidos para diversos usuários.

Além do laser aerotransportado há outro tipo de laser que está tendo seu uso crescente, o laser terrestre. Recentemente, a capacidade de dados LiDAR terrestres para estimar propriedades da vegetação como o diâmetro à altura do peito, altura da árvore, ou volume de madeira, foi mostrado por estudos de Henning e Radtke (2006), Hopkinson et al. (2004), Watt e Donoghue (2005) citados por Garcia et al. (2011). No Brasil, Silva (2011) em sua dissertação mostrou a aplicação do laser terrestre para determinar variáveis dendrométricas em *Pinus* spp, tendo sucesso na mensuração de altura com o laser em relação à mensuração de campo.

Stone et al. (2011) citam vários trabalhos (FRAZER et al., 2011; KANE et al., 2010; LEFSKY et al., 2005) mostrando que várias métricas LiDAR podem ser extraídas e utilizadas como variáveis preditoras em modelos para estimar uma série de atributos à estrutura da floresta. Essas métricas incluem percentis de altura, altura média, altura máxima, coeficiente de variação de altura, curtose, assimetria e percentis de cobertura do dossel. Embora um grande número de métricas LiDAR podem ser obtidos, em geral, três amplas categorias (ortogonais) de métricas LiDAR são geralmente selecionadas na modelagem: (1) uma medida de altura (por exemplo, a altura do percentil 95 dos primeiros retornos); (2) uma variação de altura (por exemplo, o desvio padrão ou o coeficiente de variação dos primeiros retornos); e (3) uma medida da densidade de vegetação (normalmente a proporção).

2.3.1 Na área florestal

Pesquisa realizada por Tesfamichael et al. (2010) mostrou que aquisições de baixas densidades de pontos têm potencial significativo para uso operacional em

Eucalyptus grandis ou florestas de estruturas semelhantes, quando o objetivo de uma pesquisa com LiDAR é a estimativa de altura na área.

Stone et al. (2011) identificaram a aplicação de LiDAR como um método para estimar vários atributos importantes de inventário em *Pinus radiata*, com modelos representando espacialmente o estoque momentâneo assim como ferramenta de *input* na predição futura da produção do povoamento.

2.3.2 No Brasil

Estudos de laser aplicado à área florestal no Brasil têm aumentado, mas ainda há muito a ser explorado.

As grandes empresas produtoras de celulose no Brasil já têm trabalhos com LiDAR. Podem-se citar: Veracel (ZONETE, 2009), Fibria (SILVA, 2013; CARVALHO, 2013), Duratex (SILVA, 2014) e Suzano (este trabalho).

2.3.3 Potencial de uso

Segundo Montaghi et al. (2013) o aumento da disponibilidade de dados derivados de escaneamento a laser aerotransportado oferece o potencial para usar essa informação tridimensional, sozinha ou em combinação com imagens multiespectrais de satélite, para predizer, com precisão, as características florestais (altura de árvores, detecção de árvores individuais, diâmetro do caule, área basal, volume, dados do povoamento, biomassa, estoque de carbono). O crescente interesse reside no fato de que esta tecnologia proporciona dados 3D verdadeiros para o solo e o dossel.

Sobre a construção de modelos digitais de elevação, Dalaqua (2010) aponta a elaboração de um adequado modelo digital de elevação como fundamental para o planejamento florestal e para o mapeamento de áreas de preservação permanente e de reserva legal.

Apesar da recente aplicação na ciência florestal, seu uso já é corriqueiro em outros ramos da engenharia como em projetos altimétricos e em projetos de redes viárias ou em transmissão de energia elétrica (Rodriguez et al., 2010). O uso do LiDAR, associado a outras técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas, torna-se uma poderosa ferramenta no suporte das informações geradas por diversas áreas de grandes empreendimentos florestais, tais como, inventário e planejamento florestal.

Recente estudo em plantio comercial na região de São Luiz do Paraitinga, estado de São Paulo, mostra que é possível integrar técnicas de sensoriamento remoto, LiDAR, às mensurações de campo, garantindo precisões muito próximas as da amostragem casual simples (CARVALHO, 2013). Os resultados do autor comprovam a eficiência do método proposto com diferenças médias inferiores a 6% em relação ao inventário convencional.

Zonete (2009) verificou que o uso dessa tecnologia gera observações com alta capacidade preditiva para as variáveis usualmente calculadas em atividades de inventário florestal, tais como: diâmetro médio, altura média, altura dominante, área basal e volume.

Resultados das pesquisas de Coops et al. (2007), Harding et al. (2010) e Magnussen; Eggemont e LaRiccia (1999), citados por SILVA (2013), indicaram a presença de relações significativas entre a distribuição vertical da folhagem mensurada no campo e as distribuições probabilísticas das alturas dos retornos da nuvem de LiDAR aéreo. Eles concluíram que os modelos de distribuição verticais do dossel poderiam ser transferíveis entre mensurações de campo e bases de dados ALS.

O uso do LiDAR para contagem de árvores de um povoamento de floresta plantada de *Eucalyptus* sp mostrou-se eficaz em estudo realizado no sul da Bahia (OLIVEIRA et al., 2012).

O levantamento a laser serve para avaliação do ambiente urbano, planejamento dos recursos existentes nos municípios, bem como para execução de cenários decorrentes de diagnósticos e implantação das políticas públicas territoriais, destacando-se por ser uma moderna ferramenta de gerenciamento que o poder local pode fazer uso para acompanhar o intenso e dinâmico processo de crescimento das cidades. Trabalho nesse sentido foi realizado por Batista et al. (2013) que mapearam a hidrografia e delimitaram as áreas de preservação permanente com essa tecnologia.

Também pode ser usado juntamente com outras ferramentas de sensoriamento remoto para obter informações precisas e espacialmente explícitas sobre as propriedades de combustível, tais como densidade de dossel, altura dos arbustos e biomassa das folhagens, para melhorar os sistemas de apoio à decisão de manejo do fogo para a prevenção de incêndios florestais (MONTAGHI et al., 2013).

2.4 A altura como estimador de crescimento florestal

A altura da árvore é um termo um tanto ambíguo, devido aos diferentes tipos de altura que podem ser considerados (HUSCH et al., 1982 apud CAMPOS et al., 2009). Os mesmos autores relatam que, apesar disso, a altura a ser medida em um inventário florestal deve estar diretamente em consonância com os objetivos deste. Com maior frequência, a altura total (H) e a altura comercial (h) são as mais importantes, num contexto geral. Enquanto H é mais facilmente visualizada para efeito de medição no campo, pois vai do nível do terreno até o topo da copa, a altura h , entretanto, nem sempre pode ser visualizada de modo eficiente no campo. Quando essa altura é definida por um diâmetro comercial, este nem sempre pode ser facilmente identificado no tronco. Assim, é mais comum definir h como a distância desde o nível do terreno até a posição no tronco onde ocorrem as primeiras inserções de galhos, ou ainda até um ponto onde houver limitação por algum tipo de defeito.

No Brasil, o inventário florestal contínuo é o método mais popular de monitorar o crescimento da floresta. Nesse tipo de inventário, parcelas permanentes são instaladas aos dois ou três anos de idade e são, sistematicamente, remedidas em intervalos de dois ou três anos (OLIVEIRA, 2006 apud OLIVEIRA et al., 2012).

Informações confiáveis do crescimento e da produção dos povoamentos são essenciais para o planejamento das atividades de manejo florestal. Além da capacidade de estimar custos e receitas, a análise de diferentes estratégias de manejo florestal requer a estimativa do crescimento e da produção. Como as florestas constituem sistemas biológicos dinâmicos que estão continuamente mudando, os modelos de crescimento e produção são necessários para projetar essas mudanças e fornecer informações relevantes para auxiliar nas tomadas de decisões (ZONETE et al., 2010).

O incremento volumétrico acumulado é a medida normalmente utilizada na avaliação da produtividade das plantações florestais. Contudo, em plantações em larga escala não há como medir o volume de todas as árvores, o que justifica a adoção de métodos de estimativas baseados na mensuração de diâmetro, área basal e altura total.

