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

**Caracterização da sazonalidade do crescimento do lenho, da copa e
da eficiência do uso da luz em clones do gênero *Eucalyptus***

Eduardo Moré de Mattos

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

**Piracicaba
2015**

Eduardo Moré de Mattos
Engenheiro Florestal

**Caracterização da sazonalidade do crescimento do lenho, da copa e da
eficiência do uso da luz em clones do gênero *Eucalyptus***

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LUIZ STAPE**

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

**Piracicaba
2015**

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

Mattos, Eduardo Moré de

Caracterização da sazonalidade do crescimento do lenho, da copa e da eficiência do uso da luz em clones do gênero *Eucalyptus* / Eduardo Moré de Mattos. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.
128 p. : il.

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

1. *Eucalyptus* 2. Índice de área foliar 3. Arquitetura de copa 4. Eficiência de uso da luz
5. Alocação de carbono I. Título

CDD 634.9734
M444c

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

DEDICO

Aos meus pais,

EMERSON (*in memoriam*) e **CELI** (*in memoriam*), raízes dos meus valores e caráter. Apesar de tanto tempo distante, é difícil passar um dia sem a lembrança de suas memórias. Espero que estejam orgulhosos...

À minha irmã,

MARIA RAQUEL, a esta me falta vocabulário. Obrigado por ser minha amiga, mãe, irmã e família ao mesmo tempo, a mulher mais forte que conheço.

Às ciências florestais,

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Aos meus tios Gilberto e Magali, por terem me acolhido em sua casa como um filho. Sem a intervenção de vocês, talvez nem os caminhos que me levaram à universidade teria alcançado.

A toda minha família, em especial à tia Ângela, pelas conversas e devaneios sobre a vida e sobre nossa passagem, meu exemplo de sabedoria.

À minha noiva, Larissa Bortoletto Miyata. A quem escolhi amar e compartilhar o resto da vida. Obrigado por ser minha companheira em todos os momentos.

Ao professor José Luiz Stape, pelas oportunidades a mim oferecidas desde os primeiros anos da graduação. Exemplo de paixão e dedicação incondicionais às ciências florestais, uma pessoa incrível de quem tive a felicidade de ser orientado.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, berço das ciências agrárias brasileiras, onde tive a honra de me tornar Engenheiro Florestal. Ao Departamento de Ciências Florestais e Programa de Pós-graduação em Recursos Florestais, ao qual cumprimento todos seus professores e colaboradores, peças chave em nossa formação.

Ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) e à empresa Duratex S. A., na pessoa da Engenheira florestal MSc. Ana Marrichi, pelo suporte logístico e financeiro à realização das atividades desta pesquisa.

Ao Programa Cooperativo sobre Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico e Térmico (TECHS) e seus alunos Marcello Pizzi, Jéssica Bispo, Beatriz Gonzalez, Lays Gollovitz, Ítalo Ramos, Gabriela Vilela e Giovanna Samesima, pela imensurável ajuda durante as atividades de campo e laboratório.

Aos Engenheiros florestais e grandes amigos, Otávio Campoe, Clayton Alvares e Marina Gentil Otto por ter aprendido muito ao lado de vocês. A todos, o título simbólico de co-orientadores desta pesquisa, minha imensa admiração.

À república Covil, minha definição da palavra “casa”. Que o lobo e a deusa Ceres iluminem a todos nós!

Aos amigos Ivan Balcão, Vitor Trigueirinho, Frederico Domene, Isabel Deliberali, Marina Montó, Arthur Vrechi, José Henrique Bazani e Eduardo Sereguim por terem sido parte da caminhada até aqui, sempre compartilhando de bons momentos e boas energias.

Ao Grupo Florestal Monte Olimpo (GFMO), pelos anos de amizade, aprendizado, dedicação e por sua contribuição ao meu desenvolvimento pessoal e profissional. Um especial agradecimento aos que puderam me acompanhar durante as atividades.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fornecimento da bolsa de Mestrado.

Ao programa de mobilidade internacional do banco Santander pela bolsa de intercâmbio concedida à North Carolina State University (NCSU) e aos amigos Rafaela Carneiro, Ana Carolina Lacerda, Lara Calvo, Melanie Paul, Kevin Hall, Nathan Thomas, Henrique Ferraço, Jéssica Kaseker, Caroline Senicato e José Rodrigo Mendes, pelo apoio e amizade durante o período em Raleigh.

Ao professor Francides Gomes por abrir o espaço do Laboratório de Química Celulose e Energia (LQCE) para a realização desta pesquisa e aos amigos Camila Sarto, Laura Trebbi, Tiago Segura, Magnos Vivian, Eraldo Bonfatti e Regina Buch por compartilharem suas experiências mesmo que em áreas distintas.

Aos professores Dan Binkley, Paulo Sentelhas e Fábio Marin pelas valiosas discussões e esclarecimentos prestados e ao prof. Carlos Tadeu dos Santos Dias pelo suporte com as análises estatísticas.

Ao laboratório de Estudos de Plantas sob Estresse e Neurofisiologia Vegetal, na figura do prof. Ricardo Ferraz e ao laboratório de Métodos Quantitativos, na figura de Jefferson Polizel, pelo suporte com diversos equipamentos utilizados nesta pesquisa.

A todos aqueles que contribuíram de alguma forma, direta ou indiretamente, para que este trabalho se concretizasse. O meu sincero muito obrigado!

“Observe profundamente a natureza e então você entenderá tudo melhor.”

Albert Einstein

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Hipóteses	17
1.2 Caracterização da área de estudo	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Produtividade de povoamentos florestais	19
2.2 Índice de área foliar e arquitetura de copa	20
2.3 Métodos de determinação do índice de área foliar	21
2.3 Eficiência do uso da luz e variáveis meteorológicas	22
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Caracterização da área experimental	25
3.2 Monitoramento meteorológico	29
3.2.1 Origem das informações e variáveis meteorológicas	29
3.2.2 Processamento das variáveis meteorológicas	30
3.3 Crescimento em biomassa do fuste	35
3.3.1 Parcelas experimentais	35
3.3.2 Monitoramento quinzenal	37
3.3.3 Amostragem destrutiva da parte aérea lenhosa	38
3.3.4 Cálculo das variáveis de crescimento	40
3.3.5 Cálculo do incremento quinzenal	41
3.4 Desenvolvimento da Copa	43
3.4.1 Arquitetura de copa	43
3.4.2 Determinação da área foliar específica	45
3.5 Métodos de determinação do índice de área foliar	45
3.5.1 Método destrutivo	45
3.5.2 Ceptômetro AccuPAR LP-80	46
3.5.3 LAI-2000 Plant canopy analyzer	48
3.5.4 Coeficiente de extinção de luz	51
3.5.5 Comparação entre os métodos	52
3.6 Determinação da fração da radiação interceptada pelo dossel	52
3.7 Eficiência do uso da luz	53
3.8 Análise estatística	54

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	Crescimento em biomassa do fuste	55
4.1.1	Parcelas de inventário	55
4.1.2	Monitoramento quinzenal	57
4.2	Desenvolvimento e caracterização da arquitetura de copa	61
4.2.1	Evolução da copa	61
4.2.2	Amostragem destrutiva da copa	68
4.3	Métodos de determinação do índice de área foliar	72
4.3.1	Incertezas e fontes de erro	72
4.3.2	Pressuposições dos modelos	75
4.3.3	Coeficiente de extinção de luz	80
4.3.4	Comparação entre os métodos	82
4.3.5	Considerações práticas	86
4.4	Variabilidades genética e temporal do uso e eficiência do uso da luz	95
4.4.1	Uso da luz (IPAR)	88
4.4.2	Eficiência do uso da luz	91
4.5	Variáveis meteorológicas e eficiência do uso da luz	95
4.6	Considerações finais	102
5	CONCLUSÕES	107
	REFERÊNCIAS	109
	APÊNDICES	121

RESUMO

Caracterização da sazonalidade do crescimento do lenho, da copa e da eficiência do uso da luz em clones do gênero *Eucalyptus*

Fotossíntese é o processo biofísico pelo qual energia luminosa é transformada em energia química armazenada em compostos de carbono. A taxa fotossintética instantânea possui um forte padrão assintótico em resposta ao incremento da intensidade luminosa, porém quando integramos a fotossíntese em escalas espaciais e temporais maiores, observa-se um padrão linear de resposta entre radiação interceptada e produção. Esta abordagem permitiu o surgimento de modelos baseados nas taxas de conversão de energia radiante em biomassa seca, ou eficiência do uso da luz (ε). Valores publicados para o *Eucalyptus* estão na faixa de 0,5-2,5 g MJ⁻¹, porém se faz necessário um entendimento mais profundo a respeito da sensibilidade destes valores às flutuações do clima e sua sazonalidade. Para isso, as taxas de crescimento, uso e eficiência do uso da luz foram monitoradas quinzenalmente durante 16 meses em parcelas de 18 clones de *Eucalyptus*, dos 1,3 aos 2,7 anos de idade. Foram testadas as hipóteses de que a produção de madeira aumentaria em função de incrementos no uso e/ou eficiência de uso da luz, assim como estes valores aumentariam respectivamente com incrementos no índice de área foliar e por uma alocação de carbono para o fuste, respectivamente. Os clones apresentaram uma grande amplitude de produtividade (9,9-22,7 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) e arquiteturas de copa, capturando entre 65-95% da radiação incidente. Tais valores resultaram em uma eficiência do uso da luz média de 1,5 g MJ⁻¹, variando entre 0,16-3,14 g MJ⁻¹. Apesar de patamares distintos, os valores de eficiência de uso dos clones oscilaram de maneira similar, de modo que a radiação incidente foi a principal variável afetando a eficiência de uso da luz, estando ε positivamente relacionada a variáveis que expressam períodos de maior disponibilidade hídrica e negativamente relacionado a períodos de menor disponibilidade. Maiores valores de índice de área foliar efetivo (L_e) acarretaram em maior interceptação de luz, porém as distintas arquiteturas de copa revelaram diferentes estratégias de captura de luz ($0,3 < k < 0,6$). Apesar de uma maior interceptação, não houve correlação significativa com a produtividade, no entanto observou-se uma forte correlação entre eficiência do uso da luz e crescimento em madeira, resultado de uma maior alocação para o fuste. Apesar de evidenciar a relação entre alocação e eficiência, existem outros mecanismos associados às alterações observadas em ε que apenas uma caracterização completa dos fluxos de carbono pode elucidar.

Palavras-chave: *Eucalyptus*; Índice de área foliar; Arquitetura de copa; Eficiência de uso da luz; Alocação de carbono

ABSTRACT

Seasonal characterization of wood growth, canopy structure and light use efficiency in *Eucalyptus* clones

Photosynthesis is the biophysical process by which light energy is converted into chemical energy stored in carbon compounds. The instantaneous photosynthetic rate has a strong asymptotic pattern in response to increases in light intensity, however when we integrate photosynthesis in larger spatial and temporal scales, there is a linear pattern of response between intercepted radiation and production. This approach has allowed the appearance of models based on radiant energy conversion rates into dry biomass, or light use efficiency (ϵ). Published values for *Eucalyptus* range from 0.5 to 2.5 g MJ⁻¹, but a deeper understanding of the sensitivity of these values to climate fluctuations and seasonality is necessary. For this reason, wood growth rates, light use and efficiency were monitored every two weeks for 16 months at 18 *Eucalyptus* clones plots, from 1.3 to 2.7 years of age. Our hypothesis was that wood production would be positively related to light use and efficiency, as well these values would increase respectively with increases in leaf area index and carbon allocation to the stem. Clones showed a wide range of productivity (9.9 to 22.7 Mg ha⁻¹ yr⁻¹) and canopy architectures, capturing between 65-95% of incident radiation. Such values resulted in an average light use efficiency of 1.8 g MJ⁻¹, ranging from 0.16 to 3.14 g MJ⁻¹. Although different levels, light use efficiency values for the clones fluctuated similarly. Incident radiation was the main variable affecting the efficiency of dry matter conversion, and ϵ values were positively related variables expressing periods of greater water availability and negatively related to periods of lower availability. Larger effective leaf area index (L_e) values resulted in higher light interception, but the different canopy architectures revealed different light capture strategies ($0.3 < k < 0.6$). Despite a higher interception, there was no significant correlation with productivity; however there was a strong correlation between light use efficiency and wood growth, as a result of increased allocation to the stem. While evidencing the relationship between allocation and efficiency, there are other mechanisms associated with changes in ϵ observed that only one full characterization of the carbon fluxes can elucidate.

Keywords: *Eucalyptus*; Leaf area index; Canopy structure; Light use efficiency; Carbon allocation

1 INTRODUÇÃO

Fotossíntese é o processo biofísico pelo qual energia luminosa é transformada em energia química armazenada em complexos compostos de carbono servindo de energia para os processos celulares (respiração, movimentos, etc.). O aparato fotossintético pode ser dividido em dois estágios: a fase fotoquímica, que se dá na membrana dos tilacóides; e a fase bioquímica, que ocorre no estroma do cloroplasto.

De maneira resumida, na fase fotoquímica a energia luminosa é aprisionada e transferida aos centros de reação dos fotossistemas I e II, por meio de estruturas especializadas conhecidas como antenas. As moléculas de clorofila atingem então um estado excitado de energia, desencadeando uma série de reações em que diversos compostos atuam como doadores e receptores de elétrons (esquema “Z”). Nesta etapa, os processos em destaque são a oxidação da molécula de água, a síntese de ATP e a redução do NADP^+ à NADPH. Na fase bioquímica, ATP e NADPH (produtos da fase fotoquímica) são consumidos em um processo conhecido com ciclo de Calvin-Benson, que resulta na fixação do dióxido de carbono atmosférico em carboidratos (TAIZ; ZEIGER, 2010).

A taxa fotossintética instantânea de uma folha em resposta à intensidade luminosa incidente possui um padrão de resposta bem conhecido. No início, há um incremento linear da taxa fotossintética em resposta aos incrementos na intensidade luminosa até um ponto em que aumentos da intensidade de luz geram incrementos decrescentes ou até nulos na taxa fotossintética, alcançado um patamar máximo. Neste trecho da curva, outras limitações (como a taxa de difusão de CO_2 intracelular, por exemplo) passam a regular o processo (CANNEL, 1989; LEUNING et al., 1995; MELIS, 2009; KOYAMA; KIKUZAWA, 2010).

No entanto, quando integramos a fotossíntese em escalas espaciais e temporais maiores (folha $\rightarrow$ copa $\rightarrow$ dossel; segundos $\rightarrow$ meses $\rightarrow$ anos), observa-se um padrão linear de resposta aos incrementos na quantidade de energia luminosa interceptada. Desta maneira, podemos simplificar o processo e traduzi-lo de acordo com o modelo empírico (LANDSBERG; SANDS, 2011):

$$\Delta P_n = \varepsilon \Delta Q_{int}, \quad (1)$$

Em que: ΔP_n é a produção primária líquida em um dado intervalo de tempo (g m^{-2}); ΔQ_{int} é a quantidade da radiação interceptada pelo dossel neste intervalo (MJ m^{-2}) e ε é a eficiência do uso da luz (g MJ^{-1}).

Esta simplificação possibilitou o surgimento de diversos modelos de produção baseados na intercepção e eficiência do uso da radiação (LANDSBERG; WARING, 1997; HUANG et al., 2010), além de grande discussão acerca das bases fisiológicas destas relações (MEDLYN, 1998).

Foi Monteith em 1977 que consagrou esta abordagem ao analisar e discutir as relações entre o clima e a eficiência na produção de cevada, maçã, batata e beterraba na Grã-Bretanha. Para todas estas culturas, ele obteve relações lineares entre a quantidade de radiação absorvida e produção, encontrando um valor médio de 1,4 g de matéria seca por MJ de energia solar interceptada equivalente a uma eficiência na conversão em biomassa de 2,4%, sob condições experimentais de adequado suprimento hídrico e nutricional.

Neste mesmo trabalho, o autor comenta os efeitos do estresse hídrico na redução da eficiência fotossintética e também discuti outros fatores de redução registrando valores de eficiência fotossintética igual a 0,3%, se considerados os valores de produtividade média das culturas estudadas.

Stape et al. (2010) e Ryan et al. (2010), buscando definir os patamares da produtividade do *Eucalyptus* no Brasil e os fatores que a controlam (Produtividade Potencial do *Eucalyptus* no Brasil - BEPP, www.ipef.br/bepp), estudaram oito clones em oito locais do Brasil, e concluíram que na escala do povoamento a produtividade florestal é dependente da disponibilidade hídrica e da uniformidade de tamanho entre árvores. No aspecto genético, os autores não puderam fazer inferências, pois em cada local havia apenas um clone, sendo impossível avaliar a interação genótipo x ambiente.

Recentemente, um novo programa cooperativo intitulado TECHS (Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico e Térmico, www.ipef.br/techs) foi iniciado e visa estudar o comportamento de clones do gênero *Eucalyptus* sob diferentes níveis de estresses hídrico, térmico e biótico (pragas e doenças), e a interação entre eles. Para tal foram instalados experimentos ao longo de um gradiente de mais de 4.000 km, dos Estados do Pará ao Rio Grande do Sul, abrangendo diversas tipologias climáticas (ALVARES et al., 2013b) e edáficas.

O TECHS superou a restrição do programa BEPP ao selecionar 18 clones de alta relevância para o Brasil e colocar 11 clones em cada um de seus 35 sítios, e os 18 clones em dois dos sítios, dos quais um é alvo deste estudo. O projeto BEPP caracterizou padrões e valores de produtividade, índice de área foliar e eficiência do uso da luz que podem ser agora detalhadamente comparados com estes novos materiais genéticos.

O entendimento dos padrões de eficiência do uso da luz, sua dinâmica e fontes de variação temporal e espacial ainda necessitam ser mais estudados. Assim, este projeto de pesquisa visa monitorar de forma quinzenal as flutuações nas taxas de crescimento, IAF, uso e eficiência do uso da luz para diferentes genótipos do gênero *Eucalyptus*, possibilitando a compreensão da variabilidade da produtividade entre materiais genéticos e sua sensibilidade à sazonalidade do clima.

Finalmente, o fato de este estudo contemplar os 18 materiais genéticos, permite esta campanha única e seu uso comparativo ou de projeção com demais regiões no Brasil.

1.1 Hipóteses

Desta forma, as hipóteses levantadas nesta pesquisa foram:

I. Apesar de pertencerem ao mesmo gênero, devido às diferenças genéticas e de origem dos clones, estes apresentarão patamares distintos de uso e eficiência do uso da luz.

II. Os clones mais produtivos estarão associados a um maior uso e/ou maior eficiência do uso da luz (BINKLEY et al., 2013a).

III. As flutuações da eficiência do uso da luz serão função do material genético e do clima, de modo que altos valores de déficit de pressão de vapor, temperaturas extremas (máximas e mínimas) e baixos teores de água no solo reduzam a eficiência do uso da luz (MONTEITH, 1972; LANDSBERG; HINGSTON, 1996).

1.2 Objetivos

Dada a representatividade dos 18 materiais genéticos selecionados para este projeto, além da motivação global descrita acima e com base em suas hipóteses, este trabalho teve como objetivos específicos:

I. Caracterizar a dinâmica e variabilidade dos atributos da copa e crescimento dos genótipos de *Eucalyptus* estudados.

II. Fornecer valores referência de produtividade e de parâmetros importantes para a modelagem ecofisiológica do crescimento de florestas.

III. Discutir os aspectos teóricos e práticos inerentes aos métodos empregados para estimativa do índice de área foliar e radiação interceptada pelo dossel.

IV. Avaliar a sensibilidade de resposta da eficiência do uso da luz quanto à defasagem das variáveis meteorológicas nos períodos calculados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Produtividade de povoamentos florestais

Atualmente o Brasil possui uma área de aproximadamente 7,7 milhões de hectares com florestas plantadas, cerca de 0,9% do território nacional, dos quais 5,6 milhões (72%) são plantados com espécies do gênero *Eucalyptus*. A produtividade média do setor encontra-se estagnada, desde meados dos anos 2000, ao redor dos 40 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (IBÁ, 2015). No entanto, durante os anos de 1970 a 2000 observou-se um rápido incremento na produtividade das plantações, oriundas do desenvolvimento de materiais genéticos, melhoria e adequação das práticas silviculturais e medidas de proteção (HAKAMADA, 2012).

A produtividade saiu de aproximadamente 25 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ em 1990 para os atuais 39 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ atingidos em 2014. Com o aumento da área plantada (+1,8% entre os anos de 2013/2014 (IBÁ, 2015) e a expansão sob as novas fronteiras florestais, com destaque para os estados de Mato Grosso do Sul, Tocantins, Maranhão e Piauí (GONÇALVES et al., 2013), regiões sem tradição silvicultural e propensas a maiores estresses ambientais (altas temperaturas e distribuição de chuvas irregular), o grande desafio é adequar materiais genéticos e práticas de manejo de modo a alcançar a rentabilidade do negócio florestal.

Hakamada (2012) em seu trabalho também ressalta que mesmo considerando os atuais materiais genéticos, ainda há espaço para ganhos pela melhoria da qualidade silvicultural. De fato, Pallet e Sale (2004) avaliando as causas de ganhos de produtividade em plantações de *Eucalyptus* na África do Sul, apontaram um incremento de quase duas vezes na produtividade ao se ajustarem fatores como a genética, densidade de plantio, práticas de fertilização e controle de ervas.

Assim como a expansão para novos ambientes traz riscos à produtividade, as constantes oscilações do clima podem afetar significativamente o crescimento dos povoamentos, haja vista o longo período das rotações (6 – 8 anos). Entender a influência das variáveis ambientais no crescimento se torna fundamental para estabelecer cenários de produtividade atingíveis, mesmo em ambientes tradicionalmente cultivados.

2.2 Índice de área foliar e arquitetura de copa

Uma vez que a produtividade de determinada cultura está intimamente ligada à quantidade de radiação interceptada pelo dossel. O índice de área foliar (L), que é definido como a superfície fotossintética de tecido foliar por unidade de área (JONCKHEERE et al., 2004), torna-se uma medida importante neste sentido, pois expressa o tamanho do aparato fotossintético e relaciona-se com a capacidade do dossel em interceptar e absorver radiação.

Diversas metodologias empregam o índice de área foliar no cálculo fração da radiação interceptada pelo dossel (RUNYON et al., 1994; HYER; GOETZ, 2004) e este assunto tem sido objeto de grande discussão (BINKLEY et al., 2013b; FORRESTER, 2014), porém a base teórica da maioria dos métodos baseia-se no comportamento logarítmico de atenuação da intensidade luminosa ao atravessar um meio, conhecido como lei de Beer (MONSI; SAEKI, 2005).

Assim como a quantidade de folhas, a distribuição horizontal e vertical da cobertura vegetal, o formato das copas, o ângulo de inclinação das folhas, seu arranjo no espaço (auto sombreamento) e as propriedades ópticas das folhas também são importantes na quantificação da radiação interceptada pelo dossel. A todas estas características chamaremos de arquitetura de copa. Apesar de alguns modelos de interceptação de luz levarem em consideração atributos de árvores individuais como dimensões da copa, densidade de área foliar, etc. (WANG; JARVIS, 1990), todas elas tendem a ser resumidas a um dado coeficiente de extinção de luz “ k ”, de modo a facilitar a aplicação do modelo.

Uma solução ao cálculo de “ k ” foi dada por Nilson (1971) relacionando a área projetada das folhas à angulação do feixe de radiação sobre sua superfície. Campbell (1986) propôs uma maneira elegante para o cálculo deste coeficiente, simplificando a distribuição de ângulos foliares a um parâmetro relativo ao ângulo de inclinação médio das folhas e assumindo uma distribuição elipsoidal. De fato, Wang et al. (2007) demonstrou que dentre as diversas distribuições teóricas descrevendo a inclinação foliar, a função beta de dois parâmetros, a função elipsoidal e a esférica foram as que melhor representaram as comunidades vegetais estudadas.

Deste modo, um dossel que tem folhas mais eretas, possuirá coeficientes de extinção menores quando acertadas por raios solares perpendiculares à superfície do dossel, aumentando a quantidade de radiação solar transmitida e vice-versa.

Assim como a distribuição de ângulos foliares, o arranjo espacial das copas também afeta o processo de interceptação da radiação. Estudando dosséis de coníferas, Chen et al. (1991) ao observarem o arranjo dos fascículos, notaram que o auto sombreamento se dava em escalas ainda menores que o indivíduo e este agrupamento da folhagem podia ser quantificado em um índice.

Diversos outros trabalhos utilizaram a mesma abordagem ao quantificarem comunidades vegetais com dosséis heterogêneos (CHEN; BLACK, 1992; CHEN et al. 1997; LAW et al., 2001). Assim podemos notar que mesmo possuindo o mesmo índice de área foliar, duas comunidades vegetais distintas podem interagir com a luz de maneira diferente em virtude de suas arquiteturas de copa e consequentes coeficientes de extinção de luz.

Estas adaptações e a sazonalidade de L ao longo do período de desenvolvimento das culturas determinarão a quantidade de radiação interceptada pelo dossel e potencialmente, o crescimento. Potencialmente, pois como citado anteriormente, não só a quantidade, mas também a eficiência com que esta radiação é utilizada será determinante do crescimento.

2.3 Métodos de determinação do índice de área foliar

Métodos diretos para a determinação do índice de área foliar (L) geralmente são laboriosos e envolvem o abate de indivíduos em todas as classes diamétricas da população, a quantificação da área foliar individual, a construção de modelos alométricos e o monitoramento das taxas de queda de folheto.

