

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**INTERCEPTAÇÃO DA LUZ E SIMULAÇÃO DA
FOTOSÍNTESE EM CAJUEIRO ANÃO**

THIAGO FRANCO DUARTE

Orientador: PROF. DR. JOSÉ HOLANDA CAMPELO JUNIOR

**Cuiabá, MT
Março de 2016**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**INTERCEPTAÇÃO DA LUZ E SIMULAÇÃO DA
FOTOSSÍNTESE EM CAJUEIRO ANÃO**

THIAGO FRANCO DUARTE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Física Ambiental.

JOSÉ HOLANDA CAMPELO JUNIOR

Cuiabá, MT
Março de 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

D812i Duarte, Thiago Franco.
INTERCEPTAÇÃO DA LUZ E SIMULAÇÃO DA
FOTOSSÍNTESE EM CAJUEIRO ANÃO
Thiago Franco Duarte. -- 2016
104 f. : il. color. ; 30 cm.
Orientador: José Holanda Campelo Junior.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso,
Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física
Ambiental, Cuiabá, 2016.
Inclui bibliografia.

1. transferência de radiação. 2. lei de Lambert-Beer. 3.
coeficiente de extinção da luz. 4. modelagem de culturas. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: INTERCEPTAÇÃO DA LUZ E SIMULAÇÃO DA FOTOSÍNTESE EM CAJUEIRO ANÃO

AUTOR: THIAGO FRANCO DUARTE

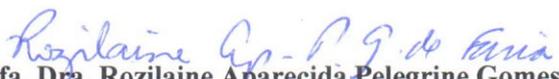
Tese de Doutorado defendida e aprovada em 08 de março de 2016, pela comissão julgadora:


Prof. Dr. José Holanda Campelo Júnior
Orientador
Faculdade de Agronomia e Medicina
Veterinária - UFMT


Prof. Dr. Francisco de Almeida Lobo
Examinador Interno
Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária
UFMT


Prof. Dra. Carmen Eugenia Rodriguez
Ortiz Examinadora Interna
Instituto de Biociências – UFMT


Prof. Dra. Carla Maria Abido Valentini
Examinadora Externa
Instituto Federal de Mato Grosso – IFMT


Prof. Dra. Rozilaine Aparecida Pelegrine Gomes de Faria
Examinadora Externa
Instituto Federal de Mato Grosso - IFMT

DEDICATÓRIA

*Ao meu pai, que abriu o
caminho para que eu
chegasse até aqui.*

AGRADECIMENTOS

- Gostaria de expressar meus agradecimentos a todas as pessoas que fizeram parte do trabalho e aquelas que de alguma forma colaboraram e possibilitaram a sua concretização. Em especial, no âmbito profissional, destaco meus agradecimentos:
- Ao professor José Holanda Campelo Júnior, pela orientação, grata oportunidade de trabalho e crescimento, e pela compreensão nos momentos necessários.
- Ao professor Francisco Lobo, pelo auxílio nos momentos que precisei, em especial nas medições de fotossíntese.
- À professora Luciana Sanches pela disponibilização do ceptômetro durante o estudo.
- Aos colegas de trabalho Victor Arlindo e Fernando Pivetta.
- Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental.
- Ao coordenador do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental Prof. José de Souza Nogueira.
- À banca examinadora de qualificação e defesa de doutorado pelas contribuições necessárias à melhoria da tese.
- À CAPES pela bolsa Demanda Social recebida e FAPEMAT pelo auxílio financeiro.
- No âmbito pessoal/familiar: esposa, pais, irmãos e demais - para estes, as palavras não cabem no papel.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1.1. INTERCEPTAÇÃO DA LUZ	3
1.1.1. A transferência da radiação em dosséis horizontalmente homogêneos	6
1.1.2. A transferência da radiação em dosséis heterogêneos	8
2. MATERIAL E MÉTODOS	17
2.1. INTERCEPTAÇÃO DA LUZ	17
2.1.1. <i>Validação do modelo de Charles-Edwards & Thornley (1973)</i>	17
2.1.2. <i>Caracterização do índice de área foliar</i>	21
2.1.3. <i>Simulação da interceptação da luz com o modelo de Charles-Edwards & Thorpe (1976)</i>	22
2.1.4. <i>Um novo modelo geométrico</i>	22
2.2. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE ÁREA FOLIAR	24
2.3. CURVA DE RESPOSTA DA FOTOSÍNTESE À LUZ	25
2.4. SIMULAÇÃO DA FOTOSÍNTESE PARA PLANTA ISOLADA	28
2.4.1. Geometria da copa	29
2.4.2. A matriz de posições no interior da copa	29
2.4.3. O volume dos segmentos	30
2.4.4. Penetração e espalhamento da radiação solar	31
2.4.5. Partição da radiação solar	34
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
3.1. INTERCEPTAÇÃO DA LUZ	37
3.2. EFEITO DAS CARACTERÍSTICAS DO POMAR NA INTERCEPTAÇÃO DA LUZ	48