A variável altura é uma componente chave nos inventários florestais e exige mensurações precisas em campo já que é usada para calcular a qualidade do site e

a produção de madeira, entre outros atributos do povoamento (von GADOW; BREDENKAMP, 1992 apud TEFAMICHAEL et al., 2010).

Segundo Nelson et al. (1988) apud Naesset (1997), muitas variáveis derivadas de levantamentos de varredura a laser podem ser usadas na estimativa de volume. A mais importante parece ser a altura da árvore, ou o valor médio das alturas de árvores individuais.

Em seu estudo em plantios de *Eucalyptus*, Hakamada (2012) corroborou sua hipótese de que a produtividade aumenta com o aumento da uniformidade de tamanho entre as árvores. Assim, mostra-se a importância do uso de índices de uniformidade para o monitoramento da qualidade silvicultural nas escalas espacial e temporal.

Neste trabalho, o percentil 90 da altura das árvores foi a variável de estudo usada para comparação entre os tratamentos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

Esse estudo foi realizado em áreas que abrangem quatro fazendas da companhia Suzano Papel e Celulose, localizadas no sudoeste do estado de São Paulo, nos municípios de Pilar do Sul e São Miguel Arcanjo (Figura 1), dentro do bioma Mata Atlântica.

Figura 1 – São Miguel Arcanjo e Pilar do Sul estão entre os municípios de maior produção de madeira para papel e celulose do estado de São Paulo, com valores no ano de 2012 de 568 e 536 mil m³, respectivamente
Fonte: IBGE (2014)

A localização central, de cada uma das glebas é apresentada sob a forma de coordenadas geográficas na Tabela 2.

Tabela 2 – Coordenadas centrais das glebas

Gleba	Latitude	Longitude
I	23°51'31.18" S	47°52'51.89" O
H	23°54'59.59" S	47°49'40.48" O

O mapeamento a laser envolveu 46 unidades de produção, sendo 12 na fazenda Boa Vista, 19 na fazenda Brumado, 12 na fazenda Paineiras e 3 na fazenda Toledo (Figura 2).

Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo, sudoeste do estado de São Paulo

3.1.1 Caracterização climática

O relevo das áreas sobrevoadas pode ser classificado como ondulado. Localmente, o relevo é de colinas amplas (interflúvios amplos:) onde predominam baixas declividades ou morrotes alongados e espigões digitados (parte da gleba 52H). O embasamento litológico - Formação Itararé e Grupo Tubarão - apresenta constituição muito variada: arenitos, siltitos, argilitos e folhelhos.

O solo é caracterizado por ser latossolo vermelho e vermelho amarelo, de textura argilosa ou muito argilosa. Nos morrotes e espigões da região de São Miguel Arcanjo (glebas 52H e 52I), no contato com a Província Geomorfológica do Planalto Atlântico, a rocha dominante é o arenito também da formação Itararé, e os solos são cambissolos e associações com argissolo amarelo. Nesta região os solos apresentam-se pouco desenvolvidos em termos pedogenéticos e são de textura média e arenosa, distróficos.

A pluviosidade média na região é de 1.743 milímetros por ano, conforme distribuição da Figura 3. A temperatura média anual é de 18,8°C.

Figura 3 – Distribuição da precipitação média anual (mm/mês) da região de estudo

3.2 Planejamento de voo e mobilização

Em sequência à liberação do Ministério da Defesa número 231/2013/MD e respectivo AVOMDs 277/2013, a equipe de voo, composta pelo piloto Vinícius e operador de voo Pedro, ambos colaboradores da Fototerra, procedeu aos preparativos para a execução do voo, considerando as condições atmosféricas favoráveis para execução do mesmo.

3.2.1 Licença do Ministério da Defesa

A licença para que o voo pudesse ser realizado foi emitida em 26/11/2013 pelo Ministério da Defesa do Brasil. O número da autorização concedida para a prestação de serviço da empresa contratada foi 231/2013/MD e o de autorização de voo e pouso AVOMDs-277/2013.

3.2.2 Plano de voo gráfico e analítico

Segundo Enami (2013), para elaboração do plano de voo da área de estudo, exemplificada na Figura 4, utilizou-se o software Tracker 32 (v.6.0.3.c) que é composto de 5 módulos, um que realiza a leitura dos polígonos considerados na área de interesse, outro que faz o traçado das linhas de voo sobre a área, o terceiro que possibilita a geração dos planos de voo gráficos e analíticos, o quarto que

organiza todas as informações geradas no plano de voo num banco de dados que será inserido na aeronave para execução do planejado e o último módulo que indica se voo está sendo desenvolvido conforme o planejado, sendo possível verificar, por exemplo, a necessidade de subida ou descida da aeronave ou deslocamento mais a leste ou oeste.

Figura 4 – Plano de voo da gleba 521

3.2.3 Referência geodésica

Datum horizontal: SIRGAS 2000

Datum Vertical: Marégrafo de Imbituba (SC)

Projeção: UTM Fuso 23S

Unidade da projeção UTM: metros (m)

3.3 Equipamentos, softwares e materiais de voo

É apresentado a seguir os equipamentos e softwares utilizados para execução deste escaneamento LiDAR:

- Sensor LiDAR Harrier 68i da Trimble;
- Sistema Inercial Applanix (IMU+GPS), modelo POS AV 150;
- Aeronave CESSNA modelo 206;
- Software Harrier Config (v.2.9): para configuração de operação do sistema LiDAR;

- Software Tracker32 (V.3.0.3 c): para elaboração dos planos de voo;
- Software Rianalyze RiMTA (V.5.4.4): para conversão dos dados brutos de perfilamento;
- Software POSPac MMS (V.6.0): para processamento do sistema inercial;
- Software LPMaster (V.5.5.0.41703): para processamento, ajuste das FX's perfiladas e geração do modelo digital de elevação;
- Software DTM Toolkit (V.5.5): para recorte e classificação da nuvem de pontos e geração do modelo digital de terreno;
- Software DTMaster (V.5.5): para edição de Nuvem de Pontos, modelo digital de elevação e modelo digital de terreno;
- Software Global Mapper (V.13.2): para análise e recorte dos modelos; e
- Software ESRI ArcGis (V.10.1): para controle da qualidade dos produtos LiDAR.

3.3.1 Sensor laser aerotransportado

O sensor utilizado foi o LiDAR Harrier 68i (Figura 5) da Trimble (nº de Série: 9998462). Este sensor possibilita obter a nuvem de pontos referenciadas ao sistema de referência WGS84, compatível ao SIRGAS 2000. Dentre os componentes do LiDAR Harrier 68i tem-se: sensor LiDAR, Sistema Inercial (IMU+GPS), computador para leitura dos planos de voo executado e script de configuração de operação do equipamento, computador para gravação dos dados IMU e computador para gravação dos dados de escaneamento.

Esse sensor possui o sistema Full Waveform capaz de realizar uma pré-identificação de cada pulso bruto captado, de modo a facilitar a classificação dos objetos da nuvem de pontos. Essa classificação baseia-se na intensidade do pulso emitido e o tempo de retorno. Isso auxilia a identificar os pontos que atingiram o solo, principalmente em áreas de florestas ou com vegetação densa, permitindo a produção de um Modelo Digital de Terreno com edições mínimas e rico em detalhes.

Figura 5 – Sensor LiDAR Harrier 68i da Trimble

3.3.2 Aeronave e equipe técnica

A aeronave que realizou o voo é um monomotor CESSNA modelo 206 (Figura 6). A equipe técnica foi comandada pelo piloto Vinícius Borges.

Figura 6 – À esquerda, aeronave utilizada e à direita, piloto e operador do voo

3.4 Realização do voo

3.4.1 Condições de voo

O voo foi executado pela empresa Fototerra Atividades de Aerolevantamentos LTDA em uma área de aproximadamente 4.800 hectares, em 05/12/2013, no período da manhã, entre 10 e 12h40min. A aeronave decolou do aeroporto de Sorocaba/SP o qual dista, aproximadamente, 58 km (quilômetros) da área de interesse.

Antes da decolagem, no aeroporto de Sorocaba/SP, ligou-se o sistema Inercial da aeronave, de modo que, ao chegar à área de interesse, a ambiguidade e os DOP's (Diluição de Precisão, relacionada à geometria dos satélites) fossem solucionadas.