Em virtude disto, existe uma série de equipamentos comerciais capazes de estimar o índice de área foliar de maneira indireta (L_e), tais como o LP-80, LAI-2000, fotografias hemisféricas, DEMON e TRAC (GOWER et al., 1999; WEISS et al., 2004). Entretanto, todos eles baseiam-se na extinção da radiação pelo dossel, assumindo pressuposições teóricas acerca da configuração do dossel.

A magnitude do erro na estimativa do índice de área foliar será proporcional à magnitude em que o dossel original se desvia de tais pressuposições (NOUVELLON et al., 2000). Uma das principais violações é a de que a folhagem é distribuída aleatoriamente no dossel, condição violada no caso de copas agrupadas por exemplo. Ryu et al. (2010) verificaram uma diferença de até 30% entre os valores de

L e L_e , indicando que o grau de cobertura do dossel, altura das plantas e a profundidade da copa seriam bons preditores desta variável.

Além da distribuição da cobertura foliar e seu arranjo espacial, os efeitos da reflectância e transmissividade das folhas, sua orientação e a interceptação por materiais lenhosos (galhos e fustes) também afetam a estimativa do índice de área foliar. Além disso, no momento da coleta deve-se atentar às condições de aquisição dos dados, com iluminação estável e uma intensidade amostral que represente adequadamente o ambiente lumínico abaixo do dossel, de modo a reduzir outras fontes de ruído e incertezas já inerentes aos métodos.

Entretanto, devemos discernir em quais situações é mais conveniente a aplicação da abordagem teórica da estimativa do índice de área foliar, visto que muitas vezes o grande interesse está em se computar a interceptação de luz pelo dossel e medidas de transmitância podem facilmente ser adquiridas diretamente por meio dos aparelhos disponíveis (BINKLEY et al., 2013b).

Apesar disso, guardadas as distintas arquiteturas de copas, os métodos de estimativa do índice de área foliar sofreram um grande avanço com a evolução das tecnologias de sensoriamento remoto (MARSDEN et al., 2010; le MAIRE et al., 2012, SILVA, 2014) e o surgimento de satélites de boa resolução espacial e temporal vem possibilitando o monitoramento de grandes áreas.

2.4 Eficiência do uso da luz e variáveis meteorológicas

De maneira análoga a eq. 1, Cannel (1989) propôs que a taxa de produção de madeira pode ser escrita como:

$$\Delta P_n = \varepsilon \Delta Q_{int} \eta - V \quad (2)$$

Em que: ΔP_n é a produção primária líquida de madeira em um dado intervalo de tempo (g m^{-2}); ΔQ_{int} é a quantidade da radiação interceptada pelo dossel neste intervalo (MJ m^{-2}); ε é a eficiência do uso da luz (g MJ^{-1}); η é a proporção alocada para o fuste e V representa alguma mortalidade no período (g m^{-2}).

Os outros fatores ambientais ficam assim implícitos na análise, pelo impacto que causam em ΔQ_{int} , ε , η e V . Assim, o aspecto nutricional, baixas temperaturas e períodos de estresse hídrico afetariam a produção por afetarem a produção de biomassa foliar e consequentemente reduzir ΔQ_{int} . Temperaturas extremas e períodos de estiagem reduziriam ε ou aumentariam V , já a disponibilidade de água e nutrientes alterariam η .

Monteith (1972) pontuou alguns dos fatores que influenciam a eficiência de uso da radiação solar, levando em consideração as perdas devido aos aspectos de localização geográfica e posicionamento da terra em respeito ao sol, características atmosféricas e qualidade da radiação, nebulosidade, resistência estomática à difusão de vapor e respiração de manutenção, penalizando um valor máximo de eficiência do uso da luz, por exemplo.

Medlyn (1998) encontrou correlações negativas entre a eficiência de uso da luz e a radiação solar incidente média do período (calculados em escalas diária, mensal e anual). Isto ressalta a perda de eficiência sob condições de excesso de luz, e podemos perceber como a interação entre a arquitetura de copa pode afetar a eficiência, uma vez que folhas mais eretas tenderiam reduzir a interceptação pelo dossel, sob condições de irradiância solar elevada.

Whitehead e Beadle (2004) realizaram uma extensa revisão sobre a regulação fisiológica da produtividade em *Eucalyptus*, detalhando as respostas fisiológicas das plantas às mudanças nas condições de crescimento (afetadas por variáveis ambientais como temperatura, déficit de pressão de vapor, água disponível na zona radicular, entre outras), além de características genéticas e morfológicas do *Eucalyptus* que proporcionam a este gênero elevadas taxas de captura de carbono.

Em sua revisão os autores encontraram valores de eficiência do uso da luz variando de 0,5 a 2,7 g MJ⁻¹, consistente com os valores citados por Landsberg e Sands (2011), entre 0,2 a 2,73 g MJ⁻¹. Stape et al. (2008), estudando a alocação de carbono em dois anos (um considerado mais úmido e outro normal) sob dois regimes hídricos (irrigado e não irrigado), obtiveram pouca diferença entre os tratamentos durante o ano úmido, porém a eficiência sofreu uma redução de cerca de 50% (0,78 para 1,66 g lenho MJ⁻¹) comparando as situações não irrigada e irrigada durante o ano normal.

Estudando povoamentos homogêneos e mistos de *Acacia mangium* e *Eucalyptus grandis*, Nouvellon et al. (2012) observaram padrões similares de alocação de carbono nas duas espécies quando em monocultivo, porém quando misturadas, mesmo com um significativo incremento na área foliar e consequentemente na absorção de radiação, houve um pior desempenho na produção de madeira, graças a uma menor produtividade primária bruta e também por alterações nos fluxos de carbono, de acima para abaixo do solo.

A grande amplitude dos valores de ϵ encontrados e a sensibilidade destes valores às influências ambientais, o tornam um bom indicador do desempenho de materiais genéticos e ressaltam o potencial de melhora nas recomendações de práticas silviculturais sítio-específicas.

Alguns estudos apontam também a possibilidade em estimar a eficiência no uso da radiação por meio de métodos de sensoriamento remoto, utilizando imagens hiperespectrais (GAMON et al., 1997; HILKER et al., 2010), alternativa que em conjunto com estimativas de área foliar remotas podem fornecer valores espacializados de produtividade e estoque de madeira.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

Este sítio faz parte de uma rede experimental ampla que conta ao todo com 36 ensaios experimentais espalhados ao longo de um gradiente de mais de 4000 km que se estende do Uruguai ao estado do Pará, entre as latitudes 0° S e 33° S (STAPE et al., 2014). Esta iniciativa intitulada “Tolerância de *Eucalyptus* clonais aos estresses hídrico e térmico” (TECHS) é um dos programas cooperativos do Instituto de Pesquisas e estudos florestais (IPEF) e conta com a participação de 26 empresas e 10 instituições de pesquisa nacionais e internacionais.

O programa TECHS selecionou 18 materiais genéticos clonais (Tabela 1) dentre um conjunto de mais de 100 clones comerciais advindos de regiões tropicais e subtropicais. Estes clones foram escolhidos por representarem grande parte da gama de materiais genéticos utilizados atualmente para produção de madeira.

Tabela 1 – Descrição dos materiais genéticos clonais avaliados

Tipo	Código	Espécie (híbrido = mãe x pai)
Plásticos	C3	<i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i>
	K2	<i>E. saligna</i>
	A1	<i>E. urophylla</i> x <i>sp</i>
	Q8	<i>E. urophylla</i> x <i>sp</i>
Subtropicais	J1	<i>E. benthamii</i>
	F6	<i>E. benthamii</i>
	I9	<i>E. dunnii</i>
	M4	<i>E. dunnii</i>
	N5	<i>E. dunnii</i>
	O6	<i>E. grandis</i>
	L3	<i>E. urophylla</i> x <i>E. globulus</i>
Tropicais	D4	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
	H8	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
	E5	<i>E. urophylla</i>
	G7	<i>E. urophylla</i>
	R9	<i>E. urophylla</i>
	B2	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>
	P7	<i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i>

O conhecimento *a priori* sobre o comportamento dos clones permitiu agrupá-los em quatro grandes grupos: tropicais de áreas mais secas, tropicais de áreas mais úmidas, subtropicais e clones intermediários ou plásticos. Os 36 sítios experimentais foram então divididos de acordo com suas características climáticas e os clones espalhados como descrito por Stape et al. (2014). Entretanto, em apenas dois ensaios os 18 dezoito clones foram instalados, sendo o alvo deste estudo, um destes dois ensaios.

O clima da região é classificado como Cfa, segundo a classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2013b), o que indica um clima subtropical úmido com verões quentes (temperatura média do mês mais quente maior ou igual 22 °C e temperatura média do mês mais frio entre -3 e 18 °C). A temperatura média anual é de 20,5 °C com precipitação média de 1180 mm ano⁻¹. Apesar dos menores índices pluviométricos entre os meses de Abril e Setembro, a redução da demanda atmosférica neste período não proporciona grandes períodos de deficiência hídrica (Figura 1). Estes dados baseiam-se nas normais climatológicas medidas na estação meteorológica de Itapeva-SP (SENTELHAS et al., 2001), 22 km distante do plantio.

Figura 1 – À esquerda, precipitação (barras) e temperatura média (linha contínua) mensal. À direita, extrato do balanço hídrico mensal, CAD = 290 mm (Série histórica: 1969-1989)

Em 2003 um levantamento detalhado dos solos (escala 1:20.000) classificou o solo local como Latossolo vermelho distrófico típico, horizonte A de estrutura moderada e textura argilosa, originário de rochas sedimentares (siltitos, tilitos, arenitos e folhelhos) pertencentes à formação geológica Itararé do grupo Tubarão.

Após a instalação, amostras de solo foram coletadas sistematicamente nas profundidades de 0 – 20 cm e 20 – 40 cm em 27 pontos ao longo da área

experimental de modo a descrever as características físicas e químicas do solo específicas da localização do experimento. As amostras foram homogeneizadas, secas ao ar, peneiradas em peneira de dois mm e encaminhadas ao laboratório de análises do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP.

A tabela 2 resume os valores determinados dos teores de matéria orgânica (M.O.), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), acidez potencial (H+Al), pH, soma de bases total (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação de bases (V) e alumínio (m) e das frações granulométricas, areia total, silte e argila em cada camada amostrada.

Tabela 2 – Caracterização física e química dos atributos do solo nas camadas 0 – 20 cm e 20 – 40 cm de profundidade

Prof. cm	Areia ¹ gkg ⁻¹	Silte ¹ gkg ⁻¹	Argila ¹ gkg ⁻¹	M.O. ² gdm ⁻³	pH ² CaCl ₂	P ³ mgdm ⁻³	K ⁴	Ca ⁵	Mg ⁵	Al ⁶	H+Al ⁷	SB	CTC	V	m
															— % —
0-20	291	116	593	32,0	4,0	3,8	0,8	3,6	4,6	16,9	102,0	8,9	111,0	8,4	64,3
20-40	284	109	607	24,3	4,0	2,9	0,7	1,6	2,2	14,9	92,0	4,0	96,3	4,2	76,3

Métodos: ¹Densímetro; ²Colorimetria; ³Colorimetria, extraído com resina trocadora de íons; ⁴Espectrofotômetro de emissão atômica, extraído com resina trocadora de íons; ⁵Espectrofotômetro de absorção atômica, extraído com resina trocadora de íons; ⁶Colorimetria, extraído com cloreto de potássio; ⁷Extraído com solução tampão SMP (IAC, 2001).

A localização intermediária entre as condições tropical e subtropical (menos de 100 km do trópico de capricórnio), as características climáticas favoráveis (temperaturas amenas e boa distribuição hídrica), o solo profundo e de boas características físico-químicas (profundidade efetiva > 2 m, ausência de camadas de impedimento, elevado teor de argila e CTC), além do bom histórico de produtividade da região (ALVARES, 2011), levaram à escolha desta área para instalação dos 18 clones, onde os mesmos poderiam expressar o seu potencial produtivo.

O experimento localiza-se na Fazenda Santa Maria II (23° 51' 10,8" S; 48° 42' 3,6" O) propriedade da companhia Duratex S.A. no município de Buri-SP (Figura 2). O plantio foi realizado no dia 31/12/2011 em área cultivada com essências florestais por mais de 20 anos. Anteriormente ao experimento, o talhão encontrava-se em sua segunda rotação sob o cultivo de eucalipto, atingindo uma produtividade de 42 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. O corte raso ocorreu em meados de Outubro de 2011, sendo o talhão conduzido à reforma entre os meses de Dezembro/2011 e Janeiro/2012.

A - 20/11/2011

B - 18/11/2012

C - 29/08/2014

Figura 2 – Localização e croqui da área experimental. Os códigos em destaque se referem aos materiais genéticos das parcelas estudadas. Abaixo, imagens aéreas em três momentos distintos: pré-plantio (A), aos 11 (B) e aos 32 (C) meses de idade. Fonte: Google Eearth®

Anterior à implantação realizou-se aplicação em área total de herbicida (i.a. glyphosate) e a área foi mantida livre de matocompetição através de capina química manual ou mecanizada, iniciando aos três meses de idade e conduzida em intervalos de aproximadamente seis meses até o fechamento de copas. A área também foi mantida livre de formigas cortadeiras através da aplicação de isca formicida a base de sulfluramida (0,3%).

O solo foi preparado por meio de subsolagem, realizada nas entrelinhas da rotação anterior a uma profundidade de 45 cm. Foram aplicados 2500 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico em área total e fertilizações foram conduzidas no momento do plantio (base), aos três e doze meses de idade (coberturas), sendo aplicados 400 kg ha⁻¹ de NPK 06:30:06 (0,5%Cu e 0,5%Zn), 200 kg ha⁻¹ de NPK 13:00:15 (0,5%B, 0,8%Zn e 14%S) e 260 kg ha⁻¹ de NPK 11:00:24 (0,5%B e 6%S), respectivamente.

3.2 Monitoramento meteorológico

3.2.1 Origem das informações e variáveis meteorológicas

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, www.inmet.gov.br) possui uma base de mais de 500 estações meteorológicas automáticas espalhadas por todo Brasil, 31 somente no estado de São Paulo. Como a área de estudo não possui estação própria, foram levantadas as estações meteorológicas do INMET em um raio menor que 100 km do experimento. Nesta etapa, três estações foram pré-selecionadas, estando elas localizadas em Avaré-SP, Itapeva-SP e São Miguel Arcanjo-SP. Estas foram então ranqueadas de acordo com os seguintes critérios: maior proximidade, menor diferença de altitude e mesma classificação climática de Köppen (MATTOS, 2012).

A estação de Itapeva-SP foi escolhida por melhor atender aos critérios estabelecidos, estando a 22 km lineares de distância, sob a mesma classificação Köppen e diferença de altitude de apenas 20 m em relação à área de estudo. O INMET disponibiliza por 90 dias dados horários de temperatura e umidade relativa do ar (instantânea, máxima e mínima), precipitação, radiação solar global, direção e velocidade do vento e pressão atmosférica. Detalhes sobre sensores, métodos de coleta, armazenamento e disponibilização das informações podem ser verificados em INMET (2011).

Bimensalmente, os dados horários das variáveis acima citadas foram baixados, consistidos e armazenados (MATTOS, 2012). A estação de São Miguel Arcanjo-SP também foi monitorada por segurança em caso de falhas nos sensores da estação de Itapeva, porém durante todo o período monitorado apenas 3,7% das informações foram preenchidas com dados da estação de São Miguel Arcanjo-SP.

Dentre as variáveis coletadas, a precipitação é a que apresenta maiores problemas em ser representada corretamente devido a sua elevada variabilidade espacial. Por isso, a partir de 01/07/2012 instalou-se um pluviômetro cilíndrico (área de captação de 400 cm²) em área descampada distante 300 metros do experimento, sendo registradas informações na escala diária.

3.2.2 Processamento das variáveis meteorológicas

Uma das principais variáveis de interesse deste estudo é a quantificação da radiação fotossinteticamente ativa (RFA ou PAR) que compreende o espectro da radiação solar entre os comprimentos de onda 400 e 700 nm.

Como usualmente dados medidos de PAR não estão disponíveis, muitos estudos adotam uma simples conversão:

$$PAR = f R_g \quad (3)$$

Em que: R_g = a radiação solar global e f , um fator de conversão.

Pode-se dizer que o fator de conversão f é dependente de dois componentes: (i) a proporção da radiação global que incide na banda PAR e (ii) a eficiência quântica desta banda (GONZÁLES; CALBÓ, 2002). Valores publicados para f geralmente oscilam entre 0,45 a 0,55, sendo 0,5 o valor rotineiramente adotado.

A energia de um fóton é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda, na forma da relação:

$$E = \frac{h c}{\lambda} \quad (4)$$

Em que: E = energia de um fóton em J, h = constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J.s), c = velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m s⁻¹) e λ = comprimento de onda em m.

Uma vez que a estação meteorológica realiza suas medidas em kJ m² h⁻¹, percebe-se através da equação 4, que é necessário integrar os valores entre a faixa de comprimentos de onda desejada para se obter um valor de E . Entretanto, devido às interações da radiação com os componentes da atmosfera, a proporção de cada comprimento de onda nesta faixa é variável (HILDEO, 1994).

McCree (1972) quantificou a eficiência quântica da banda PAR em condições distintas, fornecendo valores iguais a 4,57 $\mu\text{E J}^{-1}$ quando as frações direta e difusa estão presentes e 4,24 $\mu\text{E J}^{-1}$ quando a maior parte da radiação incidente ocorre de maneira difusa. Estes valores foram utilizados para converter as medidas de densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (DFFF) expressa em $\mu\text{mols m}^{-2} \text{s}^{-1}$ coletadas pelo ceptômetro AccuPAR LP-80 (Decagon devices, Inc., Pullman, EUA) na área do experimento. Uma descrição completa do equipamento é encontrada na seção 3.5.2.

Assim, as medidas pareadas de R_g (estação meteorológica) e DFFF (*in situ*) foram confrontadas para fornecer o fator de conversão utilizado para os posteriores cálculos:

$$PAR = 0,4342965 R_g, R^2 = 0,98 (n = 39) \quad (5)$$

Em que: PAR e R_g expressas em MJ m⁻² h⁻¹; R^2 = coeficiente de determinação e n = número de observações.

A PAR incidente foi então dividida em suas frações direta e difusa, baseando-se na metodologia proposta por Spitters et al. (1986), na qual a fração direta da radiação (fb) é dada pelo polinômio:

$$fb = 1,395 + \left(r \left(-14,43 + \left(r \left(48,57 + \left(r \left(-59,024 + (r 24,835) \right) \right) \right) \right) \right) \right), 0 \leq r \leq 0,8 \quad (6)$$

Em que: r = razão entre radiação solar incidente (R_g ou DFFF) e a radiação solar extraterrestre instantânea (R_o), dada pela equação 7.

$$R_o = S_c \times \cos(Z_h) \quad (7)$$

Em que: S_c = constante solar ($1367 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ou $2550 \text{ } \mu\text{mols m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e Z_h = ângulo zenital.

O ângulo zenital (Z_h) representa o ângulo que o sol faz com uma linha imaginária normal ao plano do horizonte que se entende do centro da Terra ao espaço acima do observador (zênite), quando o sol encontra-se no zênite $Z_h = 0^\circ$. Este foi calculado da seguinte maneira (CAMPBELL; NORMAN, 1998).

$$Z_h = \sin^{-1}[\sin(Lat) \sin(\delta) + \cos(Lat) \cos(\delta) \cos(0,2618)(t - t_o)] \quad (8)$$

Em que: Lat = latitude, δ = a declinação solar, t = hora do dia e t_o = horário de mínimo Z_h .

A declinação solar é então calculada por:

$$\delta = \sin^{-1}\{0,39785 \sin[4,869 + 0,0172NDA + 0,03345 \sin(6,224 + 0,0172NDA)]\} \quad (9)$$

Em que: NDA é o dia do ano (1 de Janeiro = 1, 1 de Fevereiro = 32, etc.).

O horário de mínimo Z_h é dado por:

$$t_o = 12 - \frac{(Lon - (-45^\circ))}{(1/15)} - ET \quad (10)$$

Em que: Lon = longitude, -45° é o valor do meridiano de referência para o local e ET = equação do tempo. Sendo ET expressa por:

$$ET = [-104,7 \sin(a) + 596,2 \sin(2a) + 4,3 \sin(3a) - 12,7 \sin(4a) - 429,3 \cos(a) - 2 \cos(2a) + 19,3 \cos(3a)]/3600$$

$$\text{Sendo } a = (279,575 + 0,986NDA) \frac{\pi}{180} \quad (11)$$

Desta forma foram obtidos valores horários de fb e os valores de PAR divididos em sua fração direta (12) e difusa (13):

$$PAR_{dir} = fb \times PAR \quad (12)$$

$$PAR_{dif} = PAR - PAR_{dir} \quad (13)$$

Em que: PAR_{dir} e PAR_{dif} são as frações da radiação solar fotossinteticamente ativa (PAR) direta e difusa, respectivamente.

A figura 3 ilustra o comportamento do polinômio descrito pela equação 6, sendo fb máxima = 0,9 (indicando condições de céu completamente limpo) e fb mínima = 0 (indicando um condições de céu completamente nublado).

Figura 3 – Comportamento da função utilizada para o cômputo da fração direta da radiação incidente (fb). Escala de cinza ($fb = 0$, 100% de radiação difusa (cinza); $fb = 1$, 100% de radiação direta). Isolinhas em intervalos de $fb = 0,1$

Em posse dos dados de temperatura e umidade relativa do ar, calculou-se para o período em que $R_g > 0$, o déficit de pressão de vapor (DPV) de acordo com a equação:

$$DPV = e_s - e_a \quad (14)$$

Em que: e_s e e_a são as pressões de saturação e atual de vapor (kPa).

Sendo e_s igual a:

$$e_s = 0,6108e^{\left(\frac{17,27 T}{T+237,3}\right)} \quad (15)$$

Em que: T = temperatura em °C e e = base do logaritmo natural.

A pressão atual de vapor é calculada por:

$$e_a = e_s \frac{UR}{100} \quad (16)$$

Em que: UR é a umidade relativa do ar (%).

O dados foram então compilados na escala diária, e a evapotranspiração de referência (ET_o) calculada pelo modelo de Penman-Monteith parametrizado pela FAO (ALLEN et al., 1998). Apesar de conhecidas diferenças nos padrões de resposta da condutância estomática em clones de eucalipto (MARRICHI, 2009; OTTO et al., 2014), o objetivo deste estudo não é apresentar uma estimativa precisa da evapotranspiração de cada material genético e sim estabelecer uma base para acompanhamento das flutuações do clima ao longo do estudo.

Por isso, o valor de ET_o foi utilizado para calcular o balanço hídrico sequencial do solo (ROLIM et al., 2002) na escala quinzenal. A capacidade de água disponível (CAD) foi estimada em 290 mm, em função do teor de argila determinado na camada de 0 – 40 cm de profundidade e adotando uma profundidade efetiva igual a 3 m. Para tal utilizou-se o modelo ajustado por Alvares (2011) calibrado em solos de mesma classificação e mesma formação geológica, na região de Capão Bonito-SP (Eq. 17).

$$CAD = -0,0216(x^{0,8133}) + 6,4967e^{\left(\frac{-170,5459}{x}\right)}, R^2 = 0,99, n = 19 \quad (17)$$

Em que: CAD (mm cm⁻¹), x = teor de argila (g kg⁻¹), e = base do logaritmo natural, R^2 = coeficiente de determinação e n = número de observações.

A determinação da profundidade baseou-se em escavações realizadas no experimento para determinação da biomassa de raízes grossas > 1 cm (dados não apresentados) e nos estudos recentes de Laclau et al. (2013) que apontam para a elevada capacidade do gênero *Eucalyptus* em explorar camadas profundas do solo.

3.3 Crescimento em biomassa do fuste

3.3.1 Parcelas de inventário

As parcelas de inventário contínuo consistem em parcelas retangulares com dimensão de oito linhas por quinze plantas, sendo as primeiras cinco plantas de cada linha destinadas à amostragem destrutiva. Portanto a parcela útil total possui dimensão de oito linhas por dez plantas, desta, descontou-se uma bordadura simples, restando à parcela útil as 48 plantas centrais (6 linhas X 8 plantas), totalizando aproximados 430 m², dado o espaçamento de plantio de 9 m².

Apesar de o ensaio total contar com parcelas em espaçamentos mais adensados (Figura 2), neste estudo foram avaliadas apenas as parcelas em arranjo de plantio de 3 m X 3 m, respectivas a cada um dos materiais genéticos descritos na tabela 1. Exceto pelos clones: F6, I9, M4, J1 e N5. Cujas parcelas originalmente selecionadas foram alteradas às parcelas 3 m X 1,5 m.

Um levantamento inicial aos 13 meses de idade revelou elevada taxa de mortalidade nestas parcelas (maior que 10%). Por este motivo, nestes clones, as parcelas de arranjo 3 m X 1,5 m foram desbastadas seletivamente em 50%, simulando o espaçamento originalmente proposto de 9 m² e respeitando a dimensão original de 6 linhas X 8 plantas. Além disso, foi detectado ataque por ferrugem (*Puccinia psidii* Winter) nas plantas do clone O6.

Coordenadas acuradas dos cantos das parcelas foram obtidas com utilização de GPS de precisão geodésico (modelo Trimble ProXT®), utilizando um tripé telescópico junto ao receptor (Figura 4), eliminando a influência das copas sobre o sinal e reduzindo os erros de posicionamento que ficaram em torno de 5 - 20 cm (pós-processado).