3.3. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE ÁREA FOLIAR	50
3.4. CURVAS DE RESPOSTA DA FOTOSÍNTESE À LUZ	52
3.5. SIMULAÇÃO DA DENSIDADE DE ÁREA FOLIAR	62
3.6. DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOBRE A ÁREA DAS FOLHAS E SIMULAÇÃO DA FOTOSÍNTESE	63
3.7. DISTRIBUIÇÃO GEOMETRICAMENTE DESUNIFORME DA DENSIDADE FOLIAR NO INTERIOR DA COPA	71
3.8. COPA COM FORMATO HEMI-ELIPSOIDAL	74
4. CONCLUSÕES	76
5. BIBLIOGRAFIAS.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relação idealizada entre a reflexão, transmissão e absorção de uma folha verde (MONTEITH & UNSWORTH, 2013).	4
Figura 2. Algumas formas da copa que podem ser utilizadas no modelo CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973).	9
Figura 3. Adaptação do modelo original para simulação da interceptação da luz em fileiras de plantio. Adaptado de CHARLES-EDWARDS & THORPE (1976).	10
Figura 4. Exemplos de trajetória da luz em plantas isoladas segundo o modelo de CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973).	11
Figura 5. Representação estrutural das árvores no modelo de GRACE <i>et al.</i> , (1987a,b). A. Secção transversal vertical. B Secção transversal horizontal da primeira camada no topo da copa.	14
Figura 6. Representação estrutural de uma planta no modelo de NORMAN & WELLES (1983) com diferentes densidades de área foliar (ρL e $\rho' L$) e de ramos (ρb e $\rho' b$) em duas regiões no interior da copa.	15
Figura 7. Representação da copa por elipsoide de revolução, e subdividida em pequenos elementos de volume conforme THORPE et al., (1978).	16
Figura 8. Matriz de pontos no interior da copa obtidos pelo modelo de THORPE et al., (1978).	16
Figura 9 Medição da luz abaixo da copa de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.)	18
Figura 10. Medição da luz incidente acima da copa de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.).	18
Figura 11. Vista superior do pomar descrito pela equação 32. Os parâmetros p e h descrevem o espaçamento entre plantas e entre linhas do pomar, respectivamente. Círculos representam as plantas do pomar. Círculo destacado representa a planta analisada.	23
Figura 12. Medição da curva de resposta da fotossíntese à luz em folha de sombra (A) e de sol (B) em cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.).	26
Figura 13. Geometria da copa pelo modelo de Thorpe et al., (1978), demonstrado as três elipsoides concêntricas com pontos de amostragens no interior de cada elipsoide.	30
Figura 14. Demonstração da secção i com área calculada pela equação 51.	31
Figura 15. Índice de área foliar de plantas de cajueiro anão, clone FAGA 1 (Planta1, Planta2 e Planta3) entre 27/08/2012 (Dia Juliano 240) e 26/06/2013 (Dia juliano 177) com frequência de medição mensal. Santo Antônio de Leverger - MT. Dados correspondentes a médias de quatro leituras distantes em aproximadamente 90° entre si.	39

- Figura 16.** Radiação fotossinteticamente ativa transmitida abaixo da copa da planta 1 (A. e D.), planta 2 (B. e E.) e planta 3 (C. e F.) de cajueiro anão, simulada e medida com sensores pontuais a cada 60 min entre 09:00 até 16:00 h, no período de 03/09/2012 (Dia Juliano 247) a 09/11/2012 (Dia Juliano 314), com frequência semanal. Santo Antônio de Leverger-MT. Regressões significativas ($P < 0,05$). 41
- Figura 17.** Radiação fotossinteticamente ativa transmitida abaixo da copa da planta 1 (A. e D.), planta 2 (B. e E.) e planta 3 (C. e F.) de cajueiro anão, simulada e medida com sensores pontuais a cada 120 min, entre 09:00 até 16:00 h, no período de 03/09/2012 (Dia Juliano 247) a 09/11/2012 (Dia Juliano 314), com frequência semanal. Santo Antônio de Leverger-MT. Regressões significativas ($P < 0,05$). 42
- Figura 18.** Radiação fotossinteticamente ativa transmitida abaixo da copa da planta 1 (A. e D.), planta 2 (B. e E.) e planta 3 (C. e F.) de cajueiro anão, simulada e medida com sensores pontuais a cada 180 min, entre 09:00 até 16:00 h, no período de 03/09/2012 (Dia Juliano 247) a 09/11/2012 (Dia Juliano 314), com frequência semanal. Santo Antônio de Leverger-MT. Regressões significativas ($P < 0,05$). 43
- Figura 19.** Radiação fotossinteticamente ativa transmitida abaixo da copa da planta 1 (A. e D.), planta 2 (B. e E.) e planta 3 (C. e F.) de cajueiro anão, simulada e medida com sensores pontuais a cada 240 min, entre 09:00 até 16:00 h, no período de 03/09/2012 (Dia Juliano 247) a 09/11/2012 (Dia Juliano 314), com frequência semanal. Santo Antônio de Leverger-MT. Regressões significativas ($P < 0,05$). 44
- Figura 20.** Radiação fotossinteticamente ativa transmitida abaixo da copa da planta 1 (A. e D.), planta 2 (B. e E.) e planta 3 (C. e F.) de cajueiro anão, simulada e medida com sensores pontuais a cada 300 min, entre 09:00 até 16:00 h, no período de 03/09/2012 (Dia Juliano 247) a 09/11/2012 (Dia Juliano 314), com frequência semanal. Santo Antônio de Leverger-MT. Regressões significativas ($P < 0,05$). 45
- Figura 21.** Valores medidos com sensores pontuais de radiação fotossinteticamente ativa incidente e transmitida pela copa das plantas de cajueiro anão utilizadas no estudo, nos dias 29/10/2012 e 09/11/2012. Santo Antônio de Leverger-MT. Dados correspondentes a médias a cada 10 min. 47
- Figura 22.** Efeito da variação do azimute da linha de plantio, na simulação da fração da radiação da solar absorvida, para as latitudes de $0^\circ, -5^\circ, -10^\circ$ e -15° . Simulação corresponde ao solstício de verão no hemisfério sul..... 49
- Figura 23.** Efeito da variação do azimute da linha de plantio, na média diária da fração da radiação da solar absorvida, para as latitudes de $0^\circ, -5^\circ, -10^\circ$ e -15° . Simulação corresponde ao solstício de verão no hemisfério sul..... 49
- Figura 24.** Efeito da variação do espaçamento da linha e entrelinha de plantio, na média diária da fração da radiação da solar transmitida. Simulação corresponde ao solstício de verão no hemisfério sul. 50
- Figura 25.** Densidade de área foliar ($m^2 m^{-3}$) de cajueiro anão determinado pelo método padrão e pelo método dos lançamentos entre o período de 19/12/12 à 04/12/13 em Santo Antônio de Leverger, MT. 52