O voo foi apoiado com equipe de campo. Minutos antes da decolagem essa equipe iniciou o rastreamento dos satélites, ligando o equipamento que estava instalado sobre o marco implantado.

A Figura 7 registra as condições do dia do voo.

Figura 7 – Foto da área no dia do sobrevoo LiDAR

O tempo total de escaneamento foi de duas horas e cinco minutos.

Após o término da varredura da área realizou-se um backup dos dados brutos de escaneamento e de rastreamento GPS.

3.4.2 Parâmetros de voo

O voo laser para obtenção da malha de 10 pontos/m² no terreno, foi executado com base nos seguintes parâmetros:

Ângulo de abertura para varredura (FOV): 45°

Altura de voo: 438,32 m

Largura da faixa: 363,11 m

Superposição lateral (entre faixas): 50%

Número de faixas: 88 faixas

Densidade média de pontos: 10 pontos/m²

A fim de garantir recobrimento de toda área adotou-se um buffer de 100 m do limite de entorno da área em questão.

3.4.3 Ficha técnica do aeródromo

Município: Sorocaba-SP

Nome do terminal: Bertram Luiz Leupolz

Coordenadas do Aeródromo: 23º 28' 59" S e 047º 29' 11" W

Utilização: público

Altitude: 634 metros

Dimensão da pista: 1.630 x 30 metros

Tipo de piso: asfalto

3.5 Processamento de dados

Após a etapa do levantamento a laser, os arquivos digitais, de imagem e dados, foram descarregados e gravados em unidade de armazenamento (hard disk) e enviados para a sede do prestador de serviço, Fototerra, para a etapa de processamento.

3.5.1 Pré-análise dos dados laser captados

A primeira verificação é a conferência do voo executado, de cada faixa, garantindo que todas as faixas foram realizadas. Aprovação do voo realizado quanto ao recobrimento total e ausência de buracos (Figura 8).

A segunda verificação é a realização de um rápido processamento dos dados brutos, com 5% dos dados coletados, assegurando que não houve buracos entre faixas.

Figura 8 – Imagem de verificação do recobrimento total e ausência de buracos entre faixas de escaneamento executadas para a gleba 52I

A Figura 9 mostra a trajetória do voo executado para a gleba 52I, devidamente orientado e com a base injuncionada para processamento dos dados do sistema inercial para esse voo.

Figura 9 – Trajetória do voo executado

3.5.2 Processamento do escaneamento a laser aerotransportado

O processamento dos dados brutos para obtenção dos produtos LiDAR, tais como a nuvem de pontos, o DSM (Modelo Digital e Superfície) e o DTM (Modelo Digital de Terreno), foi realizado pela empresa Fototerra.

O software utilizado para obter a nuvem de pontos referenciada ao Datum Sirgas2000 é o LPMaster (v.5.5.0.41703). Nele também é realizado um ajuste horizontal entre todas as faixas em relação à faixa cruzada e a exportação dos arquivos no formato *.las (para cada uma das faixas) que são utilizadas para gerar a nuvem de pontos classificada e os modelos digitais de superfície e de terreno. A classificação da nuvem de pontos foi realizada no software DTM Toolkit (v.5.5.). Com a finalização dessa classificação, pode-se gerar o modelo digital de superfície no LPMaster através de interpolação entre os pontos da nuvem de pontos, considerando uma grade irregular, que ao final apresentará uma superfície sólida, sem buracos, com células de 1 metro x 1 metro. Esse é o produto que possibilita identificar os objetos presentes na área, tais como vegetação, estradas e construções.

Para obtenção do modelo digital de terreno foram executados filtros que eliminaram todos os pontos que não foram classificados como *ground* e gera-se uma superfície por meio de interpolação dos pontos que os compõe. O produto final é um modelo sólido, sem buracos, ao nível do chão (sem os objetos presentes no modelo digital de superfície) com células de resolução de 1 metro x 1 metro.

Após esse processamento foi realizada a análise da qualidade dos produtos obtidos, que englobam:

- a) verificação da densidade de pontos/m², valor obtido pela soma total dos pontos registrados dividido pela área recoberta, em m², e ao final calculada uma média aritmética simples para se obter a quantidade efetiva de pontos/m². Foram 665.283.648 pontos em recobrimento de uma área de 24 milhões de metros quadrados (27,7 pontos/m²) atingindo a densidade mínima de 10 pontos/m²;
- b) verificação do recobrimento completo da área e não existência de buracos entre as faixas de voo;
- c) métricas de qualidade, sendo a análise qualitativa realizada por inspeção visual, para detectar a presença de anomalias no produto e a análise quantitativa por meio de testes de precisão e exatidão, através de

procedimentos de análise da exatidão cartográfica e precisão cartográfica (teste qui-quadrado) verificando as discrepâncias entre as coordenadas de pontos nos produtos elaborados e as coordenadas dos pontos homólogos, obtidas a partir de observações realizadas em campo, consideradas como coordenadas de referência. O projeto atendeu ao Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC – Classe A.

Muitos estudos têm sido realizados sobre a metodologia para estimar a altura do dossel a partir de dados de nuvem de pontos LiDAR. O método estatístico usando o modelo digital de terreno foi o mais preciso com um erro médio de 3,2 m (HAYASHI et al., 2013) e, assim, esse foi o método usado neste trabalho.

A densidade de pontos influencia na exatidão dos dados. A alta resolução fornece maior precisão para a medição da altura das características do terreno e acima do solo. A capacidade de capturar a altura em uma alta resolução é a principal vantagem do radar de laser sobre instrumentos ópticos convencionais, tais como câmeras digitais, para a criação do modelo de elevação (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI, 2011).

3.5.3 Análise da base de dados laser

Com a nuvem de pontos entregue, iniciou-se a análise exploratória dos dados.

O DTM e a nuvem de pontos LiDAR foram processados no software *Fusion LiDAR Tool Kit* (Fusion LTK) (McGAUGHEY, 2013).

O processamento de dados no Fusion consistiu basicamente no cálculo de um conjunto de métricas para cada célula de uma grelha virtual (grid ou raster) de células de dimensão 20 x 20 metros disposta sobre a área de estudo. A escolha de células com área de 400 m² se justifica por ser essa a área das parcelas amostrais de inventário florestal disponíveis. Os principais comandos utilizados nesse software foram:

Polyclipdata – para agrupar somente os pontos dentro do limite das glebas de estudo. Esse comando é importante para reduzir o tamanho do arquivo da nuvem de pontos que interfere diretamente no tempo de processamento dos dados.

Gridmetrics – calcula uma série de estatísticas descritivas para um conjunto de dados LiDAR sendo sua saída um raster (grid) representado na forma de banco de dados com cada registro correspondente a uma única célula da grade. Dentre as métricas padrão do software estão: médias, mínimos e máximos das alturas,

percentis variando de 1 a 99. Mais detalhes sobre sintaxes das funções apresentadas nessa pesquisa podem ser encontrados em McGaughey (2014). Cada célula da grelha 20 x 20m foi considerada uma unidade amostral, e a métrica percentil 90, obtida para cada célula, gerou o conjunto de observações da principal variável utilizada neste estudo como medida de produtividade.

O percentil 90 expressa para cada célula a elevação abaixo da qual se encontram 90% das alturas dos pontos de luz laser emitidos pelo equipamento LiDAR aerotransportado e interceptados pela vegetação. Essas alturas já se apresentam normalizadas e expressam a distância vertical do ponto iluminado pelo pulso laser com relação ao solo.

Com o objetivo de exploração da área de estudo, elaborou-se um mapa planialtimétrico com as curvas de níveis, para melhor visualização (Figura 10 e Figura 11).

Figura 10 – Mapa planialtimétrico da gleba 52H

Figura 11 – Mapa planialtimétrico da gleba 52I

Complementarmente, e devido à boa qualidade das informações geradas pela tecnologia LiDAR, foi possível gerar uma representação bastante detalhada da rugosidade da área de estudo, através da ferramenta hillshade. O resultado é uma imagem pixelizada (raster) de alta resolução, com valores que, dependendo da inclinação e da exposição a um determinado ponto cardinal, representam diferentes tons de cinza. O efeito resultante é uma imagem iluminada de acordo com a ondulação da superfície do terreno (Figura 12 e Figura 13).