Figura 4 – À esquerda, nivelamento e fixação do aparelho ao ponto de intercessão entre parcelas. À direita, registro de coordenada

Em 25/05/2013 aos 16,8 meses de idade realizou-se o primeiro inventário dendrométrico, no qual todas as circunferências a altura do peito (CAP) foram medidas com fita métrica a 1,30 m do nível do solo, alturas totais (H) e início da copa (IC) medidas com uso do hipsômetro haglof®, além de aspectos qualitativos das árvores da parcela útil e bordaduras foram registrados. Vale ressaltar que a altura do início da copa é medida a partir de onde se inicia a massa de folhas verdes e não do ponto de inserção do primeiro galho vivo (CAMPOE, 2012; le MAIRE et al., 2012; FORRESTER, 2014).

O diâmetro a altura do peito (DAP) foi então calculado assumindo que a seção transversal do fuste possui área circular:

$$DAP = CAP/\pi \quad (18)$$

Em que: DAP e CAP (cm)

Estes inventários são conduzidos em intervalos semestrais durante os meses de Março/Abril e Setembro/Outubro em todos os ensaios do TECHS e neste trabalho foram considerados os inventários realizados na área aos 16,8 (25/05/2013), 21,5 (17/10/2013), 26,6 (22/03/2014) e 32,1 meses de idade (06/09/2014).

3.3.2 Monitoramento quinzenal

Com base nas informações levantadas em 25/05/2013, oito árvores por clone foram selecionadas para ter seu crescimento acompanhado em intervalos quinzenais, totalizando 144 árvores mensuradas a cada intervalo.

As árvores foram selecionadas de modo a abranger toda amplitude de tamanho, dadas as diferenças no ritmo de crescimento entre árvores pequenas e grandes de uma população (BINKLEY et al., 2006; CAMPOE, 2012).

O critério baseou-se na distribuição de frequências de DAP dos clones e duas árvores foram escolhidas em cada uma das quatro classes de tamanho, estabelecidas da seguinte maneira: valor mínimo ao primeiro quartil, primeiro quartil à mediana, mediana ao terceiro quartil e terceiro quartil ao valor máximo, evitando árvores dominadas, defeituosas, quebradas, valores discrepantes, etc. (Tabela 3).

Tabela 3 – Estatísticas descritivas (Mín = mínimo, Méd = média, Máx = máximo e s = desvio padrão) das árvores selecionadas e parcelas de inventário em 25/05/2013

Clone	DAP (cm)							
	8 árvores (Monitoramento)				48 árvores (Inventário)			
	<i>Mín</i>	<i>Méd</i>	<i>Máx</i>	<i>s</i>	<i>Mín</i>	<i>Méd</i>	<i>Máx</i>	<i>s</i>
A1	7,8	9,5	10,7	1,0	4,5	9,4	12,1	1,3
B2	7,7	9,3	10,3	1,0	7,0	9,6	11,3	0,9
C3	7,4	8,8	9,6	0,7	7,3	8,8	9,7	0,6
D4	7,6	8,8	9,9	0,8	4,9	8,7	10,0	1,1
E5	7,4	9,0	10,0	0,9	7,1	9,2	10,3	0,7
F6	4,8	7,2	9,3	1,4	3,6	7,4	9,5	1,3
G7	5,7	7,5	8,8	1,0	1,6	7,1	9,4	1,6
H8	7,3	8,7	10,0	1,0	5,8	8,2	10,7	1,1
I9	5,6	7,6	9,3	1,2	4,9	7,7	9,5	1,0
K2	6,7	8,3	9,4	1,0	5,5	8,4	10,2	1,0
J1	5,4	7,3	9,1	1,4	4,0	7,1	9,1	1,2
L3	5,9	7,7	9,1	1,1	5,4	7,6	9,1	1,0
M4	4,6	6,3	8,3	1,3	4,2	6,1	8,6	1,1
N5	5,3	6,7	8,4	1,2	4,6	6,6	8,2	0,8
P7	5,6	6,8	7,6	0,7	2,6	6,8	8,5	0,9
O6	4,9	7,6	9,6	1,7	2,2	7,3	10,2	2,0
Q8	6,4	7,7	8,8	0,8	6,0	7,6	8,8	0,6
R9	5,8	7,6	9,0	1,1	4,9	7,6	9,8	1,1

3.3.3 Amostragem destrutiva da parte aérea lenhosa

Entre os meses de Abril e Maio de 2014, 93 árvores foram abatidas para determinação da biomassa dos componentes aéreos (tronco, folhas e galhos) e geração de equações de biomassa. As árvores foram selecionadas nas parcelas de todos os clones e sua escolha baseou-se na amplitude de DAP levantada no inventário de 22/03/2014 (FAO, 2012).

Cada indivíduo teve seu CAP mensurado e seguido do abate do mesmo, coletou-se a altura total. A árvore teve então seus galhos removidos, sendo o fuste dividido em cinco partes iguais até que o diâmetro chegasse a cinco cm. Dois discos foram retirados em cada seção, sendo um para determinação da umidade e um para determinação da densidade básica (DUARTE, 2006).

Todo o fuste foi pesado em campo (Figura 5) em balança com capacidade para 60 kg e precisão mínima de 10 g. Os discos de umidade tiveram seu peso verde e seco (estufa de circulação forçada a 65 °C até massa constante) determinados em laboratório usando balança de precisão igual a 0,01 g. Estes mesmos discos foram utilizados para determinação do teor de casca.

Os galhos foram removidos do fuste, separados em galhos vivos (presença de folhas verdes) e galhos mortos, pesados em campo e amostras representativas levadas a laboratório para determinação da umidade, assim como os discos.

Figura 5 – À esquerda, preparação da área de trabalho. À direita, pesagem em campo dos discos do fuste separados para determinação da umidade e densidade básica

Após análise exploratória dos dados, foram testados diferentes modelos alométricos com o auxílio da função *lm* presente no software R (R CORE TEAM, 2014) e seus coeficientes ajustados pelo método dos mínimos quadrados ordinários. A seleção do melhor modelo deu-se por meio de análise gráfica da distribuição e normalidade dos resíduos, pela verificação da magnitude dos erros de predição através do erro médio absoluto (EMA) (WILLMOTT; MATSUURA, 2005) e verificação da precisão do ajuste por meio do coeficiente de determinação ajustado (SILVA, 2014).

O ajuste escolhido (Eq. 19) foi a versão linearizada do modelo de Schumacher e Hall (1933) com intercepto específico para cada material genético:

$$\ln(B_{ij}) = 1,85336 \ln(DAP_{ij}) + 1,14136 \ln(H_{ij}) + \beta_j$$

$$R^2_{aj} = 0,98; \text{EMA} = 0,040 \text{ kg arv}^{-1}; n = 93 \quad (19)$$

Em que: $\ln$ = logaritmo natural; B_{ij} = biomassa seca do fuste i do clone j (kg arv^{-1}); DAP = diâmetro à altura do peito da árvore i do clone j (cm); H = altura total (m); β_j = coeficiente específico do clone j ; R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado e n = número de observações.

Em todos os modelos ajustados na escala logarítmica usou-se um fator de correção (FC) na transformação da escala logarítmica para a escala natural dos dados (SPRUGEL, 1983).

3.3.4 Cálculo das variáveis de crescimento

As informações coletadas ao nível de árvore foram elevadas ao nível do povoamento com base no cálculo de área das parcelas (coordenadas GPS).

Obteve-se a área basal (G) de cada parcela pela soma das áreas seccionais de cada indivíduo dentro da mesma, de acordo com a seguinte equação:

$$G_j = \frac{\pi}{4 A_j} \sum_{i=1}^n \text{DAP}_{ij}^2 \quad (20)$$

Em que: G_j = área basal da parcela j ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$); A_j = área da parcela j (m^2); DAP_{ij} = diâmetro à altura do peito (m) da árvore i na parcela j .

De maneira análoga ao cálculo de G , obteve-se a biomassa seca total (Mg ha^{-1}), aplicando o modelo de biomassa ajustado. O incremento médio anual (IMA, $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) foi calculado dividindo-se o estoque de madeira pela idade. Em posse dos valores de biomassa de cada indivíduo na parcela, também se calculou o índice de uniformidade PB50 (HAKAMADA, 2012).

A altura das plantas dominantes (H_{dom}) foi calculada como a média das quatro maiores alturas da parcela e um modelo logarítmico foi usado para prever a altura das plantas dominantes dos clones a qualquer idade.

3.3.5 Cálculo do incremento quinzenal

Para que o modelo de biomassa gerado pudesse ser aplicado aos dados quinzenais, se fez necessário estimar as alturas totais das plantas. Para tal, o conjunto de pares DAP e H levantados nos quatro inventários foram empregados juntamente com a altura das plantas dominantes na forma (adaptado de LEITE; ANDRADE, 2003):

$$H_{ijk} = \beta 0_k (DAP_{ijk}) + \beta 1_k (Hdom_{jk}) + \beta 2_k$$

$$R^2_{aj} = 0,97; EMA = 0,43 \text{ m}; n = 3228 \quad (21)$$

Em que: H_{ij} = altura total da árvore i à altura dominante na idade j do clone k (m); DAP = diâmetro à altura do peito da árvore i à idade j do clone k (cm); $Hdom$ = altura das plantas dominantes à idade j do clone k (m); $\beta 0_k, \beta 1_k, \beta 2_k$ = coeficientes específicos do clone k ; R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; EMA = erro médio absoluto e n = número de observações.

Uma vez estimadas as alturas e em posse dos dados quinzenais de DAP, calculou-se a biomassa do fuste e seu incremento em cada intervalo.

Dada a distância do experimento não foi possível manter intervalos regulares de coleta (média de 15,6 dias entre medições). Devido a estas diferenças na duração de cada intervalo, o incremento foi normalizado pelo número de dias do período e então padronizado em intervalos quinzenais.

Para cada intervalo de medição e material genético, o porte da árvore (biomassa do fuste) foi relacionado com a taxa de incremento no respectivo período, de acordo com a figura 6. Desta maneira, se consideraram as diferenças de crescimento dado o tamanho da árvore na extrapolação dos resultados. Em caso de relação não significativa, a média do período foi utilizada para todas as árvores de um clone em determinado período.

Figura 6 – Exemplo de modelos lineares utilizados para compensar as diferenças entre taxas de crescimento devido ao tamanho das árvores, em diferentes idades (painéis). A área sombreada simboliza o intervalo de confiança a 95%. Exemplo do clone O6

A partir do inventário de 25/05/2013, as regressões ajustadas foram usadas para estimar o crescimento de cada árvore na parcela, acumulando os incrementos (WNPP) até a data da última avaliação.

Como os dados dos inventários realizados em 17/10/2013, 22/03/2014 e 06/09/2014 foram independentes das estimativas de crescimento via monitoramento. Nestas três datas se confrontaram estes resultados aos calculados pelos inventários, em termos da biomassa/incremento individuais e biomassa/incremento totais.

A validação foi verificada com o auxílio de estatísticas de qualidade do ajuste como o coeficiente de correlação de Pearson, o coeficiente de concordância de Willmott (WILLMOTT et al., 2012) e o produto entre os mesmos (p_i), mesclando

precisão e exatidão em um índice (CAMARGO; SENTELHAS, 1997; ALVARES et al., 2013a). Além de verificada a magnitude dos desvios em termos das estatísticas: erro médio (EM), erro médio absoluto (EMA) e erro médio absoluto percentual (MAPE) (JANSEEN; HEUBERGER, 1995).

3.4 Desenvolvimento da copa

3.4.1 Arquitetura de copa

Nas mesmas árvores utilizadas para determinação da biomassa do fuste, foram tomadas variáveis representativas da copa. Antes do corte, tomou-se a medida dos raios de projeção da copa em quatro posições distintas, formando uma cruz (linha e entrelinha). Após o corte (além da altura total) mediu-se também a altura do início da copa, sendo a diferença entre H e IC denominada profundidade da copa (Hcopa).

Com os valores de dimensão da copa, calculou-se a área de superfície das copas assumindo um formato geométrico equivalente a um meio elipsoide, com semieixos horizontais com valor igual ao raio médio de projeção e semieixo vertical igual Hcopa.

Esta foi então dividida em três partes iguais e cada terço colocado de pé para medição ao acaso 30 ângulos de inclinação foliar (Figura 7) com auxílio de um transferidor digital. O ângulo médio de inclinação (AMI) foi determinado calculando-se a média das medidas dos terços inferior e médio, por representarem a maior parte da área foliar da copa ($\approx 80\%$) e apresentarem folhas completamente desenvolvidas.

Além da média, analisou-se a distribuição dos ângulos foliares por clone e terço da copa, e em conjunto, através da função de projeção foliar, $G(\theta)$:

$$G(\theta) = \int_0^{\pi/2} A(Z_h, \theta_l) g(\theta_l) d(\theta_l), \quad \text{sendo}$$

$$A(Z_h, \theta_l) = \cos(Z_h) \cos(\theta_l), \text{ se } Z_h + \theta_l \leq \frac{\pi}{2} \quad \text{ou}$$

$$A(Z_h, \theta_l) = \cos(Z_h) \cos(\theta_l) \left| \frac{2 \left(\arccos \left(-\cot(Z_h) / \tan(\theta_l) \right) - \tan \left(\arccos \left(-\cot(Z_h) / \tan(\theta_l) \right) \right) \right)}{\pi} - 1 \right|, \quad \text{se } Z_h + \theta_l > \frac{\pi}{2} \quad (22)$$

Em que: Z_h é o ângulo zenital; θ_l é o ângulo de inclinação foliar, ambos em radianos. $g(\theta_l)$ é a função de distribuição de ângulos foliares.

Os dados de ângulos foliares também foram utilizados para o cálculo de parâmetros necessários à estimativa do índice de área foliar e ajustados para as funções de distribuição teóricas: Beta de dois parâmetros, esférica, elipsoidal, planófila, erectófila, plagiófila, extremófila e uniforme, por meio da função *fitall distributions* do pacote *Leaf Angle* (R CORE TEAM, 2014). O critério de informação de Akaike (AIC) foi usado para distinguir o melhor ajuste.

Figura 7 – À esquerda, medição dos ângulos de inclinação foliar no terço superior da copa de um dos clones. À direita, exemplificação de folhas com ângulos mais horizontais (quadro superior) e mais verticais (quadro inferior)

3.4.2 Determinação da área foliar específica

Aproximadamente aos 6, 14 e 28 meses de idade, 20 folhas maduras (entre o terceiro e quinto par de folhas) por clone foram coletadas no terço médio de quatro árvores na parcela, sendo elas duas de tamanho médio e duas dominantes, a fim de se determinar a área foliar específica (AFE, $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$), que consiste na razão entre a área de superfície (apenas um lado) e massa seca das folhas (NOUVELLON et al., 2010).

Após coletadas, as folhas foram imediatamente transferidas para um recipiente térmico no campo e posteriormente levadas ao laboratório, onde foram mantidas em geladeira até que sua área fosse determinada usando o LI-3100C Area Meter (Li-Cor, Inc., Lincoln, EUA) nas dependências do laboratório de estudos de plantas sob estresse e neurofisiologia vegetal da ESALQ/USP. Uma vez determinada a área, as amostras seguiram à estufa de circulação forçada a 65 °C por cerca de cinco dias para então terem sua massa seca determinada.

Aos 14 meses, com auxílio de um micrômetro, mediu-se também a espessura do limbo foliar (mm) e aos 28 meses a amostragem ocorreu concomitantemente à amostragem destrutiva da parte aérea e não só o terço médio foi coletado como também o terço inferior e superior da copa. Neste caso, 15 folhas foram coletadas por terço em cada uma das árvores abatidas.

3.5 Métodos de determinação do índice de área foliar

3.5.1 Método destrutivo

Em 12 dos 18 clones estudados procedeu-se à determinação destrutiva da biomassa seca das folhas, para isso todas as folhas de cada um dos terços da copa foram arrancadas e dispostas sob uma lona (Figura 5). O montante em cada terço foi pesado em campo e amostras representativas tomadas para determinação da umidade, de maneira análoga ao realizado com discos e galhos.

Em posse da AFE de cada terço e dos valores de biomassa seca, foi possível obter a área foliar total de cada planta (AF , $\text{m}^2 \text{arv}^{-1}$) e o modelo alométrico descrito na tabela 4, adaptado de Gower et al. (1999), usado para determinação da área foliar de todas as plantas na parcela.

Dividindo-se o somatório da área foliar total de cada árvore pela área da parcela se obteve o índice de área foliar (L).

Tabela 4 – Ajustes do modelo $\ln(AF) = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + \beta_2 \ln(H)$, com $n = 6$. Em que AF é a área foliar total ($\text{m}^2 \text{ arv}^{-1}$); DAP é o diâmetro à altura do peito (cm); β_0 , β_1 e β_2 são os parâmetros estimados; R^2_{aj} é o coeficiente de determinação ajustado; FC é o fator de correção na transformação da escala logarítmica e EMA, o erro médio absoluto

Clone	β_0	β_1	β_2	R^2_{aj}	valor p	FC	EMA $\text{m}^2 \text{ arv}^{-1}$
A1	-2,1107	2,2757		0,99	< 0,001	1,0005	0,93
B2	-0,6244	1,7341		0,95	< 0,001	1,0013	2,43
C3	0,1006	1,3472		0,96	<0,001	1,0005	0,94
D4	-2,0804	2,3221		0,91	<0,01	1,0040	4,01
E5	-1,6571	2,0430		0,92	<0,01	1,0021	2,14
K2	-2,3259	2,3911		0,97	<0,001	1,0027	2,05
J1	-0,8459	1,6921		0,84	<0,01	1,0090	3,17
L3	-1,9940	2,2470		0,85	< 0,01	1,0083	2,45
N5	1,7001	0,9766		0,81	< 0,01	1,0021	3,81
P7	-0,9739	2,1490		0,84	< 0,01	1,0087	6,01
O6	-1,6882	2,1765		0,97	< 0,001	1,0092	4,10
Q8	-12,1873	-0,7606	6,6181	0,87	< 0,05	1,0018	2,33

3.5.2 Ceptômetro AccuPAR LP-80

O AccuPAR LP-80 consiste em uma sonda com 80 sensores quânticos de radiação PAR (400 a 700 nm) espaçados em intervalos de um cm, acoplada a uma caixa de controle.

Em cada parcela se registrou a radiação abaixo do dossel (PAR_b) em seis pontos formando uma diagonal ao longo da parcela útil, sendo três na linha e três na entrelinha de plantio. Em cada ponto foram tomadas quatro medidas (direções perpendiculares), nivelando o aparelho a um metro acima do solo, num total de 24 valores de radiação coletados por parcela (Figura 9).

Todas as leituras foram realizadas entre as 10:00 e 14:00 h, coletando a radiação acima do dossel (PAR_a) em intervalos não maiores que 15 minutos, nas estradas e clareiras distantes 50 a 200 m da área experimental. Em algumas oportunidades, foi possível utilizar dois aparelhos intercalibrados, em que um foi deixado em área descampada registrando os valores de PAR_a a cada minuto.

A equação utilizada pelo ceptômetro para derivar o índice de área foliar efetivo ($Le_{(LP-80)}$, eq. 23) é uma simplificação do modelo proposto por Norman e Jarvis (1975) e computa os efeitos da condição do céu no momento da aquisição dos dados, efeitos da arquitetura do dossel da cultura de interesse e propriedades ópticas das folhas, além dos efeitos da época do ano e hora do dia (Z_h), porém assume que a folhagem é distribuída aleatoriamente no dossel.

$$Le_{(LP-80)} = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K_c}\right)f_b - 1\right]\overline{\ln(\tau)}}{A(1 - 0,47f_b)} \quad (23)$$

Em que: K_c = coeficiente de extinção de luz (Campbell, 1986); f_b = fração da radiação PAR que incide na forma direta; $\overline{\ln(\tau)}$ = média dos logaritmos da fração PAR observada abaixo do dossel pela PAR observada acima do dossel; A é absorvância da copa na banda PAR, assumida em 0,86 (padrão do aparelho).

$$K_c = \frac{\sqrt{\chi^2 + \tan(Z_h)^2}}{\chi + 1,744(\chi + 1,182)^{-0,733}} \quad (24)$$

Em que: Z_h = ângulo zenital em radianos, χ = parâmetro relativo à distribuição dos ângulos de inclinação foliar.

O parâmetro χ é a razão entre o comprimento do semi-eixo horizontal em relação ao comprimento do semi-eixo vertical de um elipsoide formado pela distribuição de ângulos foliares e sua relação com o AMI é dada pela equação 25 (WANG et al., 2007).

$$\chi = -3 + \left(\frac{AMI}{9,65}\right)^{-0,6061} \quad (25)$$

Em que: AMI = ângulo médio de inclinação foliar em radianos.

A Figura 8 demonstra o comportamento das funções de χ e K_c .

Figura 8 – À esquerda, comportamento da função de K_c em função de diferentes AMI. À direita, dependência do parâmetro χ ao valor de AMI, quanto maiores os valores de χ mais horizontal é o padrão da copa e vice-versa

As coletas tiveram início em Junho de 2013, aos 18 meses de idade e procederam até os 32 meses de idade, em intervalos de aproximadamente dois meses, sempre se certificando de condição homogênea de iluminação (céu uniformemente aberto ou nublado) durante toda a amostragem, totalizando nove coletas.

3.5.3 LAI-2000 Plant canopy analyzer

O LAI-2000 Plant canopy analyzer (Li-COR, Inc., Lincoln, EUA) é composto por uma unidade de controle, responsável pelas configurações, armazenamento e pré-processamento das informações coletadas pelo sensor óptico, que usa de uma lente “olho de peixe” para registrar a radiação ($\lambda < 490$ nm) incidente em cinco anéis concêntricos, cada um responsável por uma faixa de ângulos zenitais, centradas em 7°, 23°, 38°, 53° e 68°.

Diferentemente do LP-80, o LAI-2000 deve ser usado preferencialmente sob condições de luz difusa, apesar de novas metodologias possibilitarem a correção de erros oriundos da presença de luz direta incidindo sobre o sensor (KOBAYASHI et al., 2013). Portanto, neste estudo as coletas ocorreram entre o nascer do sol e as 8:00 ou ao fim do dia, entre 16:00 e 17:30, sob condições de luz totalmente difusa,

estendendo-se dos 17 aos 32 meses de idade em intervalos quinzenais a mensais, em um total de 19 coletas.

Nas coletas, utilizou-se o método de dois sensores, no qual os equipamentos eram intercalibrados e um sensor posicionado para capturar a radiação incidente acima do dossel em intervalos de 15 segundos. O outro era levado para dentro do experimento, onde (sempre voltado de costas para o sol e obedecendo a orientação do sensor externo) 20 pontos foram coletados por parcela em um transecto perpendicular às linhas de plantio (Figura 9), posicionando o aparelho nivelado no sentido das linhas (mas nunca em frente a um fuste) a um metro do solo. A capa de abertura de 10° foi utilizada para obstruir o operador do campo de visão do aparelho, evitar a influência das proximidades e separar as medidas sob cobertura vegetal e sem cobertura vegetal (entrelinha).

O método utilizado pelo LAI-2000 para derivar o índice de área foliar efetivo ($Le_{(LAI-2000)}$, eq. 26) também se baseia na pressuposição de distribuição aleatória da folhagem, assume que a folhagem é completamente negra e que os elementos da folhagem são pequenos comparados ao campo de visão de cada anel.

$$Le_{(LAI-2000)} = 2 \int_0^{\pi/2} \overline{\ln(\tau(\theta))} \cos(\theta) \sin(\theta) d(\theta) \quad (26)$$

Em que: $\overline{\ln(\tau(\theta))}$ = média da razão dos logaritmos da radiação observada abaixo do dossel pela radiação observada acima do dossel em um determinado ângulo de visada; θ = ângulo de visada (zenital) de cada um dos anéis do aparelho.

Diferente do LP-80, que requer parâmetros conhecidos *a priori* relativos à copa, o LAI-2000 usa de modelos de inversão para obter informações sobre a arquitetura da copa como o ângulo médio de inclinação, aqui chamado de MTA. Além destas variáveis, computou-se também τ para cada um dos ângulos zenitais e valores médios para a parcela.

Para o processamento das informações foi usado o software auxiliar FV2200 fornecido pelo fabricante do equipamento. Em todas as análises, o quinto anel foi removido devido a sua amplitude de leitura capturar influências adjacentes à parcela de interesse.

Figura 9 - Representação esquemática da amostragem realizada com o AccuPAR LP-80 das leituras abaixo do dossel. Em cada ponto (cruz branca), quatro leituras foram registradas perpendicularmente umas às outras (a). Coleta manual de leitura externa (acima do dossel) com o AccuPAR LP-80 (b). Registro automático de leituras externas realizadas pelo LAI-2000 Plant Canopy Analyzer em intervalos de 15 segundos (c). Representação esquemática da amostragem das leituras abaixo do dossel (círculos pretos) realizadas com o LAI-2000 (d). Nas figuras “a” e “d” os círculos acinzentados representam as árvores da parcela e a linha sólida preta denota a delimitação da parcela útil

3.5.4 Coeficiente de extinção de luz

Além dos modelos físicos utilizados para determinação do coeficiente de extinção de luz (NILSON, 1971; CAMPBELL, 1986), este também pode ser determinado diretamente, quando se possuem as medidas da transmitância do dossel (τ) e o índice de área foliar (Eq. 27).

$$K = - \frac{\ln(\tau)}{L} \quad (27)$$

Em que: $\ln(\tau)$ é o logaritmo natural da razão entre a radiação PAR incidente e a radiação PAR registrada abaixo do dossel e L é o índice de área foliar determinado pelo método destrutivo ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$).