Figura 26. Densidade de área foliar ($m^2 m^{-3}$) determinado pelo método padrão e transmitância da luz em cajueiro anão (A); Comparação entre DAF determinado pelo método padrão e pelo método da transmitância da luz (B). Medições realizadas entre o período de 29/04/12 à 04/12/13 em Santo Antônio de Leverger, MT.	52
Figura 27. Ajuste de modelos de resposta da fotossíntese à luz em folhas de sol do clone FAGA 1 de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.). SSE: soma de quadrado do erro. Santo Antônio de Leverger-MT.	54
Figura 28. Ajuste de modelos de resposta da fotossíntese à luz em folhas de sol do clone FAGA 10 de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.). Santo Antônio de Leverger-MT.	55
Figura 29. Ajuste de modelos de resposta da fotossíntese à luz em folhas de sol do clone FAGA 11 de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.). Santo Antônio de Leverger-MT.	56
Figura 30. Ajuste do modelo de resposta da fotossíntese à luz em folhas de sombra dos clones FAGA 1 (A), FAGA10 (B) e FAGA11 (C) de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.). Santo Antônio de Leverger-MT.	57
Figura 31. Eficiência quântica em função da luz em folhas de sol (A) e de sombra (B) nos clones FAGA1, FAGA 10 e FAGA11 de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.). Santo Antônio de Leverger-MT.	61
Figura 32. Simulação da densidade de área foliar para três regiões no interior da copa. Corte longitudinal interceptando o centro da copa.	62
Figura 33. Distribuição da área foliar (%) de folhas de sol e folhas de sombra de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.) nas classes de irradiância para a elipse concêntrica 1 (A, D, G e J), 2 (B, E, H e K) e 3 (C, F, I e L) em quatro instantes, simulados para o dia 03/09/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.	63
Figura 34. Energia distribuída por classe de irradiância (W) em folhas de sol e sombra de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.) para a elipse concêntrica 1 (A, D, G e J), 2 (B, E, H e K) e 3 (C, F, I e L) em quatro instantes, simulados para o dia 03/09/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.	64
Figura 35. Fotossíntese líquida ($\mu\text{mol} (\text{CO}_2) s^{-1}$) distribuída por classe de irradiância em folhas de sol e sombra de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.) para a elipse concêntrica 1 (A, D, G e J), 2 (B, E, H e K) e 3 (C, F, I e L) em quatro instantes, simulados para o dia 03/09/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.	65
Figura 36. Fotossíntese líquida ao longo do dia ($\mu\text{mol} (\text{CO}_2) planta s^{-1}$) em folhas de sol e sombra de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.) para a elipse concêntrica 1 (A), 2 (B) e 3 (C), simulados para o dia 03/09/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.	66
Figura 37. Radiação fotossinteticamente ativa, fração direta e fração difusa (A), fotossíntese líquida total de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.) ao longo do dia ($\mu\text{mol} (\text{CO}_2) planta s^{-1}$) e fração da fotossíntese total (B). Simulação para os dias 03/09/2012 e 08/10/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.	67

Figura 38. Área das folhas (%) de sombra (A e C) e de sol (B e D) de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.) distribuídas nas classes de irradiância nos dias 03/09/2012 e 08/10/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.....	68
Figura 39. Relação entre a fotossíntese líquida total ($\mu\text{mol}(\text{CO}_2)$ planta s^{-1}) de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.) e a fração difusa da radiação global. Simulação entre o período de 03/09/2012 a 09/11/2012, com dados a cada trinta minutos. Santo Antônio de Leverger-MT.	69
Figura 40. Fotossíntese líquida ($\mu\text{mol}(\text{CO}_2)$ s^{-1}) ao longo de toda superfície da copa de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.) para três elipsoides concêntricas em quatro instante do dia (09:50, 11:20, 12:20 e 16:20, hora local). Vista representa corte longitudinal passando pelo centro da copa. Simulação para o dia 03/09/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.	70
Figura 41. Fotossíntese líquida ($\text{mol}(\text{CO}_2)$ planta $^{-1}$ h $^{-1}$) de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.) entre o período de 03/09/2012 a 09/11/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.	71
Figura 42. Fotossíntese líquida ($\text{mol}(\text{CO}_2)$ planta $^{-1}$ h $^{-1}$) de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.) entre o período de 03/09/2012 a 09/11/2012 considerando apenas a área foliar da elipse mais externa. Santo Antônio de Leverger-MT.	73
Figura 43. Fotossíntese líquida total e sua respectiva variação ($\text{g}(\text{CO}_2)$ planta $^{-1}$) de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.) para o dia 03/09/2012 considerando a distribuição da densidade foliar geometricamente uniforme e desuniforme (seção externa da copa). Santo Antônio de Leverger-MT.	73
Figura 44. Demonstração do formato hemi-elipsoidal da copa de cajueiro anão (<i>Anacardium occidentale</i> L.) com distribuição desuniforme da área foliar dentro da copa (A). Seção vertical utilizada no cálculo de f_{gi} para copa com formato hemi-elipsoidal (B). Áreas em verde e branco representam locais com presença e ausência de folhas, respectivamente.	74
Figura 45. Fotossíntese líquida ($\text{g}(\text{CO}_2)$ planta $^{-1}$ h $^{-1}$) de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.) simulados para três formatos geométricos da copa, entre o período de 03/09/2012 a 09/11/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.	75
Figura 46. Presença de folhas no interior da copa de cajueiro anão (<i>A. occidentale</i> L.).	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros da copa de cajueiro anão adotados no modelo de interceptação da luz em Santo Antônio de Leverger-MT	17
Tabela 2. Valores médios da densidade de área foliar dos clones FAGA 1, FAGA 10 e FAGA 11 de cajueiro anão entre 24/08/2012 e 23/11/2012 com frequência de medição mensal	38
Tabela 3. Parâmetros dos modelos de regressão utilizados no ajuste da resposta da fotossíntese à luz em folhas de sol do clone FAGA1 de cajueiro anão (<i>Anacardium occidentale</i> . L.).....	56
Tabela 4. Parâmetros dos modelos de regressão utilizados no ajuste da resposta da fotossíntese à luz em folhas de sol do clone FAGA10 de cajueiro anão (<i>Anacardium occidentale</i> . L.).....	56
Tabela 5. Parâmetros dos modelos de regressão utilizados no ajuste da resposta da fotossíntese à luz em folhas de sol do clone FAGA11 de cajueiro anão (<i>Anacardium occidentale</i> . L.).....	57
Tabela 6. Variáveis calculadas dos modelos utilizados no ajuste da resposta da fotossíntese à luz em folhas de sol dos clone FAGA1, FAGA10 e FAGA11 de cajueiro anão (<i>Anacardium occidentale</i> . L.).....	58
Tabela 7. Parâmetros de regressão ajustados e variáveis calculadas pelo modelo de YE, (2007) de resposta da fotossíntese à luz em folhas de sombra de cajueiro anão (<i>Anacardium occidentale</i> . L.).	61