Figura 12 – Relevo sombreado (*hillshade*) gleba 52H

Figura 13 – Relevo sombreado (*hillshade*) gleba 521

Pode-se, também, elaborar mapas de declives e exposição: ambos os tipos de mapas são conjuntos de dados raster, mas eles representam informações diferentes e, muitas vezes complementares. Um mapa de inclinação, o qual pode ser configurado em porcentagem ou graus, retrata o grau de inclinação do terreno.

Mapas de aspecto, por outro lado, mostram a direção na qual a topografia submetida, o que pode ser muito útil quando se avalia uma paisagem, uma vez que aspecto afeta a produtividade da floresta devido à sua influência sobre a radiação solar e microclima.

Dentre as várias variáveis extraídas da nuvem de pontos, optou-se pela utilização das conhecidas como percentis de altura. Um percentil de altura x é a altura h na qual $x\%$ dos retornos da nuvem estão abaixo de h . Nesse projeto utilizou-se o percentil 90 (Elev.P90): tem uma altura z onde 90% de todos os retornos da nuvem possuem valores de altura menores do que z . O percentil 90 foi escolhido como métrica pois apresentou melhor resultado nas estimativas obtidas por Zonete et al. (2010).

Uma das variáveis resultantes do processamento é o *Aspect Degrees Azimuth* que nos fornece a face de exposição solar e essa variável foi categorizada segundo a Figura 14. Áreas de face sul possuem inclinação azimutal entre 135° e 225° , já áreas de face norte estão entre o 315° e o 45° .

Figura 14 – Classificação da face de exposição solar entre norte e sul

A declividade é fator fundamental para expressar o efeito da face de exposição solar. Assim, no banco de dados foram selecionadas apenas as áreas com declividade maior que 20% (ou 11,3°), seguindo o conceito apresentado por Gonçalves (2002), que classifica o relevo acima entre 20% como forte ondulado (Figura 15).

Figura 15 – Tipos de relevo e solos predominantes
Adaptado de Gonçalves (2002)

A idade do povoamento florestal também foi considerada e dividida em dois agrupamentos: florestas com idade menor que 4 anos e florestas com idade superior a 5 anos. Esse agrupamento foi necessário devido à falta de disponibilidade de dados de todos os materiais genéticos nos dois grupos de idade nas faces de exposição solar selecionadas (Figura 16). Portanto, a análise foi feita considerando os fatores da Tabela 3 e Tabela 4.

Figura 16 – Representação de todos os dados disponíveis no banco de dados, enfatizando a não disponibilidade de todos os materiais genéticos em todas as faces e nas diferentes idades

Tabela 3 – Fatores para florestas com idade inferior aos 4 anos

Face	Material Genético	Espécie
Norte	CL_0001	<i>E. grandis</i>
Norte	CL_0007	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
Sul	CL_0001	<i>E. grandis</i>
Sul	CL_0007	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>

Tabela 4 – Fatores para florestas com idade superior aos 5 anos

Face	Material Genético	Espécie
Norte	CL_0001	<i>E. grandis</i>
Norte	CL_0002	<i>E. grandis</i>
Norte	CL_0003	<i>E. grandis</i>
Norte	CL_0004	<i>E. grandis</i>
Norte	CL_0005	<i>E. grandis</i>
Norte	CL_0006	<i>E. grandis</i>
Sul	CL_0001	<i>E. grandis</i>
Sul	CL_0002	<i>E. grandis</i>
Sul	CL_0003	<i>E. grandis</i>
Sul	CL_0004	<i>E. grandis</i>
Sul	CL_0005	<i>E. grandis</i>
Sul	CL_0006	<i>E. grandis</i>

3.5.4 Delineamento estatístico

A busca de diferenças estatisticamente significativas baseou-se no delineamento fatorial envolvendo dois grupos de fatores (face de exposição e material genético) que, segundo o modelo fatorial, pode ser apresentado da seguinte forma (eq. 3):

$$Y_{ikl} = \mu + \alpha_i + \gamma_k + \alpha\gamma_{ik} + \epsilon_{ik} \quad (3)$$

em que:

- Y_{ik} : i ésima altura observada em uma determinada face i ($i=1,2$), no material genético k .
- μ : valor geral;
- α_i : efeito da face i ;
- γ_k : efeito do material genético k ;
- $\alpha\gamma_{ik}$: efeito da interação da face i e do material genético k ;
- ϵ_{ik} : erro padrão.

Para florestas com idade inferior aos quatro anos, o fatorial foi de 2x2, sendo face exposição norte e sul e materiais genéticos CL_0007 e CL_0001.

Já para florestas com idade superior aos cinco anos de idade foi de 2x6, cuja variação se deu na quantidade de materiais genéticos analisados (CL_0001; CL_0002; CL_0003; CL_0004; CL_0005; CL_0006), nas faces norte e sul.

A análise estatística foi efetuada com a função ANOVA (*aov*) a qual está disponível nos pacotes básicos de processamentos do software R (R Core Team, 2013). Essa avaliação objetivou identificar as influências destes fatores na variável de interesse (altura das árvores), estimadas nesse estudo através do percentil 90 da altura.

Primeiramente verificou-se o atendimento aos pressupostos estatísticos de normalidade e de homogeneidade de variância. Em seguida, explorou-se graficamente os dados, no intuito de evidenciar a existência de qualquer tipo de dado discrepante.

Foi realizada a análise de variância para os dados com posterior desdobramento da interação fatorial caso fosse encontrada interação significativa entre eles.

Como o presente estudo trata de fatorial duplo não há necessidade de realização de teste de médias já que se identificado o efeito significativo, determinado fator já se mostra estatisticamente superior ou inferior ao outro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se nesse capítulo os resultados desse projeto de pesquisa. Divulga-se, primeiramente, as análises iniciais e exploratórias dos dados e a sequência do fatorial, ressaltando assim as contribuições do trabalho para o setor acadêmico e privado.

Para a discussão dos resultados obtidos optou-se pela segregação de dois grandes grupos, sendo o primeiro o de florestas homogêneas de eucalipto com idade inferior aos 4 anos e o segundo com idade superior aos 5 anos.

Conforme esperado, a altura predita através da métrica de percentil 90 foi adequada para analisar os povoamentos nas diferentes faces de exposição solar.

4.1 Plantios homogêneos de Eucalyptus com idade inferior aos 4 anos

A amplitude de idade analisada nesse grupo variou de 2,4 a 3,9 anos de idade. Esse grupo pode ser citado como povoamentos jovens ao longo do texto.

Estudos que utilizam como base de dados a ferramenta LiDAR permitem a análise de um grande número de repetições. A intensidade amostral desse grupo de dados foi de:

- a) para o material genético CL_0001 foram 724 unidades amostrais na face norte e 277 unidades amostrais na face sul;
- b) para o material genético CL_0007 foram 286 unidades amostrais na face norte e 294 unidades amostrais na face sul.

A média dos percentis 90 das alturas e as variâncias dos fatores encontram-se, respectivamente, nas Tabela 5 e Tabela 6. A altura da face norte em ambos os casos é maior que a altura encontrada na face sul, sustentando a hipótese desse trabalho. Parece lógico que florestas juvenis, que precisam de um adequado arranque inicial para suportar as limitações e aumentar sua rusticidade, sofram com a menor incidência de radiação solar que ocorre na face sul. Como as práticas silviculturais aplicadas nas áreas foram semelhantes (nutrição mineral, precipitação, preparo de solo e manejo de plantas daninhas) pode-se atribuir o efeito do maior crescimento dos clones na face norte ao benefício de sua característica fisiográfica. Materiais clonais, por sua característica genética, apresentam menor variabilidade entre si, contudo, para esse conjunto de dados a maior variância ocorreu para o material genético CL_0001 na face sul.