Mais adiante, serão discutidos assuntos intrínsecos ao cálculo de K e sua devida interpretação, mas é necessário ressaltar que desta maneira, os efeitos do agrupamento da folhagem, ângulo zenital, condições do céu e interceptação por tecidos lenhosos, estão embutidos no valor de K (ZHANG et al., 2014).

O LAI-2000 apresenta a facilidade de coletar de uma só vez, τ em diversos ângulos zenitais. Para entender a influência do ângulo de incidência da radiação sobre o dossel no coeficiente de extinção de luz ($K(\theta)$), foram usados os valores de L_e e τ_θ obtidos com as leituras do LAI-2000 de maneira análoga à anterior (Eq. 28), ajustando o coeficiente $K(\theta)$ por meio da função *nls* (R CORE TEAM, 2014).

$$\tau_\theta = e^{(-K(\theta)L_e(LAI-2000))} \quad (28)$$

Em que: τ_θ é a razão entre a radiação PAR incidente e a radiação PAR registrada abaixo do dossel na faixa de ângulo zenital centrada em θ e $L_e(LAI-2000)$ é o índice de área foliar efetivo determinado pelo LAI-2000 ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$).

3.5.5 Comparação entre os métodos

Por seis ocasiões foi possível parear a estimativa de L_e dos dois aparelhos, nas datas de 28/09/2013 (21 meses de idade), 08/02/2014 (25 meses), 17/05/2014 (29 meses), 25/07/2014 (31 meses) e entre os dias 7 e 9 de setembro de 2014 (aos 32 meses de idade).

Nesta última data, foi possível comparar os valores obtidos pelo LAI-2000 no dia 08/09/2014 contra os valores obtidos pelo LP-80 em condições de céu nublado (07/09/2014) e céu limpo (09/09/2014). Exceto pelos dias 17/05/2014 e 07/09/2014, todas as coletas com o LP-80 ocorreram em condições de céu sem nebulosidade.

Um teste T pareado foi realizado para verificar as diferenças entre os métodos e o coeficiente de correlação de Pearson (r) usado para indicar a força da relação entre os dois métodos de estimativa.

Para os 12 clones que tiveram sua área foliar determinada pelo método destrutivo, os valores de L_e obtidos pelos aparelhos em 17/05/2014 (data mais próxima à amostragem destrutiva) foram comparados aos valores de índice de área foliar (L) para determinação do fator de agrupamento da folhagem (Ω).

$$\Omega = \frac{L_e (LAI-2000)}{L} \quad (29)$$

Em que: $L_e (LAI-2000)$ é o índice de área foliar efetivo determinado pelo LAI-2000 ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) e L é o índice de área foliar determinado pelo método destrutivo ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$).

3.6 Determinação da fração da radiação interceptada pelo dossel

Os componentes difuso e direto da radiação foram tratados de maneira distinta no computo da PAR interceptada pelo dossel (IPAR, Eq. 30), de modo que:

$$IPAR = PAR_{dir}(1 - \tau_{dir}) + PAR_{dif}(1 - \tau_{dif}) \quad (30)$$

Em que: PAR_{dir} e PAR_{dif} são as frações direta e difusa da PAR incidente; τ_{dir} e τ_{dif} são as razões entre a PAR incidente pela PAR abaixo do dossel, para os componentes direto e difuso.

Os valores de τ_{dir} e τ_{dif} foram obtidos através de uma suavização ajustada em função do tempo e medidas dos aparelhos, com o auxílio das funções *loess* e *predict* (R CORE TEAM, 2014). $IPAR$ foi calculada na escala diária e então integrada em escalas maiores de tempo.

Como os aparelhos em questão (LP-80 e LAI-2000) trabalham em situações diferentes de iluminação, os valores de τ_{dir} foram obtidos dos valores amostrados com o LP-80 em dias de céu limpo, já os valores de τ_{dif} foram extraídos das medições realizadas com o LAI-2000.

3.7 Eficiência do uso da luz

É importante ressaltar que neste estudo, a eficiência do uso da luz, simbolizada pela letra ε será sempre tratada em termos da produção de madeira, especificamente do fuste e é expressa por:

$$\varepsilon = \frac{WNPP}{IPAR} \quad (31)$$

Em que: ε é a eficiência de uso da luz para produção de madeira (g MJ^{-1}); $WNPP$ é o incremento em madeira (g m^{-2}) e $IPAR$ é a fração da radiação PAR interceptada pelo dossel (MJ m^{-2}).

Esta variável foi inicialmente calculada na escala quinzenal, obedecendo à frequência de medições, mas também foi integrada nas escalas mensal, sazonal e anual.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi utilizado para investigar as relações entre ε e as variáveis meteorológicas, assim como para verificar a sensibilidade destas relações em virtude da defasagem gradativa dos períodos correspondentes, dia a dia.

3.8 Análise estatística

Análises exploratórias e descritivas foram utilizadas para caracterizar as variáveis monitoradas e seu comportamento ao longo do tempo. Métodos gráficos, medidas de posição, dispersão e relativas usadas para descrever os atributos de cada um dos materiais genéticos.

Para uma caracterização mais abrangente foram aplicadas análises multivariadas tendo como alvos, variáveis dendrométicas e variáveis da copa. A análise de componentes principais (pacote *stats*) foi utilizada para descrever os materiais genéticos. Resolveram-se os problemas de escala entre variáveis, por meio do uso da matriz de correlação dos dados.

Uma análise de agrupamento (pacote *stats*) foi empregada nos dados conjugados de crescimento e copa, calculando-se a matriz de distâncias euclidianas sob os dados padronizados (pacote *vegan*) das variáveis. O método de agrupamento escolhido foi o de *Ward*, em que se busca formar grupos que minimizem a soma de quadrado dos resíduos.

As variáveis meteorológicas de maior correlação com a eficiência do uso da luz foram aplicadas em um modelo de regressão linear múltipla, adotando-se o método *stepwise* de seleção de variáveis, com o auxílio da função *stepAIC* do pacote *MASS*.

Para evitar uma super-parametrização do modelo, após análise exploratória, mantiveram-se somente as variáveis atmosféricas (DPV , PAR_{dir} e ET_o) e do balanço hídrico (PPT, reposição e deficiência hídrica). O modelo final teve incluído apenas as variáveis com significância maior que 90% (valor $p < 0,10$), sendo verificadas a normalidade e homocedasticidade dos resíduos.

Todas as análises procederam-se dentro do software livre R (R CORE TEAM, 2014). A organização e sumarização dos dados foram realizadas em planilhas eletrônicas, sendo parte do material gráfico elaborado com o auxílio do software Sigmaplot 12.0.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Crescimento em biomassa do fuste

4.1.1 Parcelas de inventário

No início das avaliações as parcelas encontravam-se com 16,8 meses de idade, todas com elevada sobrevivência (acima de 90%) e um estoque de madeira variando entre 4,1 e 12,3 Mg ha⁻¹. As plantas possuíam uma altura média entre 6,6 e 8,4 m, com DAP médio entre 6,1 e 9,6 cm (Tabela 5).

Tabela 5 – Resumo do inventário realizado em 25/05/2013. Destacando-se a área da parcela (Área), o espaçamento de plantio (Esp), a média das alturas dominantes (H_{dom}), a altura média das plantas (H), o diâmetro à altura do peito médio das plantas (DAP), a densidade de indivíduos por hectare (Dens), a área basal (G), o estoque de madeira (Estoque), o índice de uniformidade (PB50) e a sobrevivência das parcelas (Sobrev)

Clone	Área m ²	Esp	H_{dom} m	H	DAP cm	Dens arv ha ⁻¹	G m ² ha ⁻¹	Estoque Mg ha ⁻¹	PB50 %	Sobrev
A1	459,7	9,6	10,7	9,7 ± 0,8	9,4 ± 1,3	1044	7,3	12,3	39,9	100
B2	463,1	9,6	10,3	9,4 ± 0,5	9,6 ± 0,9	1037	7,6	11,9	42,5	100
C3	448,2	9,3	9,8	9,2 ± 0,4	8,8 ± 0,6	1071	6,6	10,0	44,5	100
D4	421,4	8,8	10,7	9,8 ± 0,6	8,7 ± 1,1	1115	6,7	11,6	41,9	98
E5	464,6	9,7	9,6	8,8 ± 0,5	9,2 ± 0,7	990	6,6	8,5	43,0	96
F6	455,5	9,5	9,6	8,6 ± 0,8	7,4 ± 1,3	1054	4,7	6,9	35,6	100
G7	454,3	9,5	7,8	6,9 ± 1,0	7,1 ± 1,6	968	4,0	5,1	34,5	92
H8	439,7	9,2	10,4	8,9 ± 0,8	8,2 ± 1,1	1069	5,8	10,0	37,4	98
I9	456,7	9,5	9,8	8,9 ± 0,7	7,7 ± 1,0	1051	5,0	9,6	38,7	100
K2	455,3	9,5	10,1	9,2 ± 0,5	8,4 ± 1,0	1032	5,7	8,9	40,8	98
J1	457,4	9,5	10,3	9,1 ± 0,9	7,1 ± 1,2	1049	4,3	7,0	35,9	100
L3	472,2	9,8	9,0	7,9 ± 0,7	7,6 ± 1,0	932	4,3	6,1	37,6	92
M4	456,5	9,5	7,5	6,6 ± 0,8	6,1 ± 1,1	1008	3,1	4,1	31,9	96
N5	493,5	10,3	8,5	7,7 ± 0,5	6,6 ± 0,8	973	3,4	5,1	39,2	100
P7	454,1	9,5	7,5	6,8 ± 0,6	6,8 ± 0,9	1035	3,8	5,6	40,7	98
O6	450,4	9,4	10,1	7,3 ± 2,0	7,3 ± 2,0	1044	4,6	6,2	23,0	98
Q8	460,7	9,6	9,4	8,4 ± 0,4	7,6 ± 0,6	1042	4,8	6,9	42,4	100
R9	467,2	9,7	9,2	8,0 ± 0,7	7,6 ± 1,1	920	4,3	5,6	39,4	90
Mínimo	421,4	8,8	7,5	6,6	6,1	920	3,1	4,1	23,0	90
Média	457,2	9,5	9,5	8,4	7,8	1024	5,1	7,8	38,3	97
Máximo	493,5	10,3	10,7	9,8	9,6	1115	7,6	12,3	44,5	100
CV (%)	3,1	3,1	11,1	12,1	12,6	4,9	26,3	32,8	13,1	3,4

Nota: Mínimo = valor mínimo entre os clones; Média = média entre os clones; Máximo = valor máximo entre os clones; CV = coeficiente de variação; Os valores que acompanham as variáveis H e DAP representam o desvio padrão dos dados ($n = 48$).

Podemos observar que todas as parcelas apresentavam-se muito uniformes (PB50 médio = 38,3%), porém graças a uma infestação de ferrugem (*Puccinia psidii*) constatada aos 12 meses de idade no clone O6, a variabilidade de tamanho entre as árvores da parcela foi mais acentuada implicando em uma redução do PB50% para 23%. Vale ressaltar que este é o único material genético proveniente apenas da espécie *Eucalyptus grandis*.

De acordo com Silva et al. (2013), o risco de severidade da ferrugem na região de estudo fica entre moderado a alto entre os meses de Outubro e Abril, com pico nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março. Com a evolução no crescimento das plantas, não foram observadas mais infestações da doença, porém a estrutura da floresta ficou permanentemente afetada. Contudo, este clone apresentou uma produtividade mediana (Estoque = 41,3 Mg ha⁻¹ ou 107,1 m³ ha⁻¹) aos 32,1 meses de idade (15,4 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ ou 40,0 m³ ha⁻¹ ano⁻¹).

A conversão entre as métricas de biomassa e volume foi possível dada a determinação da densidade básica (Db) dos clones que variou entre 379,2 e 479,8 kg m⁻³, sendo a média igual a 415,9 kg m⁻³ aos 28 meses de idade, não se considerando as alterações em função da idade nos valores de Db.

Apesar do desbaste ocorrido em algumas parcelas, manteve-se espaçamento e densidade de plantio, consistentes, com um coeficiente de variação de 3,1% para o primeiro e 4,9% para o segundo, em uma média de 9,5 m² planta⁻¹ e 1024 indivíduos ha⁻¹. A tabela 5 resume as informações do levantamento realizado em 25/05/2013, enquanto a figura 10 demonstra a evolução das variáveis: estoque, área basal, altura das plantas dominantes e DAP médio ao longo do tempo.

Ao final do período as plantas já se encontravam com uma altura média de 16,5 m e DAP médio igual a 13,3 cm, resultando em um estoque de madeira entre 26,6 e 60,7 Mg ha⁻¹ (62,6 e 154,2 m³ ha⁻¹) ou 9,9 e 22,7 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (23,4 e 57,7 m³ ha⁻¹ ano⁻¹). Deve-se usar de cautela ao comparar estes resultados, pois esta média está poluída pelo baixo crescimento do primeiro ano em contrapartida da aceleração do crescimento observada entre o primeiro e terceiro ano da rotação (STAPE et al., 2010).

Figura 10 – Evolução do estoque de madeira (a), da área basal (b), da média da altura das plantas dominantes (c) e do DAP médio das parcelas

4.1.2 Monitoramento quinzenal

Em média, durante o período entre os 16,8 e 32,1 meses de idade, o incremento do fuste foi de $1,38 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ quinzena}^{-1}$ ($3,29 \text{ m}^3$). Os menores valores foram registrados no final de Janeiro e início de Fevereiro (Figura 11), quando um veranico, reduziu a média para $0,79 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ quinzena}^{-1}$ ($1,88 \text{ m}^3$). No entanto assim como períodos de baixo crescimento onde o mínimo registrado foi de $0,43 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ quinzena}^{-1}$ ($1,00 \text{ m}^3$), também houve períodos onde o crescimento registrado foi de $2,57 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ quinzena}^{-1}$ ($5,59 \text{ m}^3$).

Figura 11 – Incrementos quinzenais em biomassa do fuste para os diferentes clones

A evolução da idade e o acirrar da competição provocou alterações nos padrões de crescimento entre as árvores, de modo a reduzir as diferenças entre a taxa de crescimento de árvores de pequeno e grande porte (Figura 12). Hakamada (2012) estudou as relações de dominância entre árvores de povoamentos clonais de *Eucalyptus* e verificou que a uniformidade entre as plantas aumentava até a idade de aproximadamente 24 meses seguida de um decréscimo até o final da rotação.

Figura 12 – Decaimento do coeficiente angular da relação entre biomassa e incremento em biomassa do fuste (Fig. 6) com o passar da idade

Em um povoamento seminal de *E. grandis* aos seis anos de idade, Campoe (2012) registrou que 20% das menores árvores estocavam apenas 2,1% da biomassa do lenho, enquanto as 20% maiores árvores estocavam 38%. No ensaio avaliado, observou-se que próximo ao fechamento de copas, as árvores suprimidas tiveram um arranque em altura, compensando em partes a desvantagem de tamanho, durante esta fase do desenvolvimento.

No entanto, as diferenças entre as taxas de crescimento de árvores de tamanhos distintos são significativas e devem ser levadas em consideração. A figura 13 demonstra a precisão da predição das estimativas dos incrementos quinzenais contra os valores observados nos inventários.

Figura 13 – Validação dos valores preditos pelo monitoramento em confronto com os valores observados nos inventários para as variáveis: biomassa individual do fuste (a), estoque de madeira na parcela (b), incremento em biomassa individual (c) e incremento em biomassa da parcela (d). A linha tracejada representa a linha de proporção 1:1 e a linha sólida, o ajuste linear

Observa-se uma maior dispersão nos dados de biomassa e incrementos individuais (Figura 13 – a e c) do que nos valores integrados ao nível de parcela (Figura 13 – b e d), assim como os valores de incremento em biomassa do fuste (Figura 13 – c e d) apresentaram uma maior variabilidade em relação aos valores de biomassa do fuste (Figura 13 – a e b).

Entretanto, todas as variáveis apresentaram ótima correlação com os valores observados ($r > 0,84$ e $d > 0,74$). A estatística p_i variou entre de 0,62 – 0,90, estando estes valores em uma faixa considerada de muito boa a ótima para a performance das estimativas (ALVARES et al., 2013a).

A estimativa da biomassa individual das árvores na parcela apresentou uma alta correlação com os valores observados e um erro médio absoluto de apenas 3,08 kg arv⁻¹ que implicou em uma leve superestimativa na biomassa de fuste presente nas parcelas da ordem de 7,96% em média (Tabela 6).

A maior variabilidade das estimativas de incremento individual não prejudicou as estimativas em nível de parcela, o coeficiente de correlação passou de 0,84 a 0,93, e o erro médio absoluto ficou na ordem de 1,54 Mg ha⁻¹ período⁻¹. Percentualmente, os desvios em relação à média sofreram uma alteração de 31,27 % para 14,16%, em relação às estimativas nas escalas de indivíduo e parcela.

Tabela 6 – Estatísticas de validação entre os valores preditos pelo monitoramento quinzenal e observados nos inventários. EM é erro médio (média da diferença entre os valores preditos e observados), EMA é o erro médio absoluto, MAPE é o erro médio absoluto expresso de forma percentual, r é o coeficiente de correlação de pearson, d é o coeficiente de concordância de Willmott e p_i é o produto entre r e d

Variável	Gráfico	EM	EMA	MAPE %	r	d	p_i
Biomassa (individual)	a	2,20 ¹	3,08 ¹	14,09	0,97	0,89	0,86
Biomassa (parcela)	b	2,26 ²	2,29 ²	7,96	0,99	0,91	0,90
Incremento (individual)	c	1,03 ³	2,24 ³	31,27	0,84	0,74	0,62
Incremento (parcela)	d	1,07 ⁴	1,54 ⁴	14,16	0,93	0,77	0,72

¹ EM e EMA em kg arv⁻¹; ² Mg ha⁻¹; ³ kg arv⁻¹ período⁻¹; ⁴ Mg ha⁻¹ período⁻¹

4.2 Desenvolvimento e caracterização da arquitetura de copa

4.2.1 Evolução da copa

Muitos estudos em florestas plantadas reportam a dinâmica da copa em termos da evolução do índice de área foliar. Neto (2007) registrou os maiores valores de índice de área foliar aos dois anos, seguido de um declínio até o oitavo ano, porém esta sequência foi construída com parcelas de idades diferentes. Em estudo sobre a dinâmica de florestas mistas de acácia e eucalipto, le MAIRE et al. (2012) acompanharam a evolução do índice de área foliar e também registraram uma tendência de declínio nos povoamentos homogêneos de eucalipto após o terceiro ano de idade.

Esta redução se dá por dois tipos de competição: (i) por luz e (ii) por limitações hídricas. Após o estabelecimento das mudas no campo, as copas apresentam-se em franco crescimento e expansão (GONÇALVES et al. 2002), o que ocorre notadamente após o sexto mês de plantio. A expansão do dossel se dá de forma acentuada, alcançando seu ápice geralmente em torno dos dois anos de idade, nesta fase há um ponto onde a planta começa a descartar as folhas da base da copa devido ao excesso de sombreamento, iniciando a ciclagem de nutrientes.

Após o completo desenvolvimento da copa, verifica-se um padrão sazonal de flutuação do índice de área foliar (le MAIRE et al., 2011, CRISTIANO et al., 2014), oscilando entre seus valores máximos e mínimos de acordo com as flutuações do clima, notadamente devido à redução da frequência de chuvas e estiagem do período entre Abril (valor máximo) e Outubro (valor mínimo) em grande parte do Brasil (ALVARES et al., 2013c). No entanto em regiões mais úmidas de elevadas latitudes, a oscilação natural do fotoperíodo, pode limitar o recurso luz às folhas, principalmente às localizadas internamente e na base da copa, gerando uma redução da área foliar (MÄKELÄ; VANNINEN, 1998) mesmo sob condições adequadas de fornecimento de água.

A figura 13 representa a evolução da profundidade da copa ao longo dos inventários. Aos 16,8 meses de idade a copa ocupava cerca de 94% da altura total dos indivíduos, aproximadamente após os 21 meses de idade observou-se uma intensificação do processo de descarte das folhas da base da copa quando a altura média de início da copa entre os clones era de apenas 1,68 m.

Figura 13 – Evolução da altura média das plantas (H, linha preta) e da altura média do início da copa (IC, linha cinza) para os diferentes clones (painéis). As barras verticais representam o desvio padrão dos dados ($n = 48$) e a área sombreada simboliza a altura da copa (H_{copa})

Apesar do aumento gradativo da altura do início da copa, o crescimento em altura total das plantas manteve a profundidade da copa relativamente constante ao longo do tempo para todos os clones. Aos 16,8 meses de idade, H_{copa} era em média de 7,86 m, de 9,43 m aos 21,5 meses, de 8,40 m aos 26,6 meses e de 7,71 m aos 32,1 meses de idade, lembrando que estes são os valores médios entre os clones.

Próximo à idade de máxima profundidade da copa observou-se o pico dos valores de índice de área foliar efetivo registrado pelo LAI-2000 ($L_e (LAI-2000)$). Na figura 14, as linhas tracejadas realçam o valor máximo registrado, que na maioria dos clones ficou entre os 23 e 27 meses de idade.

Figura 14 – Dinâmica do índice de área foliar efetivo registrado pelo LAI-2000 para cada clone (painéis) em função da idade. As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 20$). A linha sólida representa a suavização ajustada com intervalo de confiança de 95% (área sombreada). As linhas tracejadas verticais denotam a idade na qual se registrou o valor máximo para cada clone.

Entre todos os clones, a média de idade na qual se registrou o valor máximo de L_e ($LAI-2000$) foi de 24,85 meses, evidenciando o processo de fechamento do dossel à esta idade através da estabilização dos erros de amostragem (Figura 15). L_e ($LAI-2000$) variou entre 1,63 e 2,73 para o clone de menor índice de área foliar (J1) e entre 4,05 e 5,36 para o clone de maior índice de área foliar (Q8). Dentre os valores registrados para cada material genético, cerca de 80% dos dados oscilaram em uma amplitude de uma unidade ao redor da média.

Figura 15 – Decaimento do erro padrão na média ($n = 20$) dos valores de índice de área foliar efetivo registrados pelo LAI-2000. A linha tracejada está colocada à idade média na qual se registrou o valor máximo de $L_e(LAI-2000)$ entre os clones

Adiante serão discutidas as interpretações para os valores de índice de área foliar obtidos por diferentes métodos, todavia, dadas as variações de H_{copa} e $L_e(LAI-2000)$, pode-se observar que após o pico de área foliar, apesar da camada de extinção de radiação constituída pelo dossel permanecer constante, há uma flutuação no grau de cobertura do espaço, indicando um adensamento da folhagem.

Outra característica importante do grau de cobertura do solo é a eliminação da infestação por plantas daninhas. A figura 16 caracteriza o aspecto da cobertura do solo proporcionada pelos dosséis de seis clones contrastantes.

Figura 16 – Visão geral da copa de seis diferentes clones (A1, B2, C3, E5, J1 e P3) a partir de fotografias tiradas sob o mesmo ponto aos 19, 21, 24, 27 e 31 meses de idade

O processo de interceptação da radiação solar está intimamente ligado ao índice de área foliar, neste estudo, paralelamente ao monitoramento do L_e ($LAI-2000$), avaliou-se qualitativamente o grau de infestação por daninhas e foi verificado que valores de L_e ($LAI-2000$) iguais a dois estão no limiar de controle das plantas invasoras (Figura 16; clones C3 e J1 a partir das fotos de 04/01/2014). Nesta perspectiva, um dossel que hipoteticamente possuísse este índice de área foliar, interceptaria cerca

de 75% da radiação incidente. Sugere-se que valores de L_e ($LAI-2000$) acima de 2,5 eliminem completamente a infestação por plantas invasoras, quando a radiação interceptada aumenta para cerca de 80-85%.

Outra característica importante da copa é a área foliar específica (AFE), muitos estudos reportam a redução desta variável em função da idade do povoamento (SANDS; LANDSBERG, 2002; le MAIRE et al., 2012). Entre os clones observou-se este mesmo padrão, partindo de uma AFE média de $15,5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ aos seis meses de idade para $8,8 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ aos 28 meses de idade (Figura 17).

Estes valores foram consistentes com os valores demonstrados por Nouvellon et al. (2010) em florestas de *Eucalyptus urophylla* vs *Eucalyptus grandis* entre 24 e 48 meses de idade, neste estudo evidenciou-se também que a relação entre AFE e idade pode ser melhor interpretada pela correlações negativas entre variáveis representativas do tamanho da árvore (DAP e H).

Neste sentido, a figura 17 demonstra também a relação negativa entre espessura da folha e AFE, assim a interpretação da redução da AFE em função da idade pode ser discutida em relação ao incremento da espessura foliar. Segundo Battie-Laclau et al. (2014) a longevidade de uma folha de *Eucalyptus* bem nutrida fica entre 180 e 380 dias, atingindo expansão completa com cerca de 50 dias.

As mudanças observadas na AFE, também refletem as mudanças morfológicas das folhas ao longo do período estudado. A figura 18 reflete a mudança no padrão morfológico das folhas de um clone de *Eucalyptus benthamii* aos 14 meses de idade, entre folhas no mesmo galho e em porções distintas da copa. Após esta transformação, todas as folhas adultas apresentaram o mesmo padrão.

Figura 17 – À esquerda, decréscimo da área foliar específica dos clones em função da idade. À direita, modelo ajustado entre espessura da folha e área foliar específica aos 14 meses de idade.