LISTA DE SÍMBOLOS

Interceptação da luz

a	semi-eixo da copa na direção x
b	semi-eixo da copa na direção y
c	semi-eixo da copa na direção z
F	densidade de área foliar
I_Q	radiação que atinge o topo do dossel
I_P	radiação transferida abaixo do dossel
K	coeficiente de extinção
L	índice de área foliar
h	distância entre linhas de plantio
θ	ângulo zenital
ϕ	ângulo azimutal
n	localização da planta ao longo das entrelinhas de plantio
p	localização da planta ao longo da linha de plantio
m	distância entre plantas
s	comprimento da trajetória da luz dentro da copa
T	radiação transmitida abaixo da copa
x,y,z	coordenadas cartesianas
Z_0	distância do solo ao centro da copa
Z_Q	Ponto de entrada da luz no topo da copa
Z_P	Ponto qualquer de interesse no interior da copa

Z_N Ponto de saída da luz na copa

Curva de resposta da fotossíntese à luz

I	densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos
I_{comp}	ponto de compensação luminoso
I_{opt}	densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos quando $P_N = P_{gmax}$
I_{sat}	ponto de saturação luminoso
$I_{(50)}$	ponto de saturação luminoso quando $P_N + R_D = 50\%$ da P_{gmax}
k	fator de ajuste
P_{gmax}	estimativa assintótica da taxa fotossintética bruta máxima
P_N	taxa fotossintética líquida
R_D	taxa de respiração no escuro
β	fator de ajuste
γ	fator de ajuste
θ	convexidade da curva
$\phi_{(I_0)}$	rendimento quântico quando $I = 0$
$\phi_{(I_0 - I_{comp})}$	rendimento quântico obtido no intervalo I_0 e I_{comp}

Simulação da fotossíntese

At	área foliar total da planta
dA	área foliar que intercepta radiação solar direta em determinado ângulo
f_{bi}	fração direta da radiação solar em um elemento qualquer no interior da copa
f_{di}	contribuição da radiação difusa do céu em um elemento qualquer no interior da copa
f_{gi}	contribuição da radiação difusa espalhada pelo solo em um elemento qualquer no interior da copa

R_d	irradiância solar difusa
R_p	irradiância em um plano perpendicular ao feixe de luz
R_t	irradiância solar global
T_1	Energia total inicialmente perdida pela copa após espalhamento
t	fração da energia perdida pela planta após espalhamento
T_0	energia total perdida pela planta após múltiplos espalhamentos
U_0	energia total inicialmente interceptada por toda planta
V_i	volume do elemento i
ω	fração da radiação isotropicamente espalhada pelas folhas

Estatística

c	coeficiente de confiança
d	índice de concordância de Willmott
$EAPM$	erro absoluto médio percentual
R^2	coeficiente de determinação

RESUMO

DUARTE, T, F. Intercepção da luz e simulação da fotossíntese em cajueiro anão. Cuiabá, 2016, Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

A intercepção da luz e a fotossíntese são processos determinantes da produtividade das culturas. O estudo destes processos são etapas necessárias na construção de modelos de simulação da produtividade e do crescimento. Para o cajueiro anão, considerando toda a copa, não há estudos dessa natureza. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar e validar o modelo de intercepção da luz de CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973) e, posteriormente, simular a fotossíntese para toda copa para plantas de cajueiro anão com o modelo de THORPE et al. (1978). As medições da luz necessárias para validação do modelo foram realizadas em pomar de plantas adultas de cajueiro anão, localizado na Baixada Cuiabana (15,8° S; 56,1° W). A avaliação do modelo de intercepção da luz foi efetuado em intervalos de 60, 120, 180, 240 e 300 min. Em escala de 60 min houve tendência de subestimar os valores medidos. Na escala de 300 min, a simulação foi a mais próxima do valor medido, com coeficiente de determinação de 0,90; coeficiente de exatidão de 0,96; índice de desempenho de 0,91 e erro absoluto médio percentual de 5,65. Simulou-se o efeito da direção de plantio na intercepção da luz utilizando o modelo de CHARLES-EDWARDS & THORPE (1976), para locais com latitudes de 0, -5, -10, e -15°. Além disso, derivou-se um novo modelo geométrico de intercepção da luz para as plantas no pomar e avaliou-se o efeito da variação do espaçamento de plantio na intercepção da luz. Houve maior intercepção da luz na direção Leste-Oeste (90° em relação ao Norte), embora com diferenças pouco expressivas em relação às

demais. O espaçamento mínimo necessário para que não haja competição por luz entre plantas adultas no pomar é de 50 m², considerando uma disposição quadrada de plantio. Para simulação da fotossíntese em toda a copa, avaliou-se primeiramente dez modelos de resposta da fotossíntese à luz para folhas de sol e um modelo para folhas de sombra. Essas medições foram feitas em condições de campo, em folhas completamente expandidas, localizadas na parte externa da copa (folhas de sol) e localizadas na parte interna da copa (folhas de sombra). Os modelos implementados para simulação da fotossíntese de toda a copa foram os modelos de PRIOUL & CHARLIER (1974) e de YE (2007) para folhas de sol e de sombra respectivamente. Pela simulação da fotossíntese de plantas adultas de cajueiro anão com o modelo de THORPE et al. (1978), considerando-se uma densidade foliar geometricamente uniforme em toda a copa, observou-se que, em função da menor disponibilidade de luz, a maior parte da área foliar situada no interior da copa apresenta taxas menores de fotossíntese ao longo do dia em comparação com as das folhas mais periféricas. Além disso, a fotossíntese líquida de toda a planta diminuiu com o aumento da fração difusa da radiação solar. Variando a densidade foliar e a sua localização no interior da copa, observou-se que, em plantas adultas de cajueiro anão há tendência de aumento da fotossíntese com aumento da densidade foliar, e as plantas que possuem área foliar apenas na parte periférica da copa possuem maior taxa fotossintética com maiores valores de densidade foliar.