Tabela 5 – Média do percentil 90 das alturas (m) dos tratamentos (material genético na face de exposição solar)

	CL_0001	CL_0007
Norte	19.26	20.61
Sul	17.6	19.83

Tabela 6 – Variâncias do percentil 90 das alturas dos fatores (m)

	CL_0001	CL_0007
Norte	1.92	1.86
Sul	2.21	1.6

Graficamente, o boxplot das alturas, em metros, por material genético e por face de exposição solar, é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Boxplot da métrica percentil 90 da altura (m) de plantios com idade inferior a 4 anos, segregando a face de exposição solar e o material genético

A Figura 18 apresenta o gráfico de caixa (boxplot) da altura (em metros) onde podemos analisar o valor mínimo, primeiro, segundo e terceiro quartis além do valor máximo da altura para ambos os materiais genéticos estudados, sem considerar a face de exposição solar. Sob essa ótica, verificamos que o clone CL_0007 é superior

em crescimento quando comparado ao clone CL_0001. Isso pode ser explicado devido o clone CL_0007 possuir seleção clonal mais recente que o CL_0001, enfatizando que a estratégia de seleção da companhia tem mostrado resultados em campo. O percentil 90 da altura para o material genético CL_0001 foi de 18,8 metros e para o CL_0007 foi de 20,21 metros.

Figura 18 – Boxplot da métrica percentil 90 da altura (m) de plantios com menos de 4 anos de idade

Por outro lado, isolando o efeito de material genético, o histograma da Figura 19 mostra a média e o desvio padrão, além da distribuição geral dos dados considerando apenas a face de exposição solar.

Figura 19 – Histograma da altura (m) relativo à face de exposição solar em povoamentos jovens – detalhe para a média de 19.64m (desvio padrão de 1.5) para face norte e 18.75m (desvio padrão de 1.7) para face sul

A análise gráfica para verificação de homogeneidade da variância e normalidade dos dados, para garantir os pressupostos estatísticos estão apresentadas na Figura 20. Pode-se seguir com a análise estatística já que os dados garantem os pressupostos estatísticos.

Figura 20 – Análise gráfica da homogeneidade de variância e normalidade dos dados para florestas jovens

A análise de variância utilizada baseou-se no modelo descrito no capítulo anterior, considerando, portanto, a média da altura como variável de interesse, e os fatores material genético e face de exposição solar e a interação entre esses dois fatores (Tabela 7).

Tabela 7 – ANOVA do modelo

	GL	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F	Pr(>F)
Material Genético	1	734.4	734.4	386.68	< 2e-16 ***
Face	1	570	570	300.13	< 2e-16 ***
Material Genético:Face	1	65.5	65.5	34.48	5.24e-09***
Resíduo	1577	2995	1.9		

Observa-se, portanto, que há diferença estatística significativa para os fatores e entre os fatores. Em outras palavras, os dois materiais genéticos têm alturas diferentes entre si, as duas faces de exposição solar têm diferença entre si e há interação entre esses dois fatores.

Como há interação entre os dois fatores estudados, faz-se necessário desdobrar essa interação para verificar o comportamento dos níveis de fatores, para esse caso, as faces em relação aos materiais genéticos e os materiais genéticos com relação às faces.

No desdobramento fixamos um dos fatores e analisamos o outro, obtendo assim os resultados dedicados ao fator que não ficou fixo.

O primeiro desdobramento apresentado é o da face dentro de cada nível de material genético (Tabela 8).

Tabela 8 – ANOVA para o desdobramento (faces em cada tipo de material genético)

	GL	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F	Pr(>F)
Material genético	1	734.4	734.4	386.68	< 2e-16 ***
Interação Material Genético: Face	2	635.5	317.7	167.3	< 2e-16 ***
CL_0001	1	548.9	548.9	289.01	< 2e-16 ***
CL_0007	1	86.6	86.6	45.59	2.04e-11 ***
Resíduo	1577	2995	1.9		

Para esse desdobramento observa-se que os dois materiais genéticos diferem com relação à face, mostrando que os dois materiais genéticos estudados sofrem efeito da face de exposição solar.

O segundo desdobramento é do nível de material genético dentro de cada face de exposição solar (Tabela 9).

Tabela 9 – ANOVA para o desdobramento (materiais genéticos em cada nível de face)

	GL	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F	Pr(>F)
Face	1	288	288	151.6	< 2e-16 ***
Interação Face: material genético	2	1081.8	540.9	284.8	< 2e-16 ***
Norte	1	372.5	372.5	196.1	< 2e-16 ***
Sul	1	709.4	709.4	373.5	< 2e-16 ***
Resíduo	1577	2995	1.9		

Tanto a face norte quanto a face sul diferem significativamente para os materiais genéticos estudados. Portanto, o comportamento dos povoamentos clonais de *Eucalyptus* não são semelhantes quando se observa a face de exposição solar à que foram submetidos.

4.2 Plantios homogêneos de *Eucalyptus* com idade superior aos 5 anos

A amplitude de idade analisada nesse grupo variou de 5,1 a 6,6 anos de idade. Esse grupo pode ser citado como povoamento com idade superior a 5 anos.

Sabe-se que o ritmo de crescimento diminui o que é normal com o aumento da idade, devido ao incremento da competição intra-específica da população, contudo, espera-se que os efeitos obtidos no item anterior mantenham-se nesse grupo. No

estudo de Reis et al. (2014) verificou-se maior disponibilidade de energia no período de verão e que a precipitação influenciou diretamente na partição do balanço de energia, sendo que, durante todo o período estudado, a fração da energia disponível destinada à evapotranspiração foi sempre maior que a fração destinada ao aquecimento do sistema solo-planta-atmosfera.

A unidade amostral desse grupo de dados é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Tamanho amostral dos fatores povoamentos acima de 5 anos

	CL_0001	CL_0002	CL_0003	CL_0004	CL_0005	CL_0006
Norte	229	12	9	344	415	294
Sul	198	116	48	61	23	480

A média dos percentis 90 das alturas e as variâncias dos fatores encontram-se, respectivamente, nas Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 11 – Média do percentil 90 das alturas (m) dos tratamentos com idade superior a 5 anos

	CL_0001	CL_0002	CL_0003	CL_0004	CL_0005	CL_0006
Norte	26.47	27.4	28.9	26.09	26.58	28.64
Sul	26.38	27.89	27.29	24.54	26.71	27.27

Tabela 12 – Variâncias dos percentis 90 das alturas (m) dos fatores

	CL_0001	CL_0002	CL_0003	CL_0004	CL_0005	CL_0006
Norte	2.06	3.74	2.16	1.22	3.55	1.73
Sul	3.09	1.97	1.92	1.59	3.40	2.52

Tabela 13 – Média do percentil 90 das alturas (m) para as duas faces de exposição solar estudadas em florestas com idade superior a 5 anos

Norte	Sul
27.35	26.68

Figura 21 – Boxplot da métrica percentil 90 da altura (m) de plantios com mais de 5 anos de idade

As análises gráficas para verificação de homogeneidade da variância e normalidade dos dados, para garantir os pressupostos estatísticos estão apresentadas na Figura 22. Também nesse caso pode-se seguir com a análise estatística já que os dados garantem os pressupostos estatísticos exigidos para a análise de variância.

Figura 22 – Análise gráfica da homogeneidade de variância e normalidade dos dados para florestas com idade superior a 5 anos

A análise de variância geral do estudo fatorial estabelecido no capítulo anterior está representada na Tabela 14. Todos os fatores são significamente diferentes no resultado. A interpretação desses dados diz que para povoamentos florestais acima de 5 anos de idade, tanto o material genético, quanto a face e a interação entre material genético e face têm efeito no crescimento em altura das árvores de *Eucalyptus*.

Tabela 14 – ANOVA do estudo fatorial para florestas acima de 5 anos de idade

	GL	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F	Pr(>F)
Material Genético	5	1323	264.65	112.23	< 2e-16 ***
Face	1	310	310.02	131.47	< 2e-16 ***
Material Genético:Face	5	179	35.72	15.15	1.17e-14***
Resíduo	2217	5228	2.36		

Como há interação entre o material genético e a face de exposição solar, o procedimento seguinte é o desdobramento dessa interação, primeiramente considerando face em cada tipo de material genético (Tabela 15).