Figura 18 – Detalhe de um ramo do clone F6 apresentando mudanças morfológicas entre folhas mais jovens e mais velhas (a). Percepção geral da diferenciação da copa do mesmo clone aos 13 meses de idade (b)

Entre os 14 e 28 meses de idade, intervalo entre as duas últimas determinações da AFE, não foi observado um aumento na área individual média de uma folha, portanto a redução da AFE pode ser atribuída ao incremento do tamanho das plantas, em altura ($r = -0,45^{***}$) e DAP ($r = -0,51^{***}$), assim como com o incremento da espessura das folhas ao longo da idade da mesma ($r = -0,62^{***}$).

Xu et al. (2012) estudando a anatomia de folhas de *E. saligna* verificou que 80% da variabilidade nos valores de Massa foliar específica (o inverso de AFE) eram explicados pela concentração de carboidratos não estruturais nas folhas, tecido de reserva associado à estratégias de tolerância ao stress hídrico (MITCHELL et al., 2013). Conforme há uma redução do potencial hídrico em função da altura (ZIMMERMAN et al., 2004), uma estratégia adotada pelo *Eucalyptus* para suportar as pressões negativas geradas e consequente períodos de stress, é acumular carboidratos de reserva, reduzindo a AFE.

Sabe-se que AFE é parâmetro chave influenciando a capacidade fotossintética (NIINEMETS, 1999). Leuning et al. (1995) demonstraram correlação positiva entre a área foliar específica e a concentração de nitrogênio na folha, e esta por sua vez correlacionou-se positivamente com a máxima condutância estomática e máxima taxa de assimilação de CO_2 em diversas formações vegetais. Tais mudanças morfológicas nas folhas ajudam a explicar a redução do crescimento com o passar da idade (ou incremento do tamanho) das plantas (STAPE et al. 2010).

4.2.2 Amostragem destrutiva da copa

Nos clones que tiveram sua área foliar total ($\text{m}^2 \text{ árvore}^{-1}$) e ângulos de inserção foliar quantificados para cada um dos terços da copa, verificou-se a distribuição das variáveis ao longo deste gradiente. Para todos os clones, o terço superior da copa representou em média 18,5% da área foliar total da copa, enquanto os terços, médio e inferior variaram entre 36-53% e 31-47%, respectivamente.

O diâmetro à altura do peito, por si só, explicou mais de 84% da variabilidade dos dados de área foliar total, amostrados numa amplitude de tamanhos de árvores variando entre 5,2 e 16,8 cm de DAP, nas quais se obtiveram valores de área foliar individual entre 5,76 e 79,60 $\text{m}^2 \text{ árvore}^{-1}$ (0,44 e 9,41 $\text{kg}_{\text{folhas}} \text{ árvore}^{-1}$).

Exceto para o clone Q8, em que a altura total precisou ser incluída, explicando, em conjunto com o DAP, 87% da variabilidade dos dados deste material genético. Entre todos os clones, os erros de predição absolutos, não foram maiores que 6 m² árvore⁻¹ (Tabela 4).

Figura 19 – Área foliar por terço da copa (I = inferior, M = médio, S = superior), quantificada para 12 clones (painéis). As barras representam o erro padrão da média ($n = 6$). Os valores denotados em branco representam a proporção da área foliar contida em cada terço e os valores no canto direito de cada painel representam a soma da área foliar total média de cada clone

A distribuição vertical da área foliar interfere nos processos de transferência de energia entre as folhas das diferentes camadas do dossel, assim como está ligada aos processos fisiológicos e aerodinâmicos de trocas gasosas entre o dossel e a atmosfera (LEUNING et al., 1991). Estes mesmos autores, simulando a distribuição

especial dos totais diários de fotossíntese em copas de *Eucalyptus grandis*, encontraram uma variação de até 18,6% na taxa de assimilação diária de carbono, alterando as funções de distribuição de densidade de área foliar ao longo do perfil vertical do dossel no modelo utilizado.

Duursma e Mäkelä (2007), simulando modelos de interceptação de PAR por dosséis não homogêneos, testaram os efeitos do formato da copa nos totais diários de interceptação e mantendo o volume da copa constante, encontraram um aumento de 17% para copas cônicas em relação às copas elipsoidais. A variação da distribuição da área foliar ao longo do perfil da copa (Figura 19) revela que estes clones de eucaliptos permeiam por entre estes dois formatos de copa.

Entretanto não somente o formato como também a orientação da folhagem influenciam na interceptação diária da radiação solar. De Pury e Farquhar (1997) em seu modelo de extrapolação da fotossíntese das folhas para toda copa, demonstraram que as folhas mais perpendiculares à direção do feixe de luz absorviam a maior quantidade da radiação ($1830\text{-}2040 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), enquanto folhas paralelas absorviam principalmente radiação na forma difusa ($220\text{-}430 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Assim, a influência do ângulo de incidência da radiação nos processos fisiológicos das folhas é marcante. King (1997) mostrou a dependência da taxa de fotossíntese, temperatura e eficiência do uso da água, instantâneas, em função do ângulo com que a radiação acerta determinada folha e encontrou um aumento de cerca de $15 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ na taxa fotossintética para folhas bem hidratadas, quando este ângulo passou de zero para 90 graus. Ao passo que em condições de limitação hídrica a taxa de fotossíntese se manteve constante, com um ligeiro decréscimo ao longo desta amplitude de ângulos. Nestas condições, houve um aumento da temperatura foliar da ordem de 10°C e uma redução da eficiência do uso da água da ordem de 50%.

Os clones deste ensaio apresentaram ângulos de inclinação foliar médios variando entre 32 e 79 graus. A distribuição de ângulos foliares se mostrou extremamente sensível à posição no terço da copa ($p < 0,01$) com folhas aproximando-se sistematicamente de um padrão mais vertical conforme se aproxima o ápice da copa (Figura 20). Como ilustrado acima, esta pode ser entendida como uma adaptação aos baixos níveis de luminosidade que ocorrem na base da copa, em uma tentativa de maximizar a captura de luz.

Figura 20 – Função de densidade de probabilidade ajustada aos dados medidos de ângulos de inclinação foliar em cada terço da copa (escala de cinza) para os diferentes clones (painéis). As linhas tracejadas verticalmente representam a média global (terço inferior - I, médio - M e superior - S) de cada um dos clones

Em seu trabalho King (1997) também discute as implicações adaptativas consequentes de distribuições de ângulos foliares mais horizontais ou verticais, ressaltando que ângulos mais inclinados apresentam a vantagem de evitar o excesso de radiação solar ao redor do meio dia, além de apresentar uma vantagem competitiva em situações de exposição aos ângulos zenitais mais acentuados, especialmente em latitudes mais elevadas.

O ângulo de inclinação foliar também é peça chave no cálculo de parâmetros relativos à interceptação pelo dossel (Figura 8, Eq. 24 e 25), assim como no efeito sobre a atenuação da radiação interceptada ao longo do perfil do dossel (CAMPBELL, 1986; LANG, 1987).

4.3 Métodos de determinação do índice de área foliar

4.3.1 Incertezas e fontes de erro

Estimar o índice de área foliar mesmo que por métodos destrutivos, imprime uma determinada incerteza nas estimativas. Especialmente em culturas arbóreas, o trabalho envolvido na determinação destrutiva de L é laborioso e demorado. Devido a isso, em muitas vezes se faz necessário amostrar somente parte dos indivíduos e gerar equações que estimem a área foliar dos demais.

Mesmo sendo considerado o método mais preciso (JONCKHEERE et al., 2004), pode-se identificar duas fontes de incerteza neste procedimento. A primeira diz respeito à escolha de métodos de amostragem adequados para representar a variabilidade espacial intra e entre copas como demonstrado na figura 16. Segundo Whitford et al. (1995), estudando diferentes métodos para determinação do índice de área foliar em florestas de eucaliptos, seriam necessárias de 26 a 40 árvores para que se pudesse estimar a área foliar da parcela com uma acurácia de 10%.

A partir desta informação, fica evidente a inviabilidade deste método em grandes escalas, uma vez que usualmente, uma equipe de cinco pessoas no campo consegue abater de 5-8 árvores por dia, dependendo do tamanho do indivíduo, não levando em consideração o trabalho requerido pós-campo. A segunda fonte de incerteza nasce então da dificuldade em se amostrar um grande número de indivíduos e da necessidade do uso de métodos alométricos para se obter uma estimativa de L . Segundo (JONCKHEERE et al., 2004), em florestas equiâneas monoespecíficas, o abate de cinco indivíduos seria suficiente para gerar equações de qualidade satisfatória. Nossos resultados corroboram estas afirmativas, uma vez que com apenas seis árvores abatidas por clone, obtiveram-se erros da magnitude de 2% a 13%, com uma média de 6,5% na estimativa da área foliar individual.

No entanto estas equações são extremamente específicas, limitando o seu uso no escalonamento espacial e temporal das estimativas de área foliar. Grier et al. (1984) utilizando equações gerais e específicas em árvores da espécie *Pseudostuga menziesii* (Douglas-fir) encontrou erros variando de -8% a +93% na estimativa da biomassa foliar, que se traduziram em diferenças em L . Em virtude disso, o uso de métodos indiretos, especialmente os baseados na transmitância da radiação solar pelo dossel (ROSS, 1981; GOUDRIAAN, 1988) e fotografias hemisféricas (CHEN et

al., 1991; OLIVAS et al., 2013) são comumente aplicados em estudos com formações vegetais arbóreas.

Neste trabalho serão abordados os aspectos referentes ao primeiro tipo de métodos alternativos, já que não se usou de fotografias hemisféricas para tal. Para estes métodos, o primeiro passo é representar de maneira confiável o ambiente lumínico abaixo do dossel. A figura 21 ilustra a variabilidade encontrada nas parcelas dos 18 clones em nove coletas (duas em dias nublados) com o LP-80.

Figura 21 – Relação entre média e desvio padrão dos 24 valores de transmitância do dossel (τ) registrados pelo LP-80 em cada parcela avaliada em função das condições de céu. f_b é a fração da radiação solar que incide de maneira direta e tende a zero em condições de céu completamente nublado

Em dias de céu aberto (livre de nebulosidade) observa-se um incremento do desvio padrão dos dados com um aumento da média de τ da parcela, o que não é observado quando a coleta ocorre em dias nublados. Sob tais condições seriam necessárias em média apenas 10 leituras para amostrar τ com 10% de precisão a um nível de confiança de 90%, enquanto que em dias de céu aberto, seriam necessárias em média cerca de 300 leituras para estimar τ com a mesma acurácia.

A redução do esforço amostral sob condições de céu nublado se dá devido à propagação multidirecional da radiação difusa e pela redução dos níveis de radiação incidente sobre o dossel, estabilizando assim os valores de PAR registrados abaixo das copas, que variaram de 3 a $160 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\overline{CV} = 15\%$) em condições de céu nublado e entre 2 e $1960 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($\overline{CV} = 96\%$) sob condições de céu aberto.

Obviamente, mesmo tendo os cálculos apontados um valor de 300 leituras sob condições de céu aberto, foi operacionalmente inviável coletar este número de observações em cada parcela a cada leitura. Contudo, o elevado número de amostras ($n = 24$) foi suficiente para garantir estimativas de τ dentro de uma amplitude média de 9% de confiança para os clones, sendo o erro padrão da média nunca maior do que 7%.

Já para o LAI-2000, seriam precisas em média 50 leituras para se estimar L_e com uma precisão de 10% a 90% de probabilidade, durante o período antecedente ao fechamento das copas (ao redor dos 24 meses). Após isto, o número de leituras necessárias para se alcançar a mesma precisão caiu para uma média de 17 leituras entre as parcelas.

Vale ressaltar que como o valor de índice de área foliar calculado pelos aparelhos deve ser entendido na verdade como um índice de área de planta (PAI), pois os aparelhos não discriminam a radiação interceptada pelos fustes e galhos. Gower et al. (1999), resumindo uma série de trabalhos sobre o tema, encontrou contribuições de 3-34% da área lenhosa sobre PAI, porém quando observados somente os sítios mais jovens, este valor caiu para no máximo 11%. Kucharik et al. (1998) sugerem que este valor pode ser negligenciado, pois em copas densas os galhos estão geralmente cobertos pelas folhas. Para os cálculos deste estudo desconsiderou-se a influência da área lenhosa sobre PAI, mas os cuidados devidos foram tomados na amostragem para evitar a poluição por leituras em pontos sombreados pelos fustes.

4.3.2 Pressuposições dos modelos

Outro desafio dos métodos indiretos é o atendimento às pressuposições dos modelos empregados nos aparelhos para derivar o índice de área foliar (WEISS et al., 2004). Uma pressuposição adotada, diz respeito às propriedades ópticas das folhas. O LAI-2000 Plant canopy analyzer assume que a folhagem se comporta como um corpo negro (Li-COR, 2003), de fato, para o aparelho esta pressuposição já é atendida, uma vez que um filtro limita a radiação registrada para a faixa do azul ($\lambda < 490 \text{ nm}$), onde é absorbância pela folhagem é cerca de 95% (TAIZ; ZEIGER, 2010).

Já para o LP-80, que lê todo o espectro da PAR ($400 < \lambda < 700 \text{ nm}$), assume-se um valor de absorbância das folhas constante igual a 90%. Este valor é utilizado para estimar a absorbância do dossel, sendo esta, igual a 86% (DECAGON DEVICES, 2013). Estudos em *Eucalyptus* apontam que valores aproximados para o gênero se aproximam de 88% (MARSDEN et al., 2010) a 92% (le MAIRE et al., 2013), neste último estudo, realizado em florestas mistas de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*, a absorbância das folhas se mostrou espécie-específica, não sendo diferente entre árvores e tratamentos. Em análises multiespectrais em oito dos mesmos clones estudados, cultivados em vaso, obtiveram-se valores entre 80-85% (Marina Shinkai Gentil Otto e Clayton Alcarde Alvares, comunicação pessoal). Portanto, o valor usado como padrão no LP-80 não parece causar grandes prejuízos no cálculo de $L_e (LP-80)$.

Outra pressuposição é de que a distribuição de ângulos foliares é esférica. Isso implica assumir um valor constante de $\chi = 1$ ou $G(\theta) = 0,5$. O LP-80 adota $\chi = 1$ em seus cálculos padrões, mas este número pode ser ajustado em função do ângulo de inclinação médio da folhagem (Eq. 24 e 25). Entre os clones, χ variou entre 0,5 e 2,6, sendo a média igual a 1,5. Em culturas mais horizontais como o morango, $\chi = 3$, e em culturas mais verticais como gramíneas, $\chi = 0,7$ (DECAGON DEVICES, 2013).

A figura 22 mostra a amplitude dos valores de $G(\theta)$, para os valores de ângulos foliares medidos nos clones, assim como os compara com a distribuição teórica de dosséis com AMI variando entre 5 e 85 graus.

Figura 22 – Função de projeção foliar ajustada por meio da distribuição de ângulos foliares das copas (a). À direita, comportamento teórico da mesma função, para dosséis com ângulo de inclinação médio variando de 5 a 85 graus em intervalos de 10 graus (b)

Pôde-se observar que os clones estudados apresentaram uma elevada variabilidade, visto que os dosséis se comportam como se possuíssem AMI equivalentes entre 35 e 75 graus. Assim como observado por Wang et al. (2007), a distribuição Beta de dois parâmetros foi a que se melhor ajustou aos dados de ângulos foliares de cada clone, seguida da distribuição elipsoidal, sem prejuízos ao cálculo de $G(\theta)$, caso a segunda fosse assumida.

Ou seja, a função elipsoidal descrita apenas pelo parâmetro χ , foi suficiente para representar a distribuição de ângulos foliares dos clones com precisão satisfatória. O LP-80 adota esta função quando o valor de χ é diferente de 1, enquanto o LAI-2000 inverte os valores de transmitância medidos em cada um de seus anéis para derivar o valor de $G(\theta)$ e assim estimar um ângulo médio de inclinação (MTA) a partir de um polinômio determinado por Lang (1986).

Todavia, a figura 23 revela que as estimativas de MTA geradas pelo LAI-2000 não apresentaram correlação significativa ($r = 0,02$) contra o verdadeiro ângulo médio de inclinação foliar (AMI) efetivamente medido nas copas dos clones.

Figura 23 – Comparação entre os valores de ângulo foliar médio estimados pelo LAI-2000 (MTA) e valores reais medidos nos clones (AMI) em maio de 2014. As barras representam o erro padrão da média e a linha tracejada simboliza a linha de proporção 1:1, r é o coeficiente de correlação de Pearson

Esta inconformidade é explicada pela violação da principal pressuposição quando invertemos o índice de área foliar a partir de dados de transmitância da radiação solar. Tanto o método empregado pelo LP-80 quanto pelo LAI-2000 assumem que a folhagem é aleatoriamente distribuída no dossel. Na figura 24 verifica-se claramente que o arranjo espacial do plantio propicia espaços vazios no dossel que não contribuem para nenhuma interceptação de luz.

Figura 24 – Projeção da sombra das copas do clone C3 aos 24 meses de idade

A este efeito é atribuído um índice conhecido por índice de agrupamento da folhagem ou “*clumping index*” representado pela letra grega Ω (CHEN; BLACK, 1992; CHEN et al., 1997, LAW et al., 2001). Valores publicados de Ω estão entre 0,72 e 0,98 (RYU et al., 2010), sendo que quanto mais próximo de 1 mais próximo estará o dossel de atender a pressuposição de distribuição aleatória.

Neste estudo, os clones apresentaram valores de Ω variando entre 0,5 e 0,9, ou seja, para alguns clones o índice de área foliar destrutivo (L) foi 100% maior do que o índice de área foliar efetivo (L_e). Em uma tentativa de minimizar estes efeitos, Lang e Yueqin (1986) propuseram que como o índice de área foliar é proporcional ao logaritmo de τ , a média dos logaritmos das transmitâncias deveria ser utilizada ao invés da média aritmética. De fato, ambos os aparelhos adotam este procedimento em suas rotinas de cálculo. No entanto, o uso da média logarítmica aumentou o valor de L_e em média 15%, o que diluiu, mas não minimizou este efeito por completo.

Foi verificado que o grau de agrupamento da folhagem teve uma alta correlação ($r = 0,74^{**}$) com a área média de superfície da copa (Figura 25).

Figura 25 – Correlação entre a área de superfície da copa e o grau de agrupamento da folhagem (Ω). No canto superior direito, o coeficiente de correlação de Pearson (r) significativo a 1% (**)

Este resultado é consistente com os encontrados por Binkley et al. (2013b), que mostraram que a área foliar individual aumenta linearmente com o aumento da área projetada das copas, para diversas espécies (*Eucalyptus nitens*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, clones híbridos de eucalipto e *Picea abies*), assim como há uma forte relação entre área foliar individual e captura de luz. De acordo com esta afirmativa, uma maior absorção de luz é função da maior quantidade de energia que copas maiores podem capturar e que o aumento da área foliar individual se dá pela expansão das copas ao invés da acomodação de mais folhas nos mesmos galhos, adensando a copa.

Segundo Nilson (1999), a interceptação de luz esta relacionada à área de projeção da copa na direção da radiação incidente, por isso, de acordo com Duursma e Makela (2007) a área de superfície da copa seria uma boa variável estimando a interceptação de luz. Segundo estes autores, copas maiores apresentam um menor autosombreamento, aumentando a interceptação de luz por unidade de área foliar. Duursma et al. (2012), estudando uma coleção de mais de 1831 plantas digitalizadas em terceira dimensão, concluíram que o grau de agrupamento das folhas e a razão entre a área foliar por unidade de superfície da copa explicaram 85% da eficiência de absorção na radiação.

Alguns estudos dividem os efeitos do grau de agrupamento do dossel (Ω), computando o efeito do agrupamento das folhas ou acículas dentro da copa, este é denominado índice de agrupamento elementar Ω_e (CHEN; CIHLAR, 1995). Kucharik et al. (1999) propuseram uma metodologia para modelar Ω_e em dosséis heterogêneos, sugerindo que os elementos do dossel tendem a se comportar de maneira aleatória ($\Omega_e \rightarrow 1$) quando o ângulo zenital se aproxima de 90° , e de maneira mais agrupada ($\Omega_e \rightarrow 0$), sob ângulos zenitais mais próximos de 0° .

Muitos estudos assumem que Ω é constante em respeito ao ângulo zenital e estações do ano (BALDOCCHI et al., 2002; ROUJEAN, 1996). Nouvellon et al. (2000) mostrou que este parâmetro pode variar inclusive com a distribuição de ângulos foliares e Ryu et al. (2010) sugeriram que a cobertura da copa, altura e profundidade da mesma, seriam bons indicadores modelando Ω .

Este trabalho não buscou modelar este parâmetro, porém, nossos resultados sugerem que a violação da pressuposição de distribuição aleatória da folhagem no dossel pode incluir erros consideráveis na estimativa do índice de área foliar.

4.3.3 Coeficiente de extinção de luz

De maneira simplificada, muitos dos efeitos discutidos acima, são traduzidos em um único coeficiente, dito coeficiente de extinção de luz (K). Usualmente o valor médio de K adotado é igual a 0,5, variando entre 0,3 e 0,7 (RUNYON et al., 1994). Estudando uma gama maior de comunidades vegetais, Monsi e Saeki (2005) encontraram valores de K entre 0,3 e 1,5, atribuindo os valores mais baixos a copas de padrão mais verticais como gramíneas, e os valores mais altos a espécies de folhosas com padrão de copa mais horizontal.

Entre os clones deste estudo, os valores de K variaram entre 0,3 e 0,6, revelando suas diferentes estratégias de captura de luz. Neste exemplo, sob um índice de área foliar igual a quatro, diferentes clones poderiam capturar aproximadamente 70% a 90% da radiação incidente (Figura 26).

Figura 26 – Relação entre o índice de área foliar determinado de maneira destrutiva (L) e a os valores de transmitância do dossel (τ). As linhas sólidas representam as isolinhas para coeficientes de extinção de luz (Eq. 27) entre 0,3 e 0,6. As fotos denotam as diferenças entre a arquitetura de copa de clones com valores de L semelhantes: C3 e E5; P7 e D4

Vale ressaltar que devido ao comportamento exponencial da função, estes efeitos serão maiores sob índices de área foliar menores, entretanto vários estudos

apontam haver uma redução consistente do coeficiente de extinção de luz com o aumento do índice de área foliar em diversos tipos de comunidades vegetais (BINKLEY et al., 2013b; ZHANG et al., 2014). Mesmo não observando este padrão nos clones estudados, tal relação revela estratégias adaptativas das plantas quando em alta competição por luz (L elevado), pois menores valores de K permitem que uma maior quantidade de radiação se distribua ao longo do perfil de copas mais densas.

Para estudar os efeitos do ângulo zenital sobre o coeficiente de extinção de luz, utilizaram-se os dados de transmitância coletados pelo LAI-2000 simultaneamente em diferentes ângulos de visada (θ), com $K(\theta)$ aumentando de 0,47 para 0,72 quando o ângulo de visada (zenital) passou de 7° para 53° (Figura 27).

Figura 27 – Efeito do ângulo de incidência da radiação sob a transmitância do dossel (τ). As linhas sólidas representam os coeficientes de extinção de luz ajustados pela Eq. 28. para cada um dos anéis de leitura presentes no LAI-2000. Entre parênteses, os limites inferior e superior do intervalo de confiança a 95% para os valores de $K(\theta)$

Segundo Nouvellon et al. (2000), este incremento se dá por dois motivos. Em primeiro lugar, com o aumento do ângulo zenital há uma maior área de folhagem projetada na direção do ângulo de incidência da radiação, especialmente em folhas mais verticais. O outro fator é o aumento do caminho que a radiação deve percorrer ao longo do dossel quando esta atinge o mesmo em ângulos mais inclinados.

Nossos resultados corroboram esta afirmativa, pois apesar de neste exemplo ter sido ajustado somente um coeficiente por anel independente do fator clone, demonstrando que o aumento do caminho que a radiação percorre no dossel ($7^\circ \leq \theta \leq 53^\circ$, atentando ao fato de estes serem os ângulos de visada centrais dos anéis do LAI-2000), aumentou em aproximadamente 1,5 vezes o coeficiente de extinção de luz.

Não se observaram diferenças significativas entre os coeficientes para o ângulo de 7° , tendo os materiais genéticos se diferenciado conforme o aumento do ângulo de incidência da radiação (dados não mostrados). Estes resultados indicam que o ângulo de inclinação da folhagem pode ser um fator importante na determinação da quantidade de radiação interceptada, especialmente no início e fim do dia, assim como durante o período de inverno em regiões de elevadas latitudes.

4.3.4 Comparação entre os métodos

Nas figuras 28 e 29 podemos verificar as diferenças entre amostras pareadas dos aparelhos LP-80 e LAI-2000, registradas em seis oportunidades distintas ao longo do ano, em termos do índice de área foliar efetivo (L_e) e da transmitância do dossel (τ). Lembrando que com o LP-80, abre-se a oportunidade de coleta sob diferentes condições de céu, os dados aqui apresentados, foram coletados em uma amplitude de ângulos zenitais variando entre 8 e 50 graus e sob condições de céu completamente aberto (luz direta) e completamente nublado (luz difusa), obedecendo o horário de coleta estipulado (entre 10:00 – 14:00 h). Já com o LAI2000, os dados foram sempre coletados no início da manhã ou final da tarde, sempre sob condições de luz difusa.

Pode-se perceber que em 28/09/2013, quando a floresta tinha 21 meses de idade (anterior ao fechamento de copas) houve uma maior dispersão entre os valores, a este fato se atribui o grande esforço amostral exigido para representar a variabilidade espacial em τ de maneira satisfatória, especialmente em condições de luz direta. Em virtude disso não se observaram diferenças significativas entre os valores atingidos pelos dois aparelhos, porém houve uma alta correlação ($p < 0,01$) entre as medidas de L_e ($r = 0,64$) e τ ($r = 0,81$).