Palavras-chave: transferência de radiação, lei de Lambert-Beer, coeficiente de extinção da luz, modelagem de culturas

ABSTRACT

DUARTE, T, F. **Light interception and simulation of photosynthesis in dwarf cashew clones**. Cuiabá, 2016. Thesis (Doctorate in Environmental Physics) – Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

The light interception and photosynthesis are determining processes of crop yield. The study of these processes are necessary steps in the build of crop models. For dwarf cashew, considering the whole tree, there is not study of this nature. Thus, the aim of the work was evaluate and validate the light interception model of CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973) and, further, simulate the photosynthesis for whole tree with the model of THORPE et al. (1978). The light measurements necessary for model validation, were realized in orchard of adult dwarf cashew tree, localized in Baixada Cuiabana (15,8° S; 56,1° W). The evaluation of light interception model was made in intervals of 60, 120, 180, 240 e 300 min. In temporal scale of 60 min there was tendency of underestimate the measured data. In scale of 300 min, the simulation was the most near of measured data, with determination coefficient of: 0.90; accuracy coefficient: 0.96; performance index: 0.91 and mean absolute percent error: 5.65. Was simulated the effect of row azimuth on light interception using the model of CHARLES-EDWARDS & THORPE (1976), for sites with latitudes of 0, -5, -10, e-15. In addition, was derived a new geometric model of light interception for plants in the orchard and was assessed the effect of the change in the planting spacing on light interception. There has been greater light interception in East-West direction (90° in relation to the North), although with little significant differences in relation to the other. The minimum spacing required so

there is no competition for light between plants grown in the orchard is 50 m^2 , for a square arrangement of planting. For simulating photosynthesis in whole tree crown, it was first assessed ten models of net photosynthetic light response-curves for sun and shaded leaves. These measurements were made in field conditions, in fully expanded leaves located on the outside and inside of the tree crown (sun and shaded leaves). The implemented models for simulating photosynthesis for tree crown were the models of PRIOUL & CHARLIER (1974) and YE (2007) for sun and shaded leaves respectively. The simulation of photosynthesis of adult dwarf cashew tree with the model THORPE et al. (1978), considering a leaf area density geometrically uniform in whole tree, notice that, in function of lower availability of light, the higher leaf area located in inner part of tree have lower rate of photosynthesis during the day, comparing with the leaves located in extremity of tree. Furthermore, the net photosynthesis of whole tree reduces with diffuse fraction of global radiation. Altering the leaf area density and its location in the tree, noticed that, in adult cashew tree, there is tendency of increase of photosynthesis with increase of leaf density, and in tree that have leaf area only in extremity of tree, have higher photosynthetic rate with higher leaf area density.

Keywords: radiation transfer, Lambert-Beer law, light extinction coefficient, crop modelling

1. INTRODUÇÃO

O cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) é uma frutífera tropical adaptada às condições climáticas do cerrado. Apesar disso, ainda é pouco utilizada como espécie cultivada em Mato Grosso, sendo explorada principalmente de maneira extrativista. A falta de informações científicas que auxiliem no manejo da cultura e na adequação dos frutos às exigências de qualidade do mercado consumidor pode ser apontada como uma das principais causas desse cenário.

As informações existentes na literatura sobre a utilização da luz solar pelo cajueiro são escassas o que dificulta o cultivo e manejo da cultura, que pode se tornar uma alternativa importante para a fruticultura em Mato Grosso. A quantidade de luz interceptada por uma planta expressa a quantidade de energia potencialmente disponível para realização da fotossíntese e, portanto, é a base para o crescimento e produtividade das culturas (TEH, 2006). Assim, em termos de energia, o aumento na produtividade de uma cultura é resultado do aumento da quantidade de luz absorvida pela planta e de sua ótima utilização no processo fotossintético (ROSS, 1981). O entendimento da interceptação e distribuição da luz através da copa permite também manejar de maneira adequada a arquitetura e disposição das plantas no pomar (JOHNSON & LAKSO, 1991; WÜNSCHE et al.,1995) e, além disso, melhorar a qualidade dos frutos através do manejo pela poda.

O processo de transferência da radiação como um todo ao longo do dossel é complexo. Sua análise envolve o estudo da geometria terra-sol e de fatores relacionados à planta, como a arquitetura e as características ópticas do dossel. Matematicamente, não há um modelo único geral e que possa ser aplicável indistintamente para todos os tipos de vegetação.

Os modelos de interceptação da luz atualmente existentes podem ser classificados em duas linhas gerais: modelos geométricos e estatísticos (ROSS, 1981). Na primeira categoria, as plantas que compõem o dossel são descritas por figuras geométricas bem definidas, como cones, esferas, elipsoides, etc. Esses modelos são extremamente úteis no estudo de vegetações que não possuem o dossel horizontalmente contínuo, como por exemplo, um pomar, uma cultura agrícola nos estádios iniciais de crescimento, ou ainda uma floresta com vegetação esparsa. O

modelo de CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973), é um modelo geométrico, proposto para simular a interceptação da luz em plantas isoladas, cuja copa possui a forma geométrica de um elipsoide. Sua avaliação e validação já foi feita para várias espécies (ABRAHA & SAVAGE, 2010), demonstrando a praticidade e versatilidade do modelo. ANNANDALE et al. (2004) utilizaram o modelo para simular a interceptação da luz em culturas com diferentes formas, tamanhos, densidade foliar e orientação de plantio. Além disso, o modelo pode ser aplicado também em estudos de caracterização da estrutura da copa, como por exemplo, para estimar a densidade foliar (ANTUNES JUNIOR et al., 2009).

Combinando o modelo de interceptação da luz com parâmetros foliares da fotossíntese e variáveis meteorológicas, é possível simular o total diário de fotossíntese para todo o dossel. Estudos dessa natureza foram feitos por diversos autores em diferentes culturas (THORPE et al., 1978; NORMAN, 1993; SANDS, 1995). THORPE et al. (1978), utilizando o modelo de CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973), elaboraram um modelo de fotossíntese e transpiração para plantas isoladas, baseado na distribuição da radiação incidente sobre as folhas. O modelo foi aplicado e validado, tanto para fotossíntese quanto para a transpiração, em macieiras (THORPE et al., 1978). O modelo de THORPE et al. (1978) é um dos poucos existentes na literatura para simulação da fotossíntese e transpiração em plantas isoladas ou em dosséis heterogêneos. Contudo, sua utilização não tem sido muito frequente em estudos de modelagem de processos ecofisiológicos, talvez, devido a sua complexidade e forte integração com a área de modelagem computacional. Com relação a transpiração, CAMPELO JUNIOR (2000) utilizou o modelo para simular a necessidade de água em seringueiras. Para a fotossíntese, não há aplicações descritas na literatura.