Tabela 15 – ANOVA para o desdobramento (faces em cada tipo de material genético)

	GL	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F	Pr(>F)
Material genético	5	1323	264.6	112.2	< 2e-16 ***
Interação Material Genético: Face	6	489	81.4	34.5	< 2e-16 ***
CL_0001	1	1	0.9	0.388	0.53329
CL_0002	1	3	2.6	1.12	0.28941
CL_0003	1	20	19.7	8.36	0.00387***
CL_0004	1	124	124.4	52.76	5.19e-13 ***
CL_0005	1	0	0.3	0.143	0.70502
CL_0006	1	341	340.6	144.43	< 2e-16 ***
Resíduo	2217	5228	2.4		

Conclui-se, portanto, que os clones denominados CL_0001, CL_0002 e CL_0005 não apresentam influência da face, ou seja, crescem de forma semelhante tanto na face norte quanto na face sul, contrariando o comportamento identificado para florestas jovens. Importante verificar que a soma de quadrados referente ao clone CL_0005 não é zero, mas um número próximo de zero que o software estatístico utilizado não demonstrou.

Já os clones CL_0004 e CL_0006 mantiveram a diferença em altura para a face de exposição solar. Para esses materiais as alturas médias entre faces são apresentadas na Figura 23 e Figura 24.

Figura 23 – Alturas médias nas faces norte e sul para o material genético CL_0004

Figura 24 – Alturas médias nas faces norte e sul para o material genético CL_0006

Muitos autores consideram que a avaliação de genótipos visando à identificação e recomendação de materiais superiores em diferentes ambientes como uma das etapas mais importantes de um programa de melhoramento (NUNES et al., 2002 apud ROCHA et al., 2005), corroborando com os resultados obtidos nessa pesquisa. Pelo exposto, os materiais genéticos influenciam diretamente no crescimento da floresta.

Dando continuidade ao desdobramento, a Tabela 16 traz os resultados considerando o comportamento dos materiais genéticos dentro das faces, ou seja, responde à pergunta se há diferença de crescimento em altura para florestas homogêneas de *Eucalyptus* dentro da face norte e sul de exposição solar, para florestas acima de 5 anos de idade.

Tabela 16 – ANOVA para o desdobramento (materiais genéticos em cada nível de face)

	GL	Soma Quadrado	Quadrado Médio	F	Pr(>F)
Face	1	1	1.06	0.451	0.5020
Interação Face: material genético	10	1811	181.08	76.79	< 2e-16 ***
Norte	1	3	2.76	1.17	0.2800
Sul	1	114	113.73	48.23	4.96e-12 ***
Resíduo	2217	5228	2.36		

A resposta é que a face norte não apresenta diferença do crescimento em altura para os materiais genéticos estudados, isto, em florestas com idade superior a 5 anos, os materiais genéticos não têm diferença em altura na face norte. Contudo, observa-se diferença na face sul. O resultado da face sul pode estar atrelado à continuidade da variabilidade inicial observada nos povoamentos com idade inferior a 4 anos de idade.

Dentro da face sul, foi aplicado um teste de médias (Tukey) cujos resultados são apresentados na Tabela 17. Observa-se cinco grupos distintos de comportamento em percentil 90 da altura das árvores.

Tabela 17 – Teste de médias (Tukey) para materiais genéticos na face sul (percentil 90 em metros)

Material Genético	Média	Grupo
CL_0002	27.89	a
CL_0003	27.29	ab
CL_0006	27.27	ab
CL_0005	26.71	bc
CL_0001	26.38	c
CL_0004	24.54	d

Em campo, observa-se claramente que determinados materiais genéticos sofrem com a menor incidência de radiação solar em seu arranque inicial (Figura 25). Sabe-se que a uniformidade em altura de plantio em fase inicial é fator importante na manutenção dessa uniformidade ao longo do ciclo do *Eucalyptus*, como observado no trabalho de Hakamada (2012).

Figura 25 – Plantio do material genético CL_0001 em área de face sul: folhas manchadas, menor crescimento e arranque

A Figura 26 apresenta o histograma das florestas com idade superior a 5 anos considerando a frequência das alturas médias preditas nas faces norte e sul.

Figura 26 – Histograma do percentil 90 da altura (m) relativo à face de exposição solar em povoamentos com idade superior a 5 anos

Os dados apresentados mostram que as florestas acima de 5 anos parecem recuperar o efeito inicial observado de diferença de crescimento entre face norte e sul, com atenção especial à face sul que continua mostrando diferença em altura para florestas com idade maior que 5 anos.

4.3 Considerações

A produtividade de grande parte das plantações florestais brasileiras está aquém de seu potencial, havendo amplas possibilidades de elevá-la, às vezes em larga escala. Isto é conseguido com adequada alocação do genótipo ao ambiente, concomitantemente ao uso de práticas corretas de manejo do solo (GONÇALVES et al., 2005). Este estudo é um exemplo clássico da importância dessa correta alocação em função de suas características genéticas.

As maiores dificuldades encontradas no desenvolvimento deste estudo estão relacionadas ao tempo de processamento dos dados LiDAR.

Sugere-se para trabalhos futuros análise similar para uma nuvem LiDAR proveniente de terreno montanhoso, esperando-se que os efeitos obtidos sejam ainda mais expressivos. O relevo montanhoso implica na existência de um micro clima, que tem grande importância para a produtividade, notadamente os de face com exposição sul. Essas mantêm maiores quantidades de umidade no solo e recebem menores

quantidades de calor. A umidade excessiva favorece processos de perdas, aumentando a limitação por fatores químicos do solo. O efeito disso sobre o processo fotossintético resulta em menores produtividades em plantio voltados para a face sul. A situação tende a ser mais desfavorável quanto maior for a declividade e altitude. Outro aspecto importante a ser analisado é a formação de neblina que também influi na quantidade de insolação recebida.

Como resultado desse trabalho compilou-se implicações práticas que podem acelerar o uso da tecnologia laser aerotransportada nas empresas florestais no Brasil são:

- a) disseminação das vantagens da ferramenta;
- b) formação de profissionais capacitados a processar e interpretar os dados;
- c) troca de experiência com países que já utilizam a tecnologia;
- d) complemento aos métodos atuais de inventário florestal;
- e) para mapeamento de características topográficas, tais como: avaliação da necessidade de retalhamento, lançamento de novas curvas de nível, aceiros e estradas florestais, análise de rotas alternativas e avaliação de novas estratégias logísticas e operacionais;
- f) para mapeamento de características fitossanitárias, como abrangência de infestações de pragas e doenças, exposição ao risco de geadas, incêndios;
- g) para mapeamentos edafoclimáticos: levantamento de propriedades físicas do solo e estado nutricional de povoamentos;
- h) e, políticas governamentais que incentivem o sobrevoo em território brasileiro.

A tecnologia é recente no Brasil mas de potencial indiscutível.

Diante do potencial de uso da tecnologia LiDAR no Brasil, para estudos futuros recomenda-se que sejam avaliados mais dados de sobrevoo e comparados aos dados reais obtidos de inventário convencional afim de disseminar o uso da ferramenta em larga escala no país. Outra estratégia que seria interessante é incentivar o governo brasileiro, em todas as esferas (municipal, estadual e federal) a realizar sobrevoos LiDAR para fins altimétricos, por exemplo, e com isso obter uma maior massa de dados a ser explorada pelos centros de pesquisa.

5 CONCLUSÕES

Retomando as hipóteses iniciais desta pesquisa, resumimos nesta seção as principais conclusões amparadas pelos resultados apresentados no capítulo anterior. Basicamente, este trabalho buscou evidências para corroborar a hipótese de que árvores expostas à face sul teriam menor crescimento do que árvores expostas à face norte, e de que, corroborada esta primeira hipótese, haveria interação entre essa exposição e o material genético.

O efeito da exposição à face sul no crescimento das árvores de *Eucalyptus* foi detectado em florestas com idade tanto inferior aos quatro anos quanto superior aos 5 anos de idade. Nesses povoamentos a face norte obteve maior crescimento (média de 19,64 metros e desvio padrão de 1,5) em relação à face sul (média de 18,75 metros e desvio padrão de 1,7). No modelo fatorial aplicado, esse crescimento foi estatisticamente diferente com relação às faces e aos materiais genéticos e apontou interação entre estes fatores. A face de exposição sul apresentando menor crescimento em relação ao norte corrobora a primeira hipótese desse estudo na qual previa esse fenômeno. Em continuidade, a segunda hipótese estabelecida, que buscou comprovar a existência de materiais genéticos mais resistentes ao efeito da face sul, também foi corroborada, já que a interação entre a exposição solar e os materiais genéticos se efetivou. Assim, com a realização do primeiro desdobramento, tendo como objetivo identificar o comportamento da face em cada genótipo, observou-se que os dois clones estudados sofrem efeito da face, ou seja, ambos apresentam menor crescimento na face sul quando comparado com o plantio em face norte. No segundo desdobramento, que avaliou os clones em cada face, há diferença estatística do comportamento do crescimento nas faces, isto causa o efeito positivo de plantios em áreas de exposição norte.