Figura 28 – Correlação entre as estimativas do Índice de área foliar (L) obtidas pelo LP80 e o LAI-2000 em seis diferentes datas, entre 07/09/2014 e 09/09/2014, as condições meteorológicas permitiram a coleta em duas condições de céu distintas com o LP80: luz predominantemente difusa (preto) e direta (cinza). A linha tracejada representa a linha de proporção 1:1. Cada símbolo representa um clone e seu tamanho é proporcional ao valor do ângulo médio de inclinação foliar (AMI). Z_h é o ângulo zenital médio no momento da coleta. No canto superior esquerdo dos painéis estão os resultados do teste $T_{pareado}$ e coeficiente de correlação de Pearson (r), significativos a 5% (*), 1% (**) ou 0,1% (***)

Em 08/02/2014, os valores de L_e estimados pelos aparelhos não apresentaram nenhuma correlação ($p = 0,4703$), enquanto as médias de τ obtidas nas parcelas estiveram fortemente correlacionadas ($r = 0,96^{***}$). Observa-se que apesar dos aparelhos não concordarem para as estimativas de L_e , o LAI-2000 permaneceu registrando valores consistentes, ao passo que para os clones com padrão de folha vertical, o LP-80 registrou estimativas inconsistentes.

Quando o mesmo conjunto de dados foi analisado removendo-se os clones com ângulo foliar médio acima de 50° , os aparelhos não apresentaram diferenças significativas pelo teste T_{pareado} ($p = 0,9328$), além de uma altíssima correlação ($r = 0,94^{***}$). Em virtude do comportamento das funções de K_c e χ (Eq. 24 e 25) na faixa de ângulos zenitais amostrada nesta data ($\bar{Z}_h = 12,4^\circ$), os clones com elevado AMI apresentaram valores de $L_e (LP-80)$ próximos de $6 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$, mesmo em parcelas de baixa interceptação ($30\% < \tau < 40\%$).

Figura 29 – Correlação entre as estimativas de τ obtidas pelo LP80 e o LAI-2000 em seis diferentes datas, entre 07/09/2014 e 09/09/2014, as condições meteorológicas permitiram a coleta em duas condições de céu distintas com o LP80: luz predominantemente difusa (preto) e direta (cinza). A linha tracejada representa a linha de proporção 1:1. Cada símbolo representa um clone. Z_h é o ângulo zenital médio no momento da coleta. No canto superior esquerdo dos painéis estão os resultados do teste T_{pareado} e coeficiente de correlação de Pearson (r), significativos a 5% (*), 1% (**) ou 0,1% (***)

Em condições de luz direta, o LP-80 estimou valores de τ sistematicamente menores que o LAI-2000, no entanto o modelo de inversão para L_e deste aparelho produziu estimativas significativamente maiores que as do LAI-2000. As diferenças médias foram da ordem de 0,04 (0,02-0,05) para τ_{dir} e de 0,73 (0,3-0,9) m^2m^{-2} para L_e . Caso fosse necessário estimar a transmitância do dossel adotando o pressuposto da Lei de Beer, uma diferença de $\pm 0,73 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ no índice de área foliar teria causado uma alteração de +44% ou -31% no valor de transmitância, quando $K = 0,5$.

Em condições de luz difusa, ocorreu o oposto, com o LAI-2000 estimando valores maiores de L_e , mas altamente correlacionados com os valores do LP-80 ($r > 0,85^{***}$). Entretanto as estimativas de τ do LAI-2000 foram sempre maiores do que as do LP-80 independente das condições de luz. A isto se atribuiu o fato dos anéis do LAI-2000, na verdade registrarem a radiação incidente em uma faixa centrada em um ângulo de visada θ , ao passo que o LP-80 está subordinado às condições do céu, hora do dia e época do ano no momento da coleta. Apesar de possuírem sensibilidade a faixas de comprimentos de onda distintas, a diferença média de τ_{dif} entre os aparelhos oscilou de 1% a 5%.

Outro aspecto importante a ser ressaltado, foram as discrepâncias entre as estimativas de L_e (LP-80) para as mesmas parcelas sob diferentes condições de luz. Em 07/09/2014, sob luz difusa, a média de L_e (LP-80) entre os clones foi de $2,1 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$, dois dias depois, as mesmas parcelas amostradas sob luz direta apresentaram uma média de $3,8 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$, uma variação de aproximadamente 80%.

Fica claro que a magnitude das diferenças nos valores obtidos em L_e causa impactos muito maiores no cálculo de τ do que as próprias diferenças entre as médias amostradas diretamente pelos aparelhos, além disso, a correlação entre os valores de τ foi sempre significativa ($r > 0,81^{**}$) e maior do que a correlação entre os valores de L_e em praticamente todas as datas. Isto se dá, devido ao fato de τ ser medida pelos aparelhos enquanto que as estimativas de L_e passam pelas interpretações de modelos teóricos, cujo grau de acurácia depende do grau em que as pressuposições do modelo são violadas.

4.3.5 Considerações práticas

Hyer e Goetz (2004) estudando a sensibilidade dos parâmetros dos modelos de inversão do LP-80 indicaram que a incerteza na estimativa de τ tende a causar os maiores impactos no cálculo de $L_e (LP-80)$. Uma alteração de 10% no valor da PAR incidente provocou uma alteração média de $\pm 20\%$ em $L_e (LP-80)$. Estes mesmos autores, alertaram para os efeitos do parâmetro χ , observados principalmente em 08/02/2014, em seu estudo $L_e (LP-80)$ alterou-se em média 5%, quando $\chi = 1 \pm 0,5$.

Na figura 30, estão ilustradas as variações da radiação solar extraterrestre (a) e do ângulo zenital (b), ao longo do dia nas quatro efemérides do ano. Na região do ensaio, os valores diários máximos de Z_h oscilaram entre 1 e 50 graus. Os erros evidenciados em $L_e (LP-80)$ nos clones de distribuição de ângulos foliar mais vertical em Fevereiro de 2014, poderiam ser evitados caso o horário de medição fosse otimizado para que Z_h estivesse ao redor de 57° , faixa em que não há diferença na função de K_c (Eq. 24) independente de AMI. Na área de estudo, em maior parte do ano este horário estaria entre as 8:00 – 10:00 horas da manhã ou entre as 14:00-16:00 horas da tarde.

Figura 30 – Curso diário da radiação solar extraterrestre (a) e do ângulo zenital (b) nas quatro efemérides do ano: Solstícios de verão e inverno, equinócios de primavera e outono. As linhas tracejas representam o período de coleta de dados com o LP-80

No entanto, adotou-se o horário entre 10:00-14:00 h para realização das coletas. Se as flutuações na PAR incidente são potencialmente as principais causadoras de incertezas no cálculo de $L_e (LP-80)$, a adoção deste horário minimiza estes efeitos, pois durante a passagem do meio dia, os valores de radiação incidente e ângulo zenital são mais estáveis. Do início de 2012 (plantio) a setembro de 2014, 64% do total da PAR incidiu entre este horário. A escolha pela coleta em ângulos zenitais mais acentuados também implica em preocupações com a área da parcela, já que a sombra de árvores das proximidades podem poluir as leituras.

Em nosso entendimento, a variação causada pela adoção de valores específicos de χ por clone, também poderiam ser evitadas caso χ tivesse sido mantido em 1, visto que os problemas estão na sensibilidade do modelo de inversão de $L_e (LP-80)$ aos valores extremos de χ e Z_h . Além disso, dada às distintas configurações de dossel (Figura 24), fica difícil atribuir um modelo teórico que descreva dosséis não homogêneos.

Outro aspecto variável no LP-80 é a condição de luz no momento da amostragem. Segundo os resultados obtidos, condições de luz difusa favorecem a amostragem reduzindo significativamente o esforço amostral e aumentando a confiança das estimativas, corroborando com o proposto por Garrigues et al. (2008) que verificaram uma sensibilidade maior dos parâmetros do LP-80 sob condições de luz direta, induzindo a maiores erros na estimativa de $L_e (LP-80)$.

Já para o LAI-2000 não se testou a influência das condições do céu, pois diversos estudos já apontaram a magnitude dos erros embutidos no compute de $L_e (LAI-2000)$ quando há poluição por luz direta em qualquer um dos anéis. Porém, mesmo que um dos anéis seja comprometido, a manutenção apenas do quarto anel nos cálculos apresenta alta correção com o valor de $L_e (LAI-2000)$ obtido quando todos os anéis são computados (LEBLANC; CHEN, 2001; HYER; GOETZ, 2004).

Por fim, a mais importante reflexão fica a respeito sobre quando é mais interessante utilizarmos diretamente os valores de τ medidos e quando o uso de L_e é mais conveniente (BINKLEY et al., 2013b), uma vez que independentemente das características do dossel e condições de coleta, o número de amostras tomadas permitiu uma excelente correlação entre τ estimada pelos dois métodos (Figura 29).

A simples conversão entre área e biomassa foliar (usando a AFE, por exemplo), pode subestimar consideravelmente o verdadeiro índice de área foliar, assim como o uso de combinações entre L ou L_e e coeficientes de extinção de luz inadequados podem levar a falsas estimativas de interceptação, ou gerar uma estimativa de L não condizente com a realidade, cabendo ao pesquisador a preocupação na escolha de um método de estimativa do índice de área foliar que atenda seus objetivos. Porém quando o alvo do estudo é a determinação a fração da radiação interceptada pelo dossel, recomenda-se fortemente o uso direto de τ .

4.4 Variabilidades genética e temporal do uso e eficiência do uso da luz

4.4.1 Uso da luz (IPAR)

Em virtude do atestado acima, neste estudo foram adotadas diretamente as medidas de τ_{dir} (LP-80) e τ_{dif} (LAI-2000) no computo da quantidade de PAR interceptada pelo dossel (IPAR). Observem que sempre foi e será o usado o termo “interceptada” e não “absorvida”, pois a fração da radiação transmitida pelo dossel e refletida de volta às copas pelo solo, assim como a refletância das folhas na banda PAR não foram contabilizadas. Alguns estudos negligenciam estes efeitos, adotando o termo APAR, independente de correção (STAPE et al., 2008). De fato, estes dois valores estão muito próximos, Marsden et al. (2010) aplicaram um modelo detalhado no cálculo da APAR em plantios de *Eucalyptus* no Estado de São Paulo, envolvendo parâmetros relativos a refletância do solo e os efeitos de transmissividade e refletância das folhas. Seus resultados apontaram que APAR foi sempre menor que IPAR, estas duas variáveis apresentaram uma relação linear com um coeficiente angular de 0,9 e um intercepto igual a 19 MJ m^{-2} , porém não significativamente diferente de zero.

Neste mesmo estudo, os autores comentam que uma metodologia mais simplificada para o cálculo da radiação absorvida ($APAR = PAR (1 - \tau_{dif})$), adotando apenas a transmitância da fração difusa, reduziria de 14 para 1 equação necessária ao computo da APAR. Esta simplificação teria superestimado os valores encontrados em aproximadamente 15%. Abaixo, a figura 31 mostra a evolução de τ_{dir} e τ_{dif} ao longo dos 17 aos 32 meses de idade.

Figura 31 – Evolução da transmitância (τ) do dossel para as frações direta (cinza) e difusa (preto) da radiação solar fotossinteticamente ativa (PAR) ao longo da idade do povoamento durante o período de estudo para cada um dos clones (painéis). Os círculos representam as datas de medição e as linhas tracejadas verticalmente dividem as leituras realizadas em 2013 e 2014

As copas destes clones de *Eucalyptus* interceptaram anualmente de 65-95% da PAR incidente. A fração difusa interceptada se apresentou mais constante, enquanto a fração direta mostrou um padrão sazonal marcante. Isto se deu devido ao período avaliado (pré e pós fechamento de copa) e principalmente devido ao movimento aparente do sol na região de estudo (Figura 30).

Entre Julho de 2013 e Junho de 2014, IPAR média entre os clones foi de $2,3 \text{ GJ m}^{-2}$. Após o fechamento de copas (24 meses de idade), é evidente a redução da amplitude da diferença de IPAR dos clones (Figura 32). A média diária foi de 6 MJ m^{-2} , variando entre aproximadamente $2,0\text{-}4,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ no mês de Junho a $7,0\text{-}10,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ entre os meses de Dezembro e Janeiro.

Figura 32 – Evolução da radiação interceptada pelo dossel para cada um dos clones ao longo da idade do povoamento

Na quinzena centrada em 02/02/2014 foram registrados os valores máximos de IPAR, variando de 120 a 180 MJ m⁻² quinzena⁻¹, em consequência da baixa precipitação em um período quente ($\overline{T_{máx}} = 34^{\circ}\text{C}$) e seco ($\overline{UR} = 55\%$). Neste período, 80% da PAR total incidiu na forma direta, ou seja, praticamente não houve nebulosidade já que os 20% de PAR_{dif} incidente são atribuídos às interações da luz com os próprios gases atmosféricos (CAMPBELL; NORMAN, 1998).

Os mínimos valores observaram-se na quinzena centrada em 22/06/2013 quando os mesmos oscilaram de 25-45 MJ m⁻², quando de maneira inversa registraram-se as maiores precipitações (PPT = 138 mm) e apenas 38% da radiação incidiu de forma direta. Abaixo a tabela 7, resume as informações acerca da quantidade de radiação interceptada, nas escalas quinzenal ($n = 24$), mensal ($n = 12$), sazonal ($n = 4$) e anual ($n = 1$).

Tabela 7 – Resumo da quantidade de PAR interceptada pelo dossel em MJ m⁻² nas escalas quinzenal, mensal, sazonal (estações do ano) e anual. Mín, Máx e s representam o valor mínimo, máximo e desvio padrão de cada clones, respectivamente

Clone	Quinzenal			Mensal			Sazonal			Anual
	Mín	Máx	s	Mín	Máx	s	Mín	Máx	s	
A1	39,4	174,1	29,3	109,5	302,1	54,3	529,8	833,3	146,9	2593
B2	40,6	161,8	26,2	114,4	282,6	48,3	504,5	779,9	131,0	2454
C3	35,1	129,4	20,4	96,9	234,4	36,6	439,2	624,3	89,8	2099
D4	42,0	175,1	29,0	115,0	304,6	54,0	535,8	840,0	146,6	2630
E5	38,2	168,5	28,2	108,1	292,8	52,5	501,9	806,6	144,0	2486
F6	29,1	133,2	21,3	77,8	231,7	39,0	405,9	635,8	101,4	1962
G7	40,9	172,8	28,4	114,2	300,0	52,5	527,2	828,8	143,7	2581
H8	43,2	166,5	27,6	119,2	297,7	51,1	521,0	801,5	136,2	2583
I9	30,8	128,7	19,9	86,7	223,6	36,0	411,8	619,0	91,9	1953
K2	38,3	158,1	25,9	104,4	278,9	47,6	501,1	761,2	124,4	2434
J1	26,8	119,7	19,2	71,8	209,4	35,6	370,5	576,6	89,1	1797
L3	31,1	135,7	21,2	81,4	236,3	39,5	428,6	645,2	97,5	2036
M4	36,9	159,6	25,5	101,9	277,4	46,6	484,4	762,7	124,8	2356
N5	35,7	160,6	26,3	99,0	280,4	48,7	488,6	772,3	130,5	2388
P7	32,3	142,1	23,4	85,5	252,3	43,1	467,7	692,8	106,6	2217
O6	34,5	157,1	25,3	97,5	271,0	46,3	452,0	736,0	125,1	2248
Q8	42,1	175,8	29,2	113,4	305,4	54,3	537,0	842,1	147,4	2635
R9	35,6	170,5	27,8	96,4	290,7	51,6	467,0	793,9	145,8	2352
<hr/>										
Mínimo	26,8	119,7	19,2	71,8	209,4	35,6	370,5	576,6	89,1	1797
Média	36,3	155,0	25,2	99,6	270,6	46,5	476,3	741,8	123,5	2322
Máximo	43,2	175,8	29,3	119,2	305,4	54,3	537,0	842,1	147,4	2635
CV (%)	13,3	11,9	13,7	14,2	11,5	14,3	10,4	11,7	17,6	11

Nota: Mínimo = valor mínimo entre os clones; Média = média entre os clones; Máximo = valor máximo entre os clones; CV = coeficiente de variação.

4.4.2 Eficiência do uso da luz

Mantendo em mente que todos os valores de eficiência aqui representados fazem referência apenas ao crescimento em biomassa do fuste, portanto não tomando em consideração a produção de folhas ou galhos, ε quinzenal variou entre 0,16 e 3,14 g MJ⁻¹, já a média entre os clones ficou entre 0,51 e 2,34 g MJ⁻¹ (Figura 33a). Apesar da grande amplitude entre os valores de ε dos clones, em média igual a 1,5 g MJ⁻¹, as flutuações na eficiência do uso da luz apresentaram um padrão similar entre todos os materiais genéticos (Figura 33b).

Figura 33 – Dinâmica da eficiência do uso da luz quinzenal dos clones ao longo da idade do povoamento (a). Oscilação percentual da variação de ϵ entre quinzenas em relação à média de ϵ de cada clone (b)

Stape et al. (2008) estudando as respostas nos padrões de alocação de carbono em clones de *Eucalyptus* frente ao suprimento de recursos, encontrou valores similares de ϵ , variando entre 0,78 e 1,98 g MJ^{-1} , sofrendo um aumento de 2 vezes quando alteradas as condições hídricas (ano mais seco vs. ano mais úmido), os efeitos da irrigação também foram mais pronunciados no ano seco, quando o aumento em ϵ foi de cerca de 112%, frente à 16% no ano mais úmido. Neste ensaio, as flutuações nos valores quinzenais de ϵ em relação à média ficaram próximas a este valor, chegando à aproximadamente 100% em algumas datas.

Em contrapartida, em uma escala anual a eficiência do uso da luz tende a ser constante (DALLA-TEA; JOKELA, 1991). Este fato fica evidenciado na tabela 8, ao passo que aumentando a unidade de tempo envolvida no cálculo de ϵ , há uma redução sistemática da amplitude dos valores máximos e mínimos de cada material genético. Os valores anuais oscilaram entre 0,9 e 2,0 g MJ^{-1} .

Tabela 8 – Resumo dos valores de ε em g MJ^{-1} nas escalas quinzenal, mensal, sazonal (estações do ano) e anual. Mín, Máx e s representam o valor mínimo, máximo e desvio padrão de cada clones, respectivamente

Clone	Quinzenal			Mensal			Sazonal			Anual
	Mín	Máx	s	Mín	Máx	s	Mín	Máx	s	
A1	0,33	2,80	0,49	1,12	2,68	0,41	1,34	2,05	0,30	1,69
B2	0,45	2,91	0,55	0,91	2,56	0,39	1,45	2,01	0,24	1,76
C3	0,42	3,01	0,59	1,27	2,76	0,49	1,63	2,49	0,40	1,95
D4	0,57	3,01	0,53	1,24	2,65	0,45	1,50	2,34	0,37	1,85
E5	0,35	2,48	0,48	0,80	2,30	0,37	1,03	1,62	0,28	1,43
F6	0,53	2,12	0,39	0,95	2,10	0,34	1,39	1,81	0,18	1,54
G7	0,51	1,76	0,30	0,73	1,69	0,28	0,88	1,34	0,19	1,08
H8	0,27	3,14	0,61	0,80	3,01	0,51	1,33	1,76	0,20	1,60
I9	0,80	2,49	0,42	1,22	2,38	0,37	1,41	2,21	0,33	1,78
K2	0,40	2,48	0,46	1,01	2,32	0,39	1,25	1,95	0,31	1,52
J1	0,91	2,54	0,43	1,40	2,41	0,33	1,80	2,24	0,19	1,97
L3	0,92	2,23	0,34	1,06	2,05	0,28	1,21	1,72	0,24	1,53
M4	0,27	1,48	0,26	0,67	1,52	0,24	0,80	1,19	0,16	0,99
N5	0,61	1,91	0,33	0,87	1,85	0,31	0,98	1,57	0,25	1,29
P7	0,16	1,40	0,25	0,58	1,33	0,21	0,72	1,13	0,18	0,94
O6	0,67	1,96	0,33	0,96	1,87	0,30	1,16	1,71	0,24	1,47
Q8	0,48	2,29	0,42	0,91	2,18	0,35	1,22	1,64	0,20	1,40
R9	0,62	2,13	0,31	0,98	1,87	0,23	1,13	1,47	0,14	1,31
<hr/>										
Mínimo	0,16	1,40	0,25	0,58	1,33	0,21	0,72	1,13	0,14	0,94
Média	0,51	2,34	0,42	0,97	2,20	0,35	1,24	1,79	0,24	1,51
Máximo	0,92	3,14	0,61	1,40	3,01	0,51	1,80	2,49	0,40	1,97
CV (%)	41,8	22,1	26,8	22,5	20,6	24,9	22,9	21,5	29,8	20,2

Nota: Mínimo = valor mínimo entre os clones; Média = média entre os clones; Máximo = valor máximo entre os clones; CV = coeficiente de variação.

Monteith (1977) estimou um valor de ε sazonal médio para uma variedade de culturas agrícolas e encontrou um valor de $1,4 \text{ g MJ}^{-1}$, equivalente ao valor médio observado entre os clones ($\varepsilon = 1,5 \text{ g MJ}^{-1}$). Este autor também ficou conhecido por demonstrar a relação linear entre radiação interceptada e crescimento. Na figura 34, esta clássica relação não foi observada para os valores anuais dos clones. Runyon et al. (1994) estudando as limitações ambientais sob ε em uma série de espécies florestais, também não observou esta relação até que os períodos de limitações ambientais fossem removidos no computo da radiação utilizada.

Figura 34 – Relação entre o incremento anual de madeira (WNPP) e a radiação solar fotossinteticamente ativa interceptada (IPAR) pelos dosséis dos clones durante o período entre os 19 e 31 meses de idade. As linhas tracejadas simbolizam as isolinhas de eficiência do uso da luz (ϵ)

Durante o período estudado, um veranico ocorrido entre Janeiro e Fevereiro de 2014 causou uma queda brusca nos valores de ϵ dos clones, curiosamente este foi o período de maior radiação interceptada. Mesmo removendo este período, a relação entre IPAR e WNPP, não foi clara para todos os clones sugerindo que a produção de madeira é mais sensível às alterações na eficiência do uso da luz do que nas alterações na quantidade de radiação interceptada.

Marsden et al. (2010) e Goetz e Prince (1996) fizeram observações semelhantes, notando que a relação linear entre IPAR e ANPP se estabelecia em florestas mais jovens, ao passo que florestas mais velhas não demonstravam esta correlação. Uma das hipóteses levantadas é a de que a produção de biomassa era limitada por fatores que não a luz, de um modo que talhões mais velhos eram mais afetados que talhões mais jovens.

Os primeiros autores também notaram uma correlação positiva entre ϵ e índice de sítio, porém com diferenças significativas nos patamares de ϵ entre florestas mais jovens (< 2 anos de idade) e mais velhas (> 2 anos de idade). Segundo eles,

isto é esperado, já que inicialmente espera-se que as plantas invistam mais energia construindo os órgãos para captura de recursos (raízes, galhos e folhas).

De acordo com Ryan et al. (2010) a eficiência do uso da luz é um bom indicador de mudanças nos fluxos de carbono na planta. As causas das variações observadas em ε serão discutidas adiante sob a luz dos conceitos de ecologia da produção (RYAN et al., 2008).

4.5 Variáveis meteorológicas e eficiência do uso da luz

A figura 35 mostra a evolução diária das variáveis: PAR direta e difusa (a), temperatura máxima, média e mínima (b), déficit de pressão de vapor (c), evapotranspiração de referência (d) e precipitação (e). Desde o plantio (31/12/2011) até o mês de Setembro de 2014, a PAR incidente total foi de 7446 MJ m⁻², sendo 2831 MJ m⁻² em 2012, 2681 MJ m⁻² em 2013 e 1934 MJ m⁻² até a última data avaliada (30/09/2014). Destes, 66% incidiram de forma direta e 34% de maneira difusa. O mês de maior incidência foi Dezembro, com média de 307 MJ m⁻² mês⁻¹, enquanto o de menor incidência foi Junho (131 MJ m⁻² mês⁻¹).

Neste período, a precipitação total foi de 3705 mm (40% em 2012, 38% em 2013 e o restante até 30/09/2014). A mínima mensal foi registrada em Junho de 2012, quando caíram sobre a região do experimento apenas 3,4 mm. Já o mês mais chuvoso foi registrado em Fevereiro de 2013, quando 254 mm atingiram a região. A temperatura média foi de 19,6 °C, sendo que a máxima registrada atingiu os 36,4 °C (05/02/2014), enquanto a mínima foi de 0,5 °C (24/07/2013). Não foram registradas geadas, durante o período.

A combinação entre a baixa umidade relativa do ar e elevadas temperaturas resultou em déficit de pressão de valor máximo igual a 2,8 kPa. Durante o texto, ressaltou-se o veranico ocorrido entre Janeiro e Fevereiro de 2014, nesta data o DPV médio quinzenal foi da ordem de 2,4 kPa, enquanto o solo detinha apenas 38% da capacidade de água disponível. Neste período a ET_o manteve-se sempre acima 5,6 mm dia⁻¹, oscilando até 7,0 mm dia⁻¹. O valor máximo de ET_o ficou próximo disso, quando 7,1 mm dia⁻¹ foram registrados em 04/12/2013. A mínima foi de 0 mm dia⁻¹ em dias completamente nublados entre os meses de Maio e Setembro.