Estudos dessa natureza, são a base para a elaboração e a implementação de modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas. Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar o modelo geométrico de interceptação da luz de CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973) para plantas de cajueiro anão e, posteriormente, adaptar o modelo de THORPE et al. (1978) para simular a fotossíntese para toda copa ao longo do dia.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. INTERCEPTAÇÃO DA LUZ

Em várias culturas foi demonstrado que o acúmulo de matéria seca é linearmente relacionado com a quantidade de energia solar interceptada pela vegetação (MONTEITH 1972, 1977). Além disso, a eficiência na interceptação da luz seria o principal fator responsável pelas diferenças de produção em diferentes condições climáticas ou mesmo dentro de um estande (SINCLAIR & MUCHOW 1999). A quantidade de energia solar interceptada por uma cultura depende, contudo, tanto da energia solar incidente como das características do dossel. Assim, os modelos de interceptação da luz ou de transferência da radiação, são formulações matemáticas que combinam as características da vegetação com a forma de atenuação da radiação através do dossel. Sua aplicação é essencial para a compreensão e simulação do crescimento e da produção das culturas.

Em linhas gerais, a interceptação pode ser entendida como um processo físico no qual a radiação solar atinge uma superfície qualquer. Para interceptar a superfície de uma folha em um ponto qualquer no interior do dossel, a radiação solar que chega acima do dossel vegetativo precisa ser transferida. O processo de transferência da radiação ao longo do dossel depende do tipo de radiação (direta ou difusa), das propriedades ópticas da vegetação e da arquitetura do dossel. Segundo ROSS (1975), as propriedades ópticas da vegetação são caracterizadas pelos coeficientes de reflexão (ρ), transmissão (τ), e absorção (α), sendo relacionadas da seguinte maneira:

$$\alpha = 1 - \rho - \tau \quad (1)$$

Além disso, nos estudos de transferência da radiação, é comum utilizar também o termo coeficiente de espalhamento (ω), calculado pela Equação 2:

$$\omega = \rho + \tau \quad (2)$$

Apesar de as propriedades ópticas de uma folha variarem conforme a idade, a estrutura, a presença de doenças, dentre outros fatores, pode-se idealizar genericamente como seria o comportamento óptico para uma folha verde saudável (Figura 1).

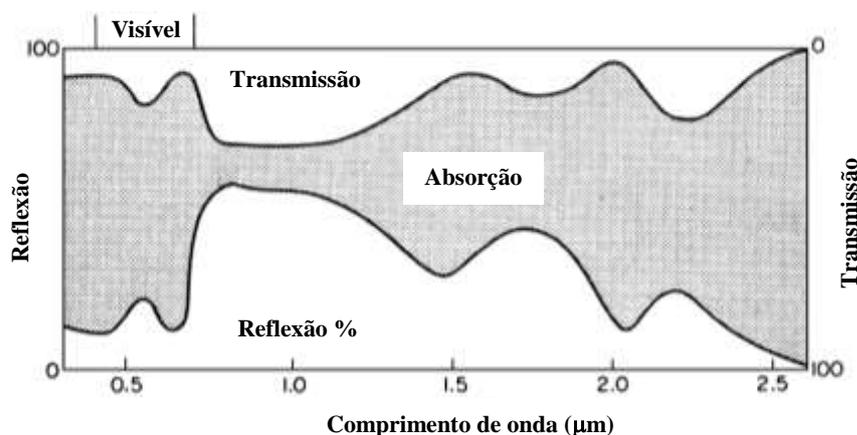


Figura 1. Relação idealizada entre a reflexão, transmissão e absorção de uma folha verde (MONTEITH & UNSWORTH, 2013).

Pela Figura 1, observa-se uma acentuada absorção da radiação na região do visível (0,4 a 0,7 μm), podendo atingir aproximadamente 90%. Posteriormente, a partir de 0,7 μm , a absorção diminui drasticamente, com valores mínimos de aproximadamente 10% entre 0,7 a 1,2 μm . De 1,2 μm em diante, a absorção aumenta novamente, com picos em 1,5; 2,1 e após 2,5 μm (MONTEITH & UNSWORTH, 2013).

Além das propriedades ópticas, a transferência da radiação depende também da arquitetura do dossel. O termo “arquitetura” é definido por ROSS (1981) como sendo o conjunto de características que determinam a forma, o tamanho, a geometria e a estrutura externa da planta. A descrição completa e detalhada da arquitetura da vegetação é complexa, onerosa, e requer elevado tempo. Assim, o que geralmente se usa nos modelos de transferência da radiação são características simplificadas da arquitetura. Assume-se, que o dossel é composto apenas por folhas, e as demais partes estruturais são negligenciadas. Essa premissa é válida na maioria dos casos, visto que os principais elementos que causam o sombreamento e o espalhamento da radiação em um dossel são as folhas. Outra simplificação amplamente utilizada é de que a distribuição espacial das folhas é aleatória ou seja, cada folha possui a mesma probabilidade de ser encontrada em um local qualquer dentro do dossel.

A distribuição foliar espacial aleatória incorpora os seguintes pressupostos: 1) a localização da folha em um ponto qualquer $P(x,y,z)$ no dossel, é considerada uma variável aleatória; 2) as coordenadas x , y e z possuem distribuição uniforme em um espaço do dossel confinado entre dois níveis horizontais; 3) a posição das folhas são

independentes entre si (OKER-BLOM, 1986). Assim, em uma altura z qualquer, estatisticamente, as características estruturais do dossel e a radiação solar, não variam nas coordenadas x e y (ROSS, 1975).

A arquitetura do dossel é caracterizada também pela distribuição angular das folhas, ou seja, sua inclinação e seu ângulo azimutal. Na maioria das espécies as folhas não possuem nenhuma preferência quanto a direção azimutal. Baseado nisso, de WIT (1965), classificou o dossel em quatro diferentes funções de distribuição do ângulo de inclinação foliar: *planófila*, cuja copa possui a maioria das folhas horizontais; *eretófilas*, com a maioria das folhas eretas; *plagiófilas*, cujas folhas são em sua maior parte inclinadas obliquamente; *extremófila*, cujas folhas na posição oblíqua são a menos frequente. Ele definiu também a distribuição foliar *esférica*. Neste caso, a distribuição angular das folhas no dossel é similar a distribuição angular de pequenos elementos sobre a superfície de uma esfera (de WIT, 1965). Nos modelos de transferência da radiação, a distribuição esférica é normalmente a mais utilizada, visto que suas características são bem próximas da realidade na maioria das espécies.