Em relação às florestas com idade superior aos cinco anos, a análise do modelo fatorial mostrou que todos os fatores diferem estatisticamente entre si, ou seja, os clones e as faces têm crescimento diferente e há interação entre face e clone. A média da altura dos plantios da face norte foi de 26,92 metros com desvio padrão de 1,8 e de plantios em face sul foi de 26,97 metros com desvio padrão de 1,7. A altura ligeiramente superior da média para a face sul evidenciou uma recuperação ou equalização das florestas com idades mais avançadas. O teste de significância para o efeito da interação entre material genético e face foi significativo, e após a verificação do primeiro desdobramento, onde analisou-se o efeito da face em de

cada material genético, foi possível afirmar que alguns materiais genéticos não sofrem efeito da exposição (CL_0001; CL_0002 e CL_0005). Já os materiais CL_0003, CL_0004 e CL_0006 apresentaram diferença no crescimento nas condições estudadas. O segundo desdobramento da interação face e material genético, que verificou o efeito dos materiais genéticos em cada nível de face de exposição em florestas com idade superior a 5 anos, mostrou que os clones na face norte cresceram de forma semelhante entre si. Os plantios clonais em face sul apresentaram desenvolvimento estatisticamente diferente, ou seja, a face sul manteve a variabilidade inicial encontrada em povoamentos mais jovens.

Esses resultados são válidos para as condições de declividade suavemente ondulada e de latitude não muito alta, típicas da região onde os dados foram obtidos. É evidente que havendo efeito positivo da exposição à face norte, teria sido mais adequado utilizar dados provenientes de regiões com topografia mais acidentada e mais ao sul no Brasil. Entretanto, o acesso a nuvens de pontos LiDAR nessas condições não se concretizou para efeito deste trabalho.

Tendo em vista a aparente comprovação de que a face sul afeta o crescimento mesmo nas condições menos extremas de declividade e latitude observadas neste estudo, seria recomendável estender o estudo para condições mais favoráveis que expressem ainda mais esse efeito.

Os resultados obtidos nesse projeto de pesquisa mostram que a face de exposição solar influencia no crescimento das florestas, sejam juvenis ou com idade superior a 5 anos, e que mais importante é o comportamento do material genético diante desse estresse, ou seja, de sua interação ambiental.

A grande quantidade de dados provenientes de nuvens LiDAR e seu processamento foram consideradas as maiores dificuldades desse estudo.

REFERÊNCIAS

ASSIS, T.F.; RESENDE, M.D.V. Genetic improvement of forest tree species. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Londrina, v. 1, p. 44-49, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2013 ano base 2012**. Brasília, 2013. 148 p.

Disponível em:

<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13_BR.pdf>. Acesso em 03 mar. 2014.

BATISTA, G.V.; OLIVEIRA, A.L.; SILVA, G.J.; QUEIROZ, C. Uso do perfilamento a laser na delimitação de áreas de preservação permanente de curso d'água: estudo de caso na área de regularização fundiária de interesse específico Arniqueira – Brasília/Distrito Federal – Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., Foz do Iguaçu, 2013. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 4419-4426.

BECKSCHÄFER, P.; SEIDEL, D.; KLEINN, C.; XU, J. On the exposure of hemispherical photographs in forests. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, Firenze, v. 6, p. 228-237, 2013.

BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 5-16, 2004.

BLASER, J.; GREGERSEN, H. Forests in the next 300 years. **Unasylva**, Rome, v. 64, n. 240, p. 61-73, 2013.

BOTREL, M.C.G.; TRUGILHO, P.F.; ROSADO, S.C.S.; SILVA, J.R.M. Seleção de clones de *Eucalyptus* para biomassa florestal e qualidade da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 237-245, 2010.

BRAGA, F.A.; ARROS, N.F.; SOUZA, A.L.; COSTA, L.M. Características ambientais determinantes da capacidade produtiva de sítios cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 291-298, 1999.

CAMPINHOS JUNIOR, E. Sustainable plantations of high-yield Eucalyptus trees for production of fiber: the Aracruz case. **New Forests**, Amsterdam, v. 17, p.129-143, 1999.

CAMPOE, O.C. **Ecologia da produção e da competição intra-específica do *Eucalyptus grandis* ao longo de um gradiente de produtividade no Estado de São Paulo**. 2012. 123 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. 548 p.

CARVALHO, K.H.A.; SILVA, M.L.; SOARES, N.S. Efeito da área e da produtividade na produção de celulose no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1119-1128, 2012.

CARVALHO, S.P.C. e. **Estimativa volumétrica por modelo misto e tecnologia laser aerotransportado em plantios clonais de *Eucalyptus* sp.** 2013. 104 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

DALAUQUA, R.M. Improving sustainability planning in Brazilian eucalyptus forests. In: EREDICS, P. (Ed.). **Mapping forestry**. Redlands: ESRI Press, 2010. chap. 19, p. 73-76.

ENAMI, L.M. **Relatório de execução Sistema LiDAR: código RC.1.27.13**. São Paulo: Fototerra, 2013. 38 p.

ENGLER, R.; WASER, L.T.; ZIMMERMANN, N.E.; SCHAUB, M.; BERDOS, S.; GINZLER, C.; PSOMAS, A. Combining ensemble modeling and remote sensing for mapping individual tree species at high spatial resolution. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 310, p. 64-73, 2013.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **Lidar analysis in ArcGis 10 for forestry applications**. Redlands, 2011. 53 p. (An Esri White Paper, 1).

FAO. **Anuário estatístico da FAO**. 2013. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/018/i3107e/i3107e00.htm>>. Acessado em: 30/06/2014.

FERNADES, A.L.T.; FLORÊNCIO, T.M.; FARIA, M.F. Análise biométrica de florestas irrigadas de eucalipto nos cinco anos iniciais de desenvolvimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n. 5, p. 505–513, 2012.

FIRMINO, D.C. **Biologia do psilídeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Psyllidae) em diferentes espécies de eucalipto e em *Eucalyptus camaldulensis* sob diferentes temperaturas.** 2004. 57 p. Dissertação (Mestrado em Proteção de Plantas) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2004.

FORRESTER, D.; ELMS, S.R.; BAKER, T.G. Tree growth-competition relationships in thinned *Eucalyptus* plantations vary with stand structure and site quality. **European Journal Forest Research**, Hamburg, v. 132, p. 241-252, 2013.

GARCIA, M.; DANSON, M.; RIAÑO, D. CHUVIECO, E.; RAMIREZ, F. A.; BANDUGULA, V. Terrestrial laser scanning to estimate plot-level forest canopy fuel properties. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 13, p. 636-645, 2011.

GAVA, J.L. **Relações entre atributos do solo e qualidade da madeira de clone de *Eucalyptus grandis* para a produção de celulose.** 2005. 54 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

GOLLE, D.P.; REINIGER, L.R.S.; CURTI, A.R.; BEVILACQUA, C.B. Melhoramento florestal: ênfase na aplicação da biotecnologia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 5, p. 1606-1613, 2009.

GONÇALVES, J.L.M. Conservação do solo. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais.** Piracicaba: IPEF, 2002. p. 41-130.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; WICHERT, M.C.P.; GAVA, J.L. Manejo de resíduos vegetais e preparo de solo. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais.** Piracicaba: IPEF, 2002. p. 131-204.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal.** Piracicaba, IPEF, 2005. p. 3-57.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests**, Menlo Park, v. 70, p. 105-118, 2008.

GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; GONÇALVES, T.D.; MOREIRA, R.M.; MENDES, J.C.T.; GAVA, J.L. Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*, com uso de sistema de informação geográfica. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 94, p. 187-201, 2012.