Figura 35 – Curso diário da PAR_{dir} (círculos cinza) e PAR_{dif} (círculos pretos) (a), das temperaturas máxima, média e mínima (escala de cinza) (b), do DPV (c), da ET_o (d) e da precipitação (e), do momento do plantio até o dia 1004 (30/09/2014). As linhas tracejadas indicam o fim dos anos de 2012 e 2013. Dados medidos na estação meteorológica de Itapeva-SP e pluviômetro local

Dentre as variáveis, a radiação incidente teve uma alta correlação negativa ($r = -0,58$) com os valores de eficiência de uso da luz, porém quando separada em seus componentes, a PAR direta se mostrou a variável de maior correlação ($r = -0,68$). Assim como a radiação incidente, o DPV, a temperatura mínima, média e máxima, a evapotranspiração potencial e real e a velocidade do vento (totais ou médias quinzenais) apresentaram correlação negativa com ε , enquanto somente a precipitação e a umidade relativa mínima, média e máxima se relacionaram positivamente com a eficiência do uso da luz.

Na figura 36, mantiveram-se somente as variáveis de maior correlação, assim como usado de parcimônia para eliminar variáveis que representassem a mesma dimensão dos dados, como, por exemplo, das medidas de umidade e temperatura mantiveram-se $T_{\text{máx}}$ e $UR_{\text{mín}}$. PAR_{dir} e PAR foram deixadas apenas para ilustrar o incremento de 17% da correlação da fração direta em relação à total. Curiosamente esta relação foi negativa, quando se espera que o incremento em biomassa aumente linearmente com APAR ou IPAR, sugerindo que ε se mantenha constante. Segundo Medlyn (1998) esta relação é contra intuitiva já que a resposta da fotossíntese de uma folha tem um padrão extremamente não linear com o aumento da radiação incidente (HIROSE, 2005).

Esta mesma autora encontrou a mesma relação negativa entre PAR incidente e ε observada neste estudo, argumentando que a fotossíntese de toda a copa saturava-se em paralelo à fotossíntese das folhas. Verificou também que a eficiência do uso da luz diária era maior sob maiores índices de área foliar, sugerindo que este aumento se dava ao incremento na proporção de luz que mais folhas recebem sob menores intensidades quando L aumenta (MEDLYN, 1998). Devido às diferentes arquiteturas de copa entre os clones, não se observou aumento em ε em função de L , porém nossos resultados suportam esta hipótese, dado que sob condições de luz direta a redução em ε foi mais acentuada.

Outro aspecto interessante da figura 36 foi a consistente perda de correlação de todas as variáveis conforme a defasagem do respectivo período climático. O descompasso de apenas um dia, já foi suficiente para reduzir a magnitude das correlações entre variáveis e ε .

Figura 36 – Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre as variáveis meteorológicas PAR_{dir} , UR_{min} , DPV, PAR, ET_o , T_{max} e precipitação, e a eficiência do uso da luz na escala quinzenal. Cada quadro tende ao azul quanto mais forte a correlação e ao vermelho quanto mais fraca. As variáveis meteorológicas foram defasadas em até dez dias para verificar a sensibilidade de resposta a cada uma (eixo vertical)

Podemos notar que a maior correlação positiva foi observada para UR_{min} ($r = 0,64$), ao passo que T_{max} mostrou uma correlação negativa de menor intensidade ($r = -0,43$). O entendimento sobre estes efeitos pode ser resumido pelo DPV que conjuga em seu cálculo o efeito inverso entre umidade e temperatura. O coeficiente de correlação entre DPV e ε foi de $-0,63$, muito próximo do observado para UR. Estes resultados indicam que na área de estudo, o impacto negativo em ε foi mais pronunciado graças a períodos de ar mais seco do que às temperaturas demasiadamente elevadas.

Resultado similar foi obtido por Landsberg e Hingston (1996) que verificaram uma relação exponencial negativa entre os incrementos mensais em biomassa e o

déficit de pressão de vapor, em cinco diferentes ensaios em plantações de *Eucalyptus*. Diversos trabalhos já documentaram a relação inversa entre DPV e condutância estomática (MARRICHI, 2009; HUBBARD et al., 2010; GENTIL OTTO et al., 2014). Em seu estudo, Landsberg e Hingston (1996) afirmam que para compensar o fechamento estomático e a consequente interrupção da absorção de CO_2 pelas folhas, o crescimento cessa. Desta maneira espera-se que o crescimento seja afetado por altos valores de DPV.

Segundo os mesmos, o mecanismo inerente à regulação estomática pelas plantas é a capacidade com que a água pode se mover do solo às folhas. Assim se a demanda atmosférica é elevada ($\uparrow$ DPV), independente da quantidade de água no solo, o fluxo de água às folhas não é rápido o suficiente e os estômatos se fecham, caso contrário a planta morreria. O mesmo efeito ocorreria em cenários de baixo DPV, quando condições de pouca água disponível no solo limitariam o fluxo com que a água se move do solo às folhas.

Desta maneira, as relações entre a quantidade de água disponível na zona das raízes é um importante fator ambiental sobre ε . Fato evidente neste estudo, no qual se observou correlação positiva entre PPT e ε ($r = 0,39$) e negativa entre ET_o e ε ($r = -0,48$). Variáveis que exprimem a entrada (PPT) e saída de água (ET_o) de um sistema para o balanço hídrico (THORNTHWAITE; MATHER, 1955).

Para Almeida et al. (2007), a disponibilidade de água afeta o crescimento da floresta particularmente em períodos secos. Runyon et al. (1994) afirmam o grafado, ressaltando que como a radiação incidindo sobre a floresta varia durante o ano, o momento em que ocorrem os estresses influenciarão a relação entre interceptação e crescimento, de modo que períodos de baixa disponibilidade hídrica no solo e/ou elevados déficits de pressão de vapor, tendem a impor severas limitações sobre ε nos meses de verão, quando a incidência de radiação é alta.

Durante o período estudado, foi possível estudar estes efeitos, uma vez que o verão de 2013-2014 apresentou precipitações 46% inferiores à média histórica, deixando o solo com 36-50% da capacidade de água disponível. A combinação da elevada demanda atmosférica e baixo armazenamento de água no solo foi evidenciada na 51ª quinzena pós-plantio, quando a eficiência do uso da luz atingiu seus mínimos valores, oscilando de 0,2-1,1 g MJ^{-1} , entre os clones (Figura 37).

Figura 37 – Eficiência do uso da luz quinzenal média entre todos os clones, as barras representam o desvio padrão dos dados (a). Em (b), precipitação quinzenal (barras) e armazenamento de água no solo (linha sólida). Em (c), deficiência, retirada, excedente e reposição hídrica (escala de cinza). Em (b) e (c) adotou-se CAD = 290 mm

Dado o comportamento semelhante da flutuação dos valores de ϵ dos clones e sua sensibilidade às variáveis climáticas, vislumbrou-se a possibilidade de unificar um modelo que descrevesse esta dependência. Tendo em mente que a magnitude desta resposta pode ser diferente para cada clone, os resultados sugerem que as variáveis meteorológicas afetaram a eficiência do uso da luz da mesma maneira.

Para tal, lançou-se mão do método de regressão intitulado “*stepwise*”, tendo ϵ como variável resposta às meteorológicas. Mantiveram-se variáveis que possuísem correlação maior que $|0,4|$, além de incluídas variáveis do balanço hídrico, usando da mesma parcimônia para escolher as variáveis iniciais, que por fim representaram a quantidade de energia incidente (PAR_{dir}), a demanda atmosférica (DPV e ET_0) e os fluxos de água no solo (reposição e déficit hídrico). O modelo final foi descrito da seguinte forma (Eq. 32):

$$\varepsilon = 2,1332 - 0,0186 PAR_{dir} + 0,0135 ET_o + 0,0049 Rep \quad (\text{Eq. 32})$$

$$R^2 = 0,64; EMA = 0,176 \text{ g MJ}^{-1}; n = 32$$

Em que: ε é a eficiência do uso da luz quinzenal (g MJ^{-1}); PAR_{dir} é fração direta da PAR incidente (MJ m^{-2} quinzena $^{-1}$); ET_o é a evapotranspiração de referência (mm quinzena^{-1}) e Rep é a reposição hídrica (mm quinzena^{-1}). R^2 representa o coeficiente de determinação, EMA é o erro médio absoluto e n , o número de observações.

As variáveis PAR_{dir} ($p < 0,0001$), ET_o ($p = 0,0074$) e Rep ($p = 0,0203$) foram escolhidas como as melhores preditoras da eficiência do uso da luz, explicando 64% da variabilidade em ε , o erro médio absoluto de $0,18 \text{ g MJ}^{-1}$ representou em média uma magnitude de 12% de incerteza nas estimativas. Abaixo, a figura 38 ilustra a precisão do modelo e a distribuição dos resíduos.

Figura 38 – À esquerda, valores observados e preditos de ε (g MJ^{-1}). A linha tracejada simboliza a linha de proporção 1:1. À direita, histograma da distribuição dos resíduos

Assim como o DPV resume a relação entre temperatura e umidade, ele também se relaciona positivamente com ET_o (WHITEHEAD; BEADLE, 2004). Por sua vez, a ET_o também contempla os efeitos da velocidade do vento e

disponibilidade de energia no ambiente. Desse modo, a não inclusão do DPV no modelo, apesar da alta correlação com a eficiência do uso da luz, pode ser explicada pela relação entre DPV e ET_o . Esta parece ser a mesma razão pela qual apenas a reposição hídrica se manteve no modelo frente ao déficit hídrico.

4.6 Considerações finais

Por fim, uma caracterização completa dos clones quanto aos atributos relativos à produtividade, uso e eficiência do uso da luz, se deu por meio de uma análise de componentes principais, cujos três primeiros componentes foram capazes de capturar 83% da variabilidade nos dados (Tabela 9).

Tabela 9 – Elementos dos autovetores dos três primeiros componentes principais (CP1, CP2 e CP3), que somados explicam 83% da variabilidade nos dados. Elementos maiores que 0,5 foram ressaltados em negrito

Variável	CP1 (39,98%)	CP2 (29,50%)	CP3 (13,76%)
<i>IPAR</i>	-0,519	-0,187	-0,119
<i>WNPP</i>		-0,673	-0,198
ε	0,293	-0,561	-0,149
<i>Le</i>	-0,501		-0,327
<i>AFE</i>	-0,379	0,237	0,136
<i>AMI</i>	0,494	0,207	-0,122
<i>Db</i>		0,304	-0,886

Nota: Incremento anual de biomassa do fuste (WNPP), eficiência anual do uso da luz (ε), PAR anual interceptada (IPAR), índice de área foliar efetivo registrado pelo LAI-2000 (L_e), densidade básica (Db), área foliar específica (AFE) e ângulo de inclinação foliar médio (AMI).

O primeiro componente (39,98%) foi uma representação das relações de captura de luz e arquitetura de copa uma vez que atribui altos coeficientes para as variáveis IPAR, L_e e AMI. Observa-se que IPAR e L_e correlacionam-se positivamente e ambas, negativamente com AMI. Já o segundo componente (29,5%), expressa a correlação positiva entre WNPP e ε . Os 13,76% restantes, foram atribuídos ao terceiro componente, que representou as diferenças observadas na densidade básica dos clones. A figura 39 ilustra o posicionamento dos clones frente aos dois primeiros componentes principais.

Figura 39 – Representação dos clones contra os valores dos dois primeiros componentes principais que juntos explicam aproximadamente 70% da variabilidade dos dados. As setas representam as variáveis: incremento anual de biomassa do fuste (WNPP), eficiência anual do uso da luz (ϵ), PAR anual interceptada (IPAR), índice de área foliar efetivo registrado pelo LAI-2000 (L_e), densidade básica (Db), área foliar específica (AFE) e ângulo de inclinação foliar médio (AMI). As setas e sua direção também simbolizam as relações entre as variáveis e entre estas e os clones

Guardadas a devidas interpretações ao índice de área foliar efetivo, discutidas ao longo do texto, L_e apresentou alta correlação com os valores de IPAR sendo responsáveis em dividir os clones em dois grandes grupos, os de alto e de baixo L_e e IPAR. Coincidentemente, ou não, os clones com ângulo médio de inclinação foliar mais acentuado também apresentaram os menores valores de L_e . Esta pode ser uma característica das próprias espécies, dado que comparando os resultados da figura 39 com a tabela 1, observamos grande proximidade dos clones oriundos da mesma espécie ou semelhantes. Além disso, um baixo L_e em conjunto com elevados AMI, podem revelar uma estratégia adaptativa dos clones oriundos de regiões secas em busca de evitar a perda de água, maximizando a assimilação de carbono.

Apesar de não significativa ($p > 0,05$), a densidade básica da madeira apresentou uma correlação negativa com a produção de madeira, assim como observado entre AFE x ϵ . Entretanto, as principais interpretações podem ser depreendidas da relação entre WNPP e ϵ .

Ryan et al. (2010) relataram que um aumento da ordem de 62% na produtividade primária bruta, resultou em um aumento de 114% na produtividade primária líquida, o maior aumento de NPP em relação à GPP foi explicado principalmente pela mudança na partição de carbono para o fuste, passando de 35 para 45% da GPP, ao passo que também houve uma menor partição de carbono para baixo do solo.

Em conformidade com o atestado acima, Epron et al. (2012) afirmaram que maior disponibilidade de recursos às plantas (água e nutrientes) aumentam GPP e reduzem a partição de carbono abaixo do solo, resultando em um maior fluxo de carbono para o fuste. Stape et al. (2008) demonstrou que parcelas irrigadas alocaram em média 31% a menos de carbono para baixo do solo, sendo este decréscimo proporcional ao aumento no fluxo de carbono acima do solo.

Nossos resultados corroboram estas afirmativas em virtude da alta correlação ($r = 0,82$) entre a eficiência do uso da luz anual e a proporção da biomassa aérea alocada no fuste (Figura 40).

Figura 40 – Relação entre a eficiência do uso da luz anual (ϵ), calculada para o período entre os 19 e 31 meses de idade e a proporção da biomassa alocada no fuste dos clones que tiveram todos os compartimentos da parte aérea quantificados na amostragem destrutiva de maio de 2014. No canto superior esquerdo, o coeficiente de correlação de Pearson (r) significativo a 0,1% (***)

Estes resultados são consistentes com Cannel (1989), que sugeriu que alterações na disponibilidade de água e nutrientes estariam relacionadas à mudança nos fluxos de carbono para o fuste.

Em seu trabalho, Landsberg e Hingston (1996) constataram uma relação linear entre o logaritmo da quantidade de fósforo no solo e a fração da biomassa aérea alocada no fuste, consistente com a hipótese de maior alocação para a raiz em situações de baixa nutrição. Estudando o mesmo nutriente, Bazani (2014) identificou uma inversão na concentração do nutriente nos tecidos do lenho e da raiz, atribuindo o incremento da concentração nas raízes ao período de seca avaliado.

Medlyn (1998) atenta também ao efeito compensatório entre radiação incidente, índice de área foliar e concentração de nitrogênio, de modo a otimizar a fotossíntese da copa, mantendo ε relativamente constante. Portanto, o status nutricional das plantas pode impactar significativamente a eficiência do uso da luz, e a inclusão de variáveis edáficas pode ser de grande valia quando precisamos entender resultados em escalas maiores de observação.

Considerados os efeitos aqui discutidos, uma análise de agrupamento final identificou grupos de clones que se dividiram em dois grandes grupos relacionados à interceptação de radiação e subgrupos que se destacaram pela sua alta, média ou baixa eficiência do uso da luz (Figura 41).

Figura 41 – Dendrograma resultado da matriz de distâncias euclidianas das variáveis padronizadas: incremento anual de biomassa do fuste (WNPP), eficiência anual do uso da luz (ϵ), PAR anual interceptada (IPAR), índice de área foliar efetivo registrado pelo LAI-2000 (L_e), densidade básica (Db), área foliar específica (AFE) e ângulo de inclinação foliar médio (AMI). Os quadros verdes e chaves vermelhas foram colocados para facilitar a interpretação e simplificam de forma genérica a proximidade entre os clones

5 CONCLUSÕES

Frente aos objetivos desta pesquisa, os resultados permitem concluir que os clones selecionados representaram uma vasta amplitude de produtividade (aproximadamente de 20 a 60 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) e padrões de arquitetura de copa, abrangendo uma grande amplitude de espécies utilizadas em povoamentos clonais de *Eucalyptus* no Brasil. O local do estudo permitiu que estes materiais fossem expostos a condições climáticas amplas, dado o marcante efeito da sazonalidade no sítio de estudo. Assim como a época estudada permitiu o entendimento do processo de formação da copa destes clones, paralelamente à quantificação da quantidade de radiação interceptada, durante o período de fechamento do dossel.

Nossos resultados apontam para o cuidado ao se amostrar e interpretar dados de índice de área foliar oriundos de métodos ópticos indiretos, especialmente quando as pressuposições do modelo de inversão são violadas, fato comumente observado nestas parcelas clonais, graças ao efeito de agrupamento das copas devido à sua distribuição espacial (horizontal e vertical) e à distribuição de ângulos foliares. Assim para o cálculo de IPAR, sugere-se o uso de estimativas diretas da radiação interceptada pelo dossel com base nas medidas de τ realizadas pelos aparelhos.

As correlações temporais entre variáveis climáticas e eficiência do uso da luz reforçam a extrema sensibilidade do *Eucalyptus*, posto que o grau de correlação diminuiu gradativamente com o aumento da defasagem do período avaliado. A magnitude de resposta dos valores de ε dos clones frente às variáveis meteorológicas foi diferente, no entanto, os fatores ambientais governaram sua flutuação de maneira similar.

Desta forma, retornando às hipóteses, podemos concluir que em um mesmo sítio, as alterações na eficiência do uso luz são majoritariamente governadas pelas flutuações do clima. A despeito de oscilações semelhantes, os clones apresentaram patamares distintos de eficiência de uso da luz, cuja média anual foi de 1,5 g MJ⁻¹ em uma amplitude entre 0,9-2,0 g MJ⁻¹ observada entre clones. Assim como as diferentes arquiteturas de copa revelaram distintas estratégias de captura (uso) da luz, tendo os clones estudados interceptado de 65-95% da radiação anual incidente, exibindo uma boa correlação com os valores de L_e médios de cada clone ($r = 0,72^{**}$).

Entre os materiais genéticos, maiores valores de interceptação não lideraram a maiores produtividades. Já a eficiência do uso da luz correlacionou-se positivamente com o crescimento, consequência da maior alocação de carbono para fuste. A eficiência do uso da luz foi governada fortemente pelo regime climático de modo que a radiação PAR incidente foi a principal variável afetando ε , assim como esta esteve positivamente relacionada às variáveis que expressam períodos de maior disponibilidade hídrica e negativamente às variáveis que expressam períodos de menor disponibilidade.

Nossos resultados reforçam o potencial uso de valores empíricos de ε em conjunto com estimativas de APAR ou IPAR, como método alternativo para estimar a produtividade de madeira, principalmente em virtude das oscilações do clima. No entanto, deve-se ter cuidado na modelagem deste parâmetro quando escalas maiores de observação (i.e. talhão, fazenda, região, etc.) são tomadas.

Apesar de evidenciar a relação entre ε e biomassa alocada no fuste, existem outros mecanismos associados às mudanças observadas em ε que este estudo não pôde responder. Com uma caracterização completa dos fluxos de carbono nas parcelas seria possível determinar a produtividade primária bruta das mesmas, além de capturar os fluxos de carbono abaixo do solo. Estas informações permitiriam elucidar a real influência das variáveis climáticas no governo dos fluxos de carbono dentro da planta, que se traduzem em ε .

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements.**, Roma, 1998.p????? (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56)

ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V.; LANDSBERG, J.J.; REZENDE, G. D. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 251, p. 10-21, 2007.

ALVARES, C.A. **Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de Eucalyptus no sul do Estado de São Paulo**. 2011. 280p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Heidelberg, v. 113, p. 407-427, 2013a.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Koppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, Dez 2013b.

ALVARES, C.A.; MUNHOZ, J.S.B.; STAPE, J.L.; STAHL, J.; ANDRADE, L.; SANTOS, G.; LIMA, R.; COUTINHO, R.T.; HOINACKI, R.; FOX, T. Caracterização da dinâmica dos índices de vegetação NDVI e EVI em plantações de *Pinus* do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2013. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2013c. p. 2866-2873.

BATTIE-LACLAU, P.; LACLAU, J-P.; BERI, C.; MIETTON, L.; MUNIZ, M.R.A.; ARENQUE, B.C.; PICCOLO, M.C.C.; JORDAN-MEILLE, L.; BOUILLET, J-P.; NOUVELLON, Y. Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment. **Plant Cell and Environment**, Oxford, v. 37, p. 70-81, 2014.

BALDOCCHI, D.D.; WILSON, K.B.; GU, L.H. How the environment, canopy structure, and canopy physiological functioning influence carbon, water and energy fluxes of a temperate broad-leaved deciduous forest: an assessment with the biophysical model CANOAK. **Tree Physiology**, Oxford, v. 22, n. 15-16, p. 1065-1077, 2002.

BAZANI, J.H. **Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto**. 2014. 129p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

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.

BINKLEY, D.; KASHIAN, D. M.; BOYDEN, S.; KAYE, M. W.; BRADFORD, J. B.; ARTHUR, M. A.; FORNWALT, P. J.; RYAN, M.G. Patterns of growth dominance in forests of the Rocky Mountains, USA. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 236, p. 193-201, 2006.

BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; BAUERLE, W.L.; RYAN, M.G. Explaining growth of individual trees: light interception and efficiency of light use by Eucalyptus at four sites in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1704-1713, 2010.

BINKLEY, D.; LACLAU, J-P.; STERBA, H. Why one tree grows faster than another: Patterns of light use and light use efficiency at the scale of individual trees and stands [editorial]. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 1-4, 2013a.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; GSPALTL, M.; FORRESTER, D.I. Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 5-13, 2013b.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMPBELL, G.S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 36, p. 317-321, 1986.

CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. **Introduction to environmental biophysics**. New York: Springer-Verlag, 1998. 286p.

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. 175p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CAMPOE, O.C.; STAPE, J.L.; NOUVELLON, Y.; LACALU, J-P.; BAUERLE, W.; BINKLEY, D.; le MAIRE, G. Stem production, light absorption and light use efficiency between dominant and non-dominant trees of Eucalyptus grandis across a productivity gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 14-20, 2013.

CANNEL, M.G.R. Physiological basis of wood production: A review. **Scandinavian Journal of Forest Research**, London, v. 4, p. 459-490, 1989.

CHEN, J.M.; BLACK, T.A.; ADAMS, R.S. Evaluation of hemispherical photography for determining plant-area index and geometry of a forest stand. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 56, n. 1/2, p. 129-143, Jul 1991.

CHEN, J.M.; BLACK, T.A. Measuring leaf area index of plant canopies with branch architecture. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 57, n. 1/3, p. 1-12, Dez 1991.

CHEN, J.M.; BLACK, T.A. Foliage area and architecture of plant canopies from sunfleck size distributions. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 60, n. 3/4, p. 249-266, Ago 1992.

CHEN, J.M.; CIHLAR, J. Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, New York, v. 33, n. 3, p. 777-787, Ago 1995.

CHEN, J. M.; RICH, P. M.; GOWER, S.T.; NORMAN, J.M.; PLUMMER, S. Leaf area index of boreal forest: Theory, techniques, and measurements. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 102, n. 24, p.429-29.443, Dez 1997.

CRISTIANO, P.M.; MADANES, N.; CAMPANELLO, P.I.; FRANCESCANTONIO, D.; RODRÍGUEZ, S.A.; ZHANG, Y-J; CARRASCO, L.O.; GOLDSTEIN, G. High NDVI and potential canopy photosynthesis of South American subtropical forests despite seasonal changes in leaf area index and air temperature. **Forests**, Basel, v. 5, p. 287-308, 2014.

DALLA-TEA, F.; JOKELA, E.J. Needlefall, canopy light interception, and productivity of young intensively managed slash and loblolly pine stands. **Forest Science**, Lawrence, v. 37, p. 1298-1313, 1991.

DECAGON DEVICES INC. **AccuPAR PAR/LAI Ceptometer Model LP-80**: Operator's Manual. Pullman, 2013. 78p.

DE PURY, D.G.G.; FARQUHAR, G.D. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 20, p. 537-557, 1997.

DUARTE, F.A.S. **Avaliação da madeira de Betula pendula, Eucalyptus globulus e de híbrido de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla destinadas à produção de polpa celulósica kraft**. 2006. 106p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

DUURSMA, R.A.; MÄKELÄ, A. Summary models for light interception and light-use efficiency of non-homogeneous canopies. **Tree Physiology**, Oxford, v. 27, p. 859-870, 2007.

DUURSMA, R.A.; FALSTER, D.S.; VALLADARES, F.; STERCK, F.J.; PEARCY, R. W.; LUSK, C.H.; SENDALL, K.M.; NORDENSTAHL, M.; HOUTER, N.C.; ATWELL, B.J.; KELLY, N.; KELLY, J.W.G.; LIBERLOO, M.; TISUUE, D.T.; MEDLYN, B.; ELLSWORTH, D.S. Light interception efficiency explained by two simple variables: a test using a diversity of small- to medium- sized woody plants. **New Phytologist**, Lancaster, v. 193, p. 397-408, 2012.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; RYAN, M.G. Introduction to the invited issue on carbon allocation of trees and forests [editorial]. **Tree Physiology**, Oxford, v. 32, p. 639-343, 2012

FAO. **Manual for building tree volume and biomass allometric equations**. From field measurements to prediction. Roma, 2012. 215p.

FORRESTER, D.I.; COLLOPY, J.J.; BEADLE, C.I.; BAKER, T.G. Effect of thinning, pruning and nitrogen fertiliser application on light interception and light-use-efficiency in a young *Eucalyptus nitens* plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 21-30, 2013.