Em alguns dosséis, a dispersão espacial das folhas não é independente entre si, apresentando um certo grau de agrupamento, também chamado de “*clumping factor*”, Ω . Essa característica permite que haja uma maior passagem da luz pelo dossel e ocasiona um maior autosombreamento entre as folhas. O fator Ω é de difícil determinação e, por isso, há poucos valores na literatura caracterizando as principais culturas. Como referência, em dosséis com dispersão completamente aleatória, ou seja, sem agrupamento foliar, Ω é igual a 1. Para dosséis cujas folhas são agrupadas, Ω tende a 0 quanto maior o grau de agrupamento. KIM et al. (2011) encontraram valores de Ω variando entre 0,2 a 0,9 para pinus.

Com relação ao tipo de radiação, a simulação da interceptação da radiação difusa é mais complexa comparada à radiação solar direta, embora ambas sejam atenuadas da mesma maneira. Isso porque enquanto a radiação solar direta é originada de uma única direção, caracterizada pelos ângulos zenital e azimutal (θ , ϕ), a radiação difusa é emitida em todas as direções. A distribuição da radiação difusa normalmente é calculada por dois métodos principais, o método do Céu Nublado Uniforme (UOC) e do Céu Nublado Padrão (SOC). O primeiro método assume que

a radiação difusa é a mesma em todas as direções do céu. Já a SOC, considera que a distribuição da radiação difusa depende do ângulo zenital, de modo que há maior fluxo nas direções próximas ao zênite (GOEL & NORMAN, 1990). Matematicamente, a radiação difusa pode ser calculada:

$$I_{dif} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} B(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (3)$$

onde a integração ocorre ao longo de todo céu (hemisfério) ou seja, de 0 a $\pi/2$ para o ângulo zenital, e de 0 a 2π para o ângulo azimutal, sendo $B(\theta, \phi)$ a função de luminosidade do céu.

1.1.1. A transferência da radiação em dosséis horizontalmente homogêneos

Nos estudos da transferência de radiação, normalmente utiliza-se da similaridade entre a passagem do raio de luz e de “agulhas” atravessando a copa (WARREN WILSON, 1960). Contando-se o número de contatos entre a “agulha” e as folhas, determina-se então a frequência. A probabilidade de não ocorrer contatos ou seja, de não haver interceptação pelas folhas é calculada por:

$$P_0 = e^{-KL} \quad (4)$$

Em que K é o coeficiente de extinção da luz, e L é o índice de área foliar (razão entre a área das folhas e área do solo). Projetada em um plano horizontal, P_0 expressa a área horizontal iluminada pelo sol. Quando a referência de projeção é o plano perpendicular à direção (θ) da penetração da luz, o termo comumente utilizado é “Gap frequency” (LEMEUR, 1973). Assim, se I_0 representa a radiação que atinge o topo do dossel, a radiação que atravessa o dossel sem ser interceptada, I_p , pode ser calculada:

$$I_p = I_0 e^{-KL} \quad (5)$$

O coeficiente de extinção da luz para dosséis com distribuição foliar aleatória representa a projeção média da área foliar unitária em um plano perpendicular à direção do feixe de luz (WANG et al., 2007). Em outras palavras, o coeficiente de extinção representa a razão entre a área da sombra projetada pelo dossel em uma superfície e a área das folhas contidas no dossel (MONTEITH & UNSWORTH, 2013). O valor do coeficiente de extinção depende da radiação e da distribuição

angular das folhas no dossel. Para dosséis com distribuição esférica, o coeficiente de extinção é calculado:

$$K = \frac{0,5}{\cos \theta} \quad (5)$$

Em que θ , é o ângulo zenital. A divisão por $\cos \theta$, corrige o aumento da trajetória da luz em ângulos de penetração mais oblíquos (LEMEUR, 1973).

Pela Equação 4 observa-se que a atenuação ao longo do dossel segue um decaimento exponencial conforme previsto pela Lei de Lambert-Beer, aplicada primeiramente por MONSI & SAEKI (1953). Entretanto, a Equação 4 não leva em consideração a fração da radiação que será transmitida ou refletida pelas folhas, ou seja, o espalhamento da radiação solar. Valores típicos de α para a radiação solar são de 0,8 e 0,2 para a fração visível (PAR) e a fração infravermelha (NIR), respectivamente. Considerando todo espectro da radiação solar (PAR + NIR), a fração da radiação absorvida pelas folhas é de 0,5 (GOUDRIAAN & VAN LAAR 1994). GOUDRIAAN (1977) verificou que o efeito do espalhamento da radiação solar na equação 4 pode ser simulada inserindo o fator $\sqrt{\alpha}$:

$$P_0 = e^{-KL\sqrt{\sigma}} \quad (6)$$

Se $\sigma = 1$, então a Equação 6 será igual a Equação 4. Assim, o termo $\sqrt{\alpha}$ atua no sentido de reduzir o valor do coeficiente de extinção devido ao efeito do espalhamento múltiplo da radiação no interior do dossel (TEH, 2006).

Além da correção inserida na equação anterior devido ao espalhamento da radiação solar, GOUDRIAAN & VAN LAAR (1994) e TEH (2006) consideram também que parte da radiação incidente sobre a copa ou do dossel será refletida e, portanto, não contribui para a transferência da radiação abaixo do dossel. Incorporando o efeito da reflexão na Equação 6, então a radiação transferida é calculada:

$$I_p = (1 - \rho)I_0 e^{-KL\sqrt{\sigma}} \quad (7)$$

em que ρ é o coeficiente de reflexão.

O coeficiente ρ varia entre 0 e 1, onde valores menores indicam menor reflexão. Valores aproximados de ρ para radiação visível, infravermelha e total (PAR + NIR) são, respectivamente, 0,04, 0,25 e 0,11 (TEH, 2006). A inclusão das

correções descritas anteriormente, embora sejam teoricamente adequadas, na prática são usualmente desconsideradas (GONIAS et al., 2012; ZHANG et al., 2014), com resultados satisfatórios, principalmente quando se trabalha com a faixa visível do espectro solar.