GONZÁLEZ, L.R. **Análise econômica de sistemas agroflorestais como alternativa para ovinocultores no sudoeste paulista**. 2014. 145 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. 145p. Piracicaba, 2014.

HAKAMADA, R.E. **Uso do inventário florestal como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em povoamentos clonais de *Eucalyptus***. 2012. 115 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

HAYASHI, M.; SAIGUSA, N.; OGUMA, H.; YAMAGATA, Y. Forest canopy height estimation using ICESat/GLAS data and error factor analysis in Hokkaido, Japan. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 81, p. 12-18, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Editora Rima, 2006. 550 p.

McGAUGHEY, R.J. **FUSION / LDV**: software for LIDAR data analysis and visualization v.3.41, Seattle, 2013. Disponível em: <http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2014.

MONTAGHI, A.; CORONA, P.; DALPONTE, M.; GIANELLE, D.; CHIRICI, G.; OLSSON, H. Airborne laser scanning of forest resources: Na overview of research in Italy as a commentary case study. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 23, p. 288-300, 2013.

NAESSET, E. Estimating timber volume with Laser Scanner Data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 61, n. 2, p. 246–253, 1997.

OLIVEIRA, L.T.; CARVALHO, L.M.T.; FERREIRA, M.Z.; OLIVEIRA, T.C.A.; ACERBI JUNIOR, F.W. Application of LiDAR to forest inventory for tree count in stands of *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 175-184, 2012.

OZDEMIR, I.; DONOGHUE, D.N.M. Modelling tree size diversity from airborne laser scanning using canopy height models with image texture measures. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 295, p. 28-37, 2013.

PULITO, A.P. **Resposta à fertilização nitrogenada e estoque de nitrogênio biodisponível em solos usados para plantações de *Eucalyptus***. 2005. 58 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing v.3.1. Vienna, 2013. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em: 08 jul. 2014.

REIS, M.G.; RIBEIRO, A.; BAESSO, R.C.E.; SOUZA, W.G.; FONSECA, S. LOOS, R.A. Balanço hídrico e de energia para plantios de eucalipto com cobertura parcial do solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 1, p. 117-126, 2014.

ROCHA, R.B.; MURO-ABAD, J.I.; ARAÚJO, E.F.; CRUZ, C.D. Avaliação do método centróide para estudo de adaptabilidade ao ambiente de clones de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 3, p. 255-266, 2005.

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

ROMANOVSKI, Z. **Morfologia e aspectos hidrológicos para fins de manejo da microbacia da Rua Nova, Viçosa-MG, para fins de manejo**. 2001. 99 p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

ROSADO, A.M.; ROSADO, T.B.; ALVES, A.A.; LAVIOLA, B.G.; BHERING, L.L. Seleção simultânea de clones de eucalipto de acordo com produtividade, estabilidade e adaptabilidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 7, p. 964-971, 2012.

SILVA, A.G.P. **Estimativa de biomassa de lenho em povoamentos de *Eucalyptus grandis* baseada em estatísticas do perfil de dossel geradas por escaneamento a laser aerotransportado**. 2014. 146 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SILVA, B.K. **Investments in timberland: investors's strategies and economic perspective in Brazil**. 2013. 151 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

SILVA, C.A. **Carbono na parte aérea de plantios de *Eucalytus* spp. – em nível de árvore por amostragem destrutiva e para talhões inteiros após o ajuste de métricas LiDAR**. 2013. 152 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

SILVA, C.R. da. **Efeito do espaçamento e arranjo de plantio na produtividade e uniformidade de clones de *Eucalyptus* na região nordeste do Estado de São Paulo**. 2005. 50 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SILVA, M.N. **Aplicação de laser scanner terrestre para determinação de variáveis dendrométricas em *Pinus* spp.** 2011. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SILVA, P.H.M.; POGGIANI, F.; LIBARDI, P.L.; GONÇALVES, A.N. Fertilizer management of eucalypt plantations on Sandy soil in Brazil: initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 67-78, 2013.

SMETHURST, P.J. Forest fertilization: trends in knowledge and practice compared to agriculture. **Plant and Soil**, The Hague, v. 335, p. 83-100, 2010.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; FONSECA, S.; LOOS, R.A.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.A.; LIMA, A.M.N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H.B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C.; AZEVEDO, M.R. The Brazil *Eucalyptus* potential productivity project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1684-1694, 2010.

STONE, C.; PENMAN, T.; TURNER, R. Determining an optimal model for processing lidar data at the plot level: results for a *Pinus radiata* plantation in New South Wales, Australia. **New Zeland Journal of Forestry Science**, Hamilton, v. 41, p.191-205, 2011.

TESFAMICHAEL, S.G.; AHMED, F.B.; VAN AARDT, J.A.N. Investigating the impact of discrete-return lidar point density on estimations of mean and dominant plot-level tree height in *Eucalyptus grandis* plantations. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 31, n.11, p. 2925-2940, 2010.

TSUI, O.W.; COOPS, N.C.; WULDER, M.A.; MARSHALL, P.L. Integrating airborne LiDAR and space-borne radar via multivariate kriging to estimate above-ground biomass. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 139, p. 340-352, 2013.

VIANA, S.M. **Percepção e quantificação das árvores na área urbana do município de São Carlos**. 2013. 211 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

WARING, R.H. A process model analysis of environmental limitations on the growth of Sitka spruce plantation in Great Britain. **Forestry**, Oxford, v. 73, p. 65-79, 2000.

WILCKEN, C.F.; BERTI FILHO, E. Alerta PROTEF Vespa da galha do eucalipto (*Leptocybe invasa*) (Hymenoptera: Eulophidae): Nova praga de florestas de eucalipto no Brasil. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 1, p. 1-11, 2008.

WILCKEN, C.F.; BERTI-FILHO, E.; OTTATI, A.L.T.; FIRMINO, D.C.; COUTO, E.B. do. Ocorrência de *Phoracantha recurva* Newman (Coleoptera: Cerambycidae) em eucalipto no Estado de São Paulo, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 62, p. 149-153, dez. 2002.

WILCKEN, C.F.; COUTO, E.B.; ORLATO, C.; FERREIRA-FILHO, P.J.; FIRMINO, D.C. Ocorrência do psílídeo-de-concha (*Glycaspis brimblecombei*) em florestas de eucalipto no Brasil. **Circular técnica IPEF**, Piracicaba, n. 201, p. 1-11, 2003.

WILCKEN, C.F.; SOLIMAN, E.P.; LUIZ ALEXANDRE NOGUEIRA DE SÁ, L.A.; BARBOSA, L.R.; DIAS, T.K.R.; FERREIRA-FILHO, P.J.; OLIVEIRA, R.J.R. Bronze bug *Thaumastocoris peregrinus* Carpintero and Dellapé (Hemiptera: Thaumastocoridae) on *Eucalyptus* in Brazil and its distribution. **Journal of Plant Protection Research**, Poznań, v. 50, n. 2, p. 201-205, 2010.

ZAKIA, M.J.; PINTO, L.F.G. **Guia para aplicação da nova lei em propriedades rurais**. Piracicaba: Imaflora, 2013. 32 p.

ZANUNCIO, J.C. **Manual de pragas em florestas: lepidoptera desfolhadores de Eucalipto; biologia, ecologia e controle**. Piracicaba: IPEF; SIF, 1993. 140 p.

ZANUNCIO, J.C.; FAGUNDES, M.; ANJOS, N.; ZANUNCIO, T.V.; CAPITANI, L.R. Levantamento e flutuação populacional de lepidópteros associados à eucaliptocultura: V – Região de Belo Oriente, Minas Gerais, junho de 1986 a maio de 1987. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 14, p. 35-44, 1990.

ZHOU, J.; PROISY, C.; DESCOMBES, X.; MAIRE, G.; NOUVELLON, Y.; STAPE, J.L.; VIENNOIS, G.; ZERUBIA, J.; COUTERON, P. Mapping local density of young *Eucalyptus* plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 129-141, 2013.

ZONETE, M.F. **Análise do uso da tecnologia laser aerotransportado para inventários florestais em plantios clonais de *Eucalyptus* sp 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. Estimção de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia: uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 225-235, Piracicaba, 2010.