FORRESTER, D.I. A stand-level light interception model for horizontally and vertically heterogeneous canopies. **Ecological modelling**, Amsterdam, v. 276, p. 14-22, Mar 2014.

GAMON, J.A.; SERRANO, L.; SURFUS, J.S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, Heidelberg, v. 122, p. 492-501, 1997.

GARRIGUES, S.; SHABANOV, N.V.; SWANSON, K.; MORISETTE, J.T.; BARET, F.; MYNENI, R.B. Intercomparison and sensitivity analysis of Leaf area Index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 1193-1209, 2008.

GOETZ, S.J.; PRINCE, S.D. Remote sensing of net primary production in boreal forest stands. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 78, p. 149-179, 1996.

GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S.F.B.; LIMA, W.P.; BRANCALION, P.H.S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J-P.; LACLAU, J-P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v. 301, p. 6-27, 2013.

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. (Ed.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba: IPEF, 2002. cap 1., p. 3-55.

GONZÁLEZ, J.A.; CALBÓ, J. Modelled and measured ratio of PAR to global radiation under cloudless skies. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 110, p. 319-325, 2002.

GOUDRIAAN, J. The bare bones of leaf-angle distributions in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 43, p. 155-169, 1988.

GOWER, S. T.; KUCHARIK, C.J.; NORMAN, J.M. Direct and Indirect Estimation of Leaf Area Index, f_{APAR} , and Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems. **Remote Sensing of the Environment**, New York, v. 70, p. 29-51, 1999.

GRIER, C.C.; LEE, K.M.; ARCHIBALD, R.M. Effect of urea fertilization on allometric relations in young Douglas-fir trees. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 14, p. 900-904 1984.

HAKAMADA, R.E. **Uso do inventário florestal como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em povoamentos clonais de *Eucalyptus***. 2012. 114 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

HILDEO, O.C. **Relações entre a radiação fotossinteticamente ativa e a radiação global em Piracicaba/SP**. 1994. 56p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

HILKER, T. HALL, F.G.; COOPS, N.C.; LYAPUSTIN, A. WANG, Y.J.; NESIC, Z.; GRANT, N.; BLACK, T.A.; WULDER, M.A.; KLJUN, N.; HOPKINSON, C.; CHASMER, L. Remote sensing of photosynthetic light-use efficiency across two forested biomes: Spatial scaling. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 114, n. 12, p. 2863-2874, 2010.

HIROSE, T. Development of the Monsi-Saeki theory on canopy structure and function. **Annals of Botany**, Oxford, v. 95, p. 483-494, 2005.

HUANG, N.; NIU, Z.; WU, C.Y.; TAPPERT, M.C.; Modeling net primary production of a fast-growing forest using a light use efficiency model. **Ecological modelling**, Amsterdam, v. 221, n. 24, p. 2938-2948, Dez 2010.

HUBBARD, R.M. STAPE, J.L.; RYAN, M.G.; ALMEIDA, A.C.; ROJAS, J.S.D. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing Eucalyptus plantations **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1714-1721, 2010.

HYER, E.J.; GOETZ, S.J. Comparison and sensivity analysis of instruments and radiometric methods for LAI estimation: assessments from a boreal forest site. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 122, n. 3/4, p. 157-174, Abr 2004.

IAC. **Manual de análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, 2001. 285p.

IBÁ. **Indicadores de desempenho do setor nacional de árvores plantadas referentes ao ano de 2014**. Brasília, 2015. 64p.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura, pecuária e abastecimento. Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET. NOTA TÉCNICA nº.001/2011. 11 p. Disponível em:

http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf. Acesso em 05 de Janeiro de 2014.

JANSEEN, P.H.M.; HEUBERGER, P.S.C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 83, p. 55-66, 1995.

JONCKHEERE, I.; FLECK, S.; NACKAERTS, K.; MUYSA, B.; COPPIN, P.; WEISS, M.; BARET, F. Review of methods for *in situ* leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 121, n. 1/2, p. 19-35, Jan 2004.

KING, D.A. The functional significance of leaf angle in *Eucalyptus*. **Australian Journal of Botany**, Collingwood, v. 45, p. 619-639, 1997.

KOBAYASHI, H.; RYU, Y.; BALDOCCHI, D.D.; WELLES, J.M.; NORMAN, J.M. On the correct estimation of gap fraction: How to remove scattered radiation in gap fraction measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 174-175, p. 170-183, 2013.

KOYAMA, K.; KIKUZAWA, K. Geometrical similarity analysis of photosynthetic light response curves, light saturation and light use efficiency. **Oecologia**, Heidelberg, v. 164, n.1, p. 53-63, Sep. 2010.

KUCHARIK, C.J. NORMAN, J.M.; GOWER, S.T. Measurements of branch area adjusting leaf area index indirect measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 91, p. 61-88, 1998.

KUCHARIK, C.J. NORMAN, J.M.; GOWER, S.T. Characterization of radiation regimes in nonrandom forest canopies: theory, measurements, and a simplified modeling approach. **Tree Physiology**, Oxford, v. 19, p. 695-706, 1999.

LANG, A.R.G. Leaf area and average leaf angle from transmittance of direct sunlight. **Australian Journal of Botany**, Collingwood, v. 34, p. 349-355, 1986.

LANG, A.R.G.; YUEQUIN, X. Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 37, p. 229-243, 1986.

LANG, A.R.G. Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 41, p. 179-186, 1987.

LACLAU, J-P.; SILVA, E.A.; LAMBAIS, G.R.; BERNOUX, M.; le MAIRE, G.; STAPE, J.L.; BOUILLET, J-P.; GONÇALVES, J.L.M.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. **Plant Science**, Lausanne, v. 4, p. 1-12, 2013.

LANDSBERG, J.J.; HINGSTON, F.J. Evaluating a simple radiation/dry matter conversion model using data from *Eucalyptus globulus* plantations in Western Australia. **Tree Physiology**, Oxford, v. 16, n. 10, p. 801-808, Out 1996.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 95, p. 209-228, 1997.

LANDSBERG, J.J.; SANDS, P.J. **Physiological ecology of forest production: principles, processes, and models**. London: Academic Press, 2011. 331p.

LAW, B.E.; CESCATTI, A.; BALDOCCHI, D.D. Leaf area distribution and radiative transfer in open-canopy forests: implications for mass and energy exchange. **Tree Physiology**, Oxford, v. 21, p. 777-787, 2001.

LEBLANC, S.G.; CHEN, J.M. A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 110, p. 125-139, 2001.

LEITE, H.G.; ANDRADE, V.C.L. Importância das variáveis altura dominante e altura total em equações hipsométricas e volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 301-310, 2003.

LEUNING, R.; WANG, Y-P.; CROMER, R. N. Model simulations of spatial distribution and daily totals of photosynthesis in *Eucalyptus grandis* canopies. **Oecologia**, Heidelberg, v. 88, p. 494-503, 1991.

LEUNING, R.; KELLIHER, F.M. DEPURY, D.G.G.; SCHULZE, E.D. Leaf nitrogen, photosynthesis, conductance and transpiration – scaling from leaves to canopies. **Plant Cell and Environment**, Oxford, v. 18, n. 10, p. 1183-1200, Out 1995.

le MAIRE, G.; MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y.; STAPE, J.L.; PONZONI, F.J. Calibration of a species-specific spectral vegetation index for leaf area index (LAI) monitoring: Example with MODIS reflectance time-series on *Eucalyptus* plantations. **Remote Sensing**, Basel, v. 4, p. 3766-3780, 2012.

le MAIRE, G.; NOUVELLON, Y.; CHRISTINA, M.; PONZONI, F.J.; GONÇALVES, J.L.M.; BOUILLET, J-P.; LACLAU, J-P. Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of single and mixed species *Eucalyptus* and *Acacia mangium* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 31-42, 2013.

LI-COR INC. **LAI-2000 Plant Canopy Analyzer Instruction Manual**. Lincoln, 2003. 175p.

MÄKELÄ, A.; VANNINEN, P. Impact of size and competition on tree form and distribution of above-ground biomass in Scots pine. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 28, p. 216-227, 1998.

MARRICHI, A.H.C. **Caracterização da capacidade fotossintética e da condutância estomática em sete clones comerciais de Eucalyptus e seus padrões de resposta ao déficit de pressão de vapor**. 2009. 105 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2009.

MARSDEN, C.; le MAIRE, G.; STAPE, J.L.; SEEN, D.L.; ROUPSARD, O.; CABRAL, O.; EPRON, D.; LIMA, A.M.N.; NOUVELLON, Y. Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n.9, p. 1741-1753, 2010.

MATTOS, E.M. **Monitoramento climático de diferentes regiões de produção florestal e suas implicações em termos dos estresses térmico, hídrico e biológico**. 57p. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Florestal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

McCREE, K.J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 10, p. 443-453, 1972.

MEDLYN, B.E. Physiological basis of the light use efficiency model. **Tree Physiology**, Oxford, v. 18, n. 3, p. 167-176, Mar 1998.

MELIS, A. Solar energy conversion efficiencies in photosynthesis: Minimizing the chlorophyll antennae to maximize efficiency. **Plant Science**, Lausanne, v. 177, n. 4, p. 272-280. Oct 2009.

MITCHELL, P.J.; O'GRADY, A.P.; TISSUE, D.T.; WHITE, D.A.; OTTENSCHLAEGGER, M.L.; PINKARD, E.A. Drought response strategies define the relative contributions of hydraulic dysfunction and carbohydrate depletion during tree mortality. **New Phytologist**, Lancaster, v. 197, p. 862-872, 2013.

MONTEITH, J.L. Solar-radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 9, n. 3, p. 747-766, 1972.

MONTEITH, J.L. Climate and efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences**, London, v. 281, n. 980, p. 277-294, 1977.

MONSI, M.; SAEKI, T. On the factor light in plant communities and its importance for matter-production. **Annals of Botany**, Oxford, v. 95, p. 22-52, 2005.

NETO, C.J.G. **Calibração do uso de fotos hemisféricas, do LAI – 2000 e do Ceptômetro para estimativa do Índice de Área Foliar em plantações de Eucalyptus**. 2007. 62p. Estágio profissionalizante em Engenharia Florestal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

NILSON, T. Theoretical analysis of frequency of gaps in plant stands. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 8, n. 1, p. 25-38, 1971.

NILSON, T. Inversion of gap frequency data in forest stands. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 98-99, p. 437-448, 1999.

NIINEMETS, U. Components of leaf dry mass per area – thickness and density – alter leaf photosynthetic capacity in reverse directions in woody plants. **New Phytologist**, Lancaster, v. 144, p. 35-47, 1999.

NORMAN, J.M.; JARVIS, P.G. Photosynthesis in Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) IV. Radiation penetration theory and a test case. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 12, p. 839-878, 1975.

NOUVELLON, Y.; BÉGUÉ, A.; MORAN, M.S.; SEEN, D. Lo.; RAMBAL, S.; LUQUET, D.; CHEHBOUNI, G. INOUE, Y. PAR extinction in shortgrass ecosystems: effects of clumping, sky conditions and soil albedo. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 105, p. 21-41, 2000.

NOUVELLON, Y.; LACLAU, J-P.; EPRON, D.; KINANA, A.; MABIALA, A.; ROUPSARD, O.; BONNEFOND, J-M.; le MAIRE, G.; MARSDEN, C.; BONTEMPS, J-D.; SAINT-ANDRÉ, L. Within-stand and seasonal variations of specific leaf area in a clonal Eucalyptus plantation in the Republic of Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1796-1807, 2010.

NOUVELLON, Y.; LACLAU, J-P.; EPRON, D.; le MAIRE, G.; BONNEFOND, J-M.; GONÇALVES, J. L. M.; BOUILLET, J-P. Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil. **Tree Physiology**, Oxford, v. 32, p. 680-695, 2012.

OLIVAS, P.C.; OBERBAUER, S.F.; CLARK, D.B.; CLARK, D.A.; RYAN, M.G.; O'BRIEN, J.J.; ORDONEZ, H. Comparison of direct and indirect methods for assessing leaf area index across a tropical rain forest landscape. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 177, p. 110-116, 2013.

OTTO, M.S.G.; HUBBARD, R.M.; BINKLEY, D.; STAPE, J.L. Dominant clonal *Eucalyptus grandis* x *urophylla* trees use water more efficiently. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 328, p. 117-121, 2014.

PALLET, R.N.; SALE, G. The relative contributions of tree improvement and cultural practice toward productivity gains in *Eucalyptus* pulpwood stands. . **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1/2, p. 33-43, May 2004.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing v. 3.3**. Vienna, 2014. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: 09 Out 2014

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente ExcelTM para cálculos de Balanços Hídricos: Normal, Sequencial, de Cultura e de Produtividade Real e Potencial, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133- 137, 2002.

ROSS, J. **The radiation regime and architecture of plant stands**. 2nd ed. The Hague: Dr W. Junk Publishers. 1981. 388p.

ROUJEAN, J.L. A tractable physical model of shortwave radiation interception by vegetative canopies. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 101 (D5), p. 9523-9532, 1996.

RUNYON, J.; WARING, R.H.; GOWARD, S.N.; WELLES, J.N. Environmental limits on net primary production and light-use efficiency across the Oregon transect. **Ecological Applications**, Washington, v. 4, p. 226-237, 1994.

RYAN, M.G.; BINKLEY, D.; STAPE, J.L. Why don't our stands grow even faster? Control of production and carbon cycling in eucalypt plantations. **Southern Forests**, New York, v. 70, n. 2, p. 99-104, 2008.

RYAN, M.G.; STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, R.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.; LIMA, A.M.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; SILVA, G.; ANDRADE, H.; ALVES, J.M. Factors controlling *Eucalyptus* productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1695-1703, 2010.

RYAN, M.G. Unknowns in whole tree Physiology: how to make progress for clonal Eucalyptus forests. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTS. 2011. Porto Seguro. **Proceedings...** Porto Seguro, 2011. p. 47-48.

SANDS, P.J.; LANDSBERG, J.J. Parameterization of 3-PG for plantation grown Eucalyptus globulus. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 163, p. 273-292, 2002.

SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; ALFONSI, R.R.; CARAMORI, P.H.; SWART, S. **Balanços hídricos climatológicos de 500 localidades brasileiras**. Piracicaba: Núcleo de Monitoramento Agroclimático. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/nurma.html>, 2001. Acesso em: 10 de abril de 2013.

SYSTAT SOFTWARE. **SigmaPlot v. 12.0**. San Jose. Disponível em: www.sigmaplot.com.

SILVA, P.H.M.; MIRANDA, A.C.; FURTADO, E.L.; STAPE, J.L.; ALVARES, C.A.; SENTELHAS, P.C.; MORI, E.S.; SEBBEN, A.M. Selecting for rust (*Puccinia psidii*) resistance in *Eucalyptus grandis* in São Paulo State, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 303, p. 91-97, 2013.

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

SCHUMACHER, F.X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.

SPITTERS, C.J.T.; TOUSSAINT, H.A.J.M.; GOUDRIAAN, J. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis Part I. Components of incoming radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 38, p. 217-229, 1986.

SPRUGEL, D.J. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. **Ecology**, New, York, v. 64, p. 209-210, 1983.

STAPE, J.L.; RYAN, M.G.; BINKLEY, D. Testiing the utility of 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* X *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 219-234, 2004.

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

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; FONSECA, S.; LOOS, R.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.; LIMA, A.M.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; SILVA, G.; ANDRADE, H.; ALVES, J.M. The Brazil Eucalyptus potential productivity project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1686–1694, 2010.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; GRATTAPAGLIA, D.; CAMPOE, O.; ALVARES, C.; GOMES, F.; MATTOS, E.; OTTO, M.; HAKAMADA, R.; MORAES, M.T. Fatores hídricos e as decisões de silvicultura, de melhoramento e de proteção na eucaliptocultura. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 3., 2014, Campinas. **Anais...** Curitiba: Embrapa Florestas, 2014. p. 81-98.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. 5th ed.. Sunderland: Sinauer Associates, 2010. 782p.

THORNTONWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.

WANG, Y.P.; JARVIS, P.G. Description and validation of an array model – MAESTRO. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 51, p. 257-280, 1990.

WANG, W.M.; LI, Z.L.; SU, H.B. Comparison of leaf angle distribution functions: Effects on extinction coefficient and fraction of sunlit foliage. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 143, n. 1-2, p. 106-122, Mar 2007.

WEISS, M.; BARET, F.; SMITH, G.J.; JONCKHEERE, I.; COPPIN, P. Review of methods for *in situ* leaf area index determination Part II. Estimation of LAI, error and sampling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 121, p. 37-53, 2004.

WILLMOTT, C.J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performances. **Climate Research**, Oldendorf, v. 30, n. 13, p. 79-82, 2005.

WILLMOTT, C.J.; ROBESON, S.M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, Reading, v. 32, p. 2088-2094, 2012.

WHITFORD, K.R.; COLQUHOUN, I.J.; LANG, A.R.G.; HARPER, B.M. Measuring leaf area index in a sparse eucalypt forest: a comparison of estimates from direct measurement, hemispherical photography, sunlight transmittance and allometric regression. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 74, p. 237-249, 1995.

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C.L. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 113-140, 2004.

XU, C-Y.; SALIH, A.; GHANNOUM, O.; TISSUE, D.T. Leaf structural characteristics are less important than leaf chemical properties in determining the response of leaf mass per area and photosynthesis of Eucalyptus saligna to industrial-age changes in [CO₂] and temperature. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 63, n. 15, p. 5829-5841, 2012.

ZHANG, L.; HU, Z.; FAN, J.; ZHOU, D.; TANG, F. A meta-analysis of the canopy light extinction coefficient in terrestrial ecosystems. **Frontiers of Earth Science**, New York, v. 8, n. 4, p. 599-609, 2014.

ZIMMERMANN, U.; SCHNEIDER, H.; WEGNER, L.H.; HAASE, A. Water ascent in tall trees: does evolution of land plants rely on a highly metastable state? **New Phytologist**, Lancaster, v. 162, p. 575-615, 2004.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Coeficientes do modelo hipsométrico dado pela equação 21

Clone	β_0	β_1	β_2
A1	-2,27181	0,515551	0,676956
B2	-1,69176	0,31892	0,781386
C3	-0,21283	0,322734	0,671217
D4	-1,56193	0,337346	0,786805
E5	-2,11396	0,367925	0,782321
F6	-0,88483	0,533445	0,575662
G7	-1,50132	0,535496	0,58362
H8	-1,79703	0,43165	0,701153
I9	-0,66777	0,435085	0,629929
K2	-0,80117	0,407415	0,657214
J1	-1,69524	0,699629	0,548248
L3	-0,88851	0,659478	0,443367
M4	-0,93104	0,457071	0,581244
N5	-0,85596	0,306325	0,759358
P7	-1,3193	0,469377	0,666686
O6	-3,2362	0,987903	0,325251
Q8	-1,46655	0,209216	0,891352
R9	-2,57264	0,472709	0,754155

APÊNDICE B – Coeficientes do modelo de equação de biomassa do fuste dado pela equação 19

Clone	β_0	β_1	β_2
A1	-4,30356		
B2	-4,32768		
C3	-4,34235		
D4	-4,29000		
E5	-4,45302		
F6	-4,35115		
G7	-4,26185		
H8	-4,20024		
I9	-4,09399	1,85336	1,14136
K2	-4,34090		
J1	-4,30212		
L3	-4,28008		
M4	-4,18724		
N5	-4,20500		
P7	-4,06824		
O6	-4,33914		
Q8	-4,31514		
R9	-4,35910		

APÊNDICE C – Coeficientes do modelo de predição da altura das plantas dominantes, dado pela equação: $H_{dom} = \beta_0 + \beta_1(\ln(Idade))$, sendo H_{dom} igual a média da altura das plantas dominantes em metros e a idade em meses

Clone	β_0	β_1
A1	-28,6614	13,93895
B2	-27,4239	13,34869
C3	-23,4243	11,67533
D4	-28,0696	13,62426
E5	-29,0833	13,71327
F6	-25,0286	12,17756
G7	-28,8501	12,99692
H8	-24,5975	12,40746
I9	-20,9158	10,78644
K2	-20,4384	10,89883
J1	-32,8372	15,20597
L3	-28,4069	13,28157
M4	-25,9887	11,87850
N5	-29,1896	13,27768
P7	-19,5651	9,538460
O6	-32,8619	15,28738
Q8	-30,6872	14,01199
R9	-34,9102	15,64053

APÊNDICE D – Resultados de densidade básica aos 28 meses por material genéticoi, sendo apresentados os valores mínimos, médios, máximos, desvio padrão (s) e número de indivíduos amostrados (n) por clone

Clone	Densidade basica (kg m ⁻³)				
	mínimo	média	máximo	s	n
A1	343,1	386,2	425,0	30,7	6
B2	356,4	405,2	471,2	41,4	6
C3	394,0	410,5	425,1	11,3	6
D4	368,8	393,6	410,9	15,8	6
E5	365,3	379,2	392,9	10,2	6
F6	387,2	400,9	411,6	12,5	3
G7	429,5	434,6	437,7	4,5	3
H8	457,3	464,7	476,4	10,2	3
I9	471,8	479,8	484,3	7,0	3
K2	373,6	396,8	422,7	21,1	6
J1	383,8	405,0	439,3	20,0	6
L3	398,0	427,4	466,0	23,1	6
M4	414,7	434,2	446,2	17,0	3
N5	416,6	435,1	452,0	13,0	6
P7	391,7	424,8	448,0	22,6	6
O6	346,4	385,7	431,2	31,0	6
Q8	373,8	424,0	458,3	30,1	6
R9	332,4	398,8	464,4	57,9	6
Total	332,4	415,9	484,3	21,1	93

APÊNDICE E – Valores resumidos de índice de área foliar efetivo (L_e (LAI-2000)) contidos na figura 14. Sendo apresentados os valores mínimos, médios, máximos, desvio padrão (s) e número de períodos amostrados (n) por clone

Clone	Índice de area foliar efetivo (LAI2000 - m ² m ⁻²)				
	mínimo	média	máximo	s	n
A1	2,86	3,80	4,45	0,42	19
B2	3,08	3,80	4,49	0,34	19
C3	1,78	2,18	2,68	0,29	19
D4	3,21	4,33	5,44	0,52	19
E5	2,82	3,60	4,23	0,42	19
F6	1,51	2,25	2,85	0,40	19
G7	4,05	4,67	5,36	0,33	19
H8	3,16	4,31	5,07	0,55	19
I9	1,96	2,22	2,74	0,18	19
K2	3,11	3,41	4,12	0,28	19
J1	1,55	2,01	2,73	0,28	19
L3	1,74	2,30	2,81	0,31	19
M4	3,21	4,02	4,65	0,41	19
N5	2,74	3,62	4,41	0,41	19
P7	2,48	2,93	3,62	0,33	19
O6	2,43	2,98	3,62	0,34	19
Q8	3,82	4,48	5,04	0,34	19
R9	2,22	3,28	4,26	0,50	19
Total	1,51	3,34	5,44	0,37	342

APÊNDICE F – Valores de índice de área foliar destrutivo (L) e efetivo (L_e), estimados por meio da amostragem destrutiva e pelos aparelhos LAI-2000 ($L_{e(LAI-2000)}$) e LP-80 ($L_{e(LP-80)}$) durante o período da amostragem destrutiva. K representa o coeficiente de extinção de luz calculado pela Eq. 27 dos clones amostrados

Clone	L	$L_{e(LP-80)}$	$L_{e(LAI-2000)}$	K
A1	4,98	4,44	3,97	0,54
B2	5,75	3,46	3,38	0,39
C3	4,20	2,24	1,95	0,31
D4	5,94	4,10	3,88	0,44
E5	4,13	3,52	3,26	0,52
K2	5,03	3,12	3,14	0,41
J1	2,92	1,78	1,86	0,42
L3	4,00	1,98	2,46	0,36
N5	5,77	3,01	3,36	0,37
P7	5,92	2,75	2,58	0,29
O6	4,48	3,06	2,91	0,44
Q8	5,00	4,57	4,26	0,58
Mínimo	2,92	1,78	1,86	0,29
Média	4,84	3,17	3,08	0,42
Máximo	5,94	4,57	4,26	0,58
CV (%)	19,3	28,7	24,8	20,8

APÊNDICE G – Valores médios de biomassa seca do lenho, casca, galhos vivos (GV), galhos mortos (GM), folhas e raízes grossas (até 1 cm) dos clones para cada um dos compartimentos amostrados

Clone	Lenho	Casca	GV	GM	Folha	Raiz
				kg		
A1	32,1	4,9	6,0	2,0	4,6	7,7
B2	37,8	5,3	5,8	2,2	5,6	15,8
C3	26,6	4,4	4,2	1,4	4,2	9,5
D4	33,3	4,2	6,5	2,9	5,4	-
E5	27,4	4,7	5,7	2,4	3,6	-
F6	27,1	4,6	-	-	-	-
G7	25,1	4,3	-	-	-	-
H8	37,1	5,5	-	-	-	-
I9	32,6	5,5	-	-	-	-
K2	24,5	3,8	4,9	2,0	4,6	7,6
J1	26,3	3,7	3,9	1,1	3,7	11,0
L3	29,2	3,4	4,0	1,2	6,1	-
M4	19,7	3,3	-	-	-	-
N5	29,6	5,0	5,5	2,1	6,5	9,2
P7	12,3	3,4	4,0	1,1	4,8	5,1
O6	22,7	3,3	5,9	1,3	3,8	-
Q8	25,9	4,2	7,0	3,0	5,5	-
R9	30,7	3,5	-	-	-	-