1.1.2. A transferência da radiação em dosséis heterogêneos

Para vegetação cujo dossel não é horizontalmente homogêneo, a equação 4 descrita anteriormente não pode ser aplicada diretamente. Nesse caso, é necessário recorrer a modelos que sejam adequados a dosséis heterogêneos. São exemplos de dosséis heterogêneos, um pomar cujas copas das árvores não cobrem completamente o solo, florestas com árvores esparsas, plantações de culturas anuais em início de crescimento, etc. Na literatura há modelos específicos para esse tipo de vegetação, podendo ser destacados os trabalhos de CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973), ALLEN (1974), GOUDRIAAN (1977), JACKSON & PALMER (1979), MANN et al. (1980), NORMAN & WELLES (1983), GIJZEN & GOUDRIAAN (1986) e WHITFIELD (1986).

ALLEN (1979) desenvolveu um modelo para avaliação da interceptação da luz para espécies cultivadas em fileiras retangulares com espaçamento regular. A distribuição da densidade de área foliar no renque não é uniforme, e é aproximada por uma função quadrática. O modelo foi avaliado e validado para a cultura do sorgo, permitindo a determinação da melhor orientação de plantio na região de Colorado. O modelo de GOUDRIAAN (1977), foi desenvolvido para culturas em linhas com secção transversal quadrada, cujas folhas são homogeneamente distribuídas em seu interior. MANN et al. (1980) apresentaram um modelo de interceptação da luz para plantas isoladas com formas geométricas variadas, baseado na distribuição da projeção da área foliar. WHITFIELD (1986) e NORMAN & WELLES (1983) apresentaram modelos cujo dossel vegetativo são formados por plantas com formato elipsoide. O modelo de NORMAN & WELLES (1983) é mais complexo e permite que a distribuição da densidade foliar seja desuniforme.

JACKSON & PALMER (1979) propuseram um método simples para avaliação da interceptação da luz em dosséis descontínuos. Segundo os autores, a

transmissão (τ) da radiação solar em dosséis descontínuos é formada por duas frações complementares: a fração da radiação que atravessa o dossel (τ_c) e a fração que não atravessa o dossel (τ_f). Assim, τ_c pode ser calculado:

$$\tau_c = (1 - \tau_f)e^{-KL'} \quad (8)$$

Em que $(1 - \tau_f)$ é a fração máxima da radiação disponível para interceptação pelo dossel. O parâmetro L' é a área foliar por unidade de área do solo sombreada pelo dossel.

O modelo de CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973) foi concebido inicialmente para calcular a interceptação da luz em plantas isoladas. Porém, visto que o modelo é flexível, pode ser utilizado para simulação em qualquer tipo de dossel cuja forma seja derivada de elipsoide. Alguns exemplos de formas da copa que podem ser utilizadas no modelo estão demonstradas na

Figura 2. CHARLES-EDWARDS & THORPE (1986), adaptaram o modelo original para simulação da interceptação da luz em fileiras de macieiras (Figura 3).

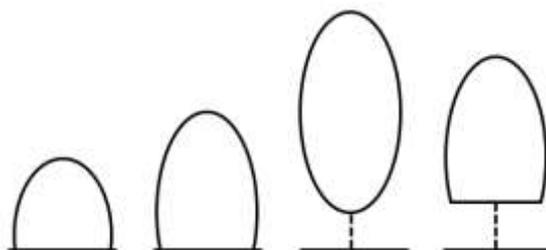


Figura 2. Algumas formas da copa que podem ser utilizadas no modelo CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973).

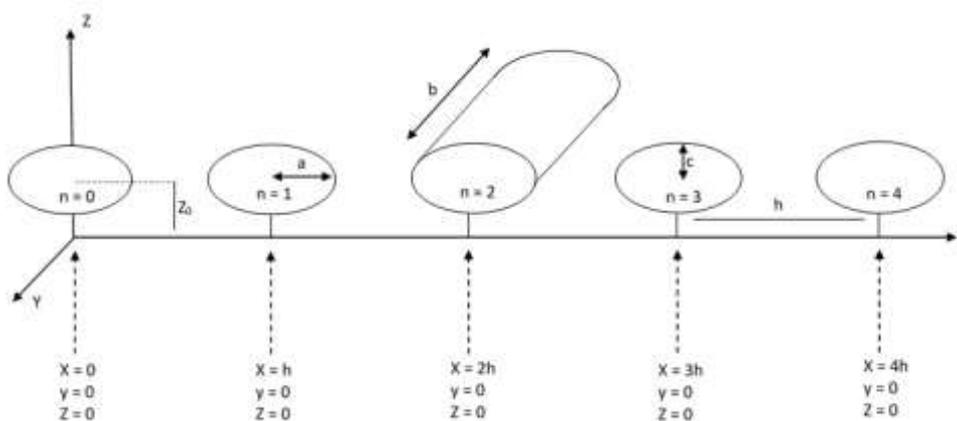


Figura 3. Adaptação do modelo original para simulação da interceptação da luz em fileiras de plantio. Adaptado de CHARLES-EDWARDS & THORPE (1976).

A principal característica do modelo é possibilitar o cálculo do comprimento da trajetória da luz no interior da copa, s , cuja forma geométrica seja análoga ao elipsoide. Além disso, para plantas isoladas, o índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) inserido na Equação 4 é substituído pelo produto entre s (m) e a densidade de área foliar, F , ou seja, a razão entre a área das folhas e o volume da copa, ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$). Assim, se I_Q é a luz incidente num ponto qualquer acima da copa, e I_P é a luz que foi transferida abaixo da copa, a relação entre eles é dada por:

$$I_P = I_Q e^{-sFK} \quad (9)$$

Originalmente, o modelo foi calculado para uma copa hemi-elipsoidal disposta sobre o solo, cuja forma é descrita:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (10)$$

A relação entre as coordenadas do ponto de entrada da luz (Q) e um ponto qualquer na copa (P) é determinada:

$$\frac{x_Q - x_P}{\text{sen}\theta \cos\phi} = \frac{y_Q - y_P}{\text{sen}\theta \text{sen}\phi} = \frac{z_Q - z_P}{\cos\theta} \quad (11)$$

Se o ponto P se encontra no interior da copa, então a trajetória da luz, s , no interior da copa será PQ (Figura 4), calculada:

$$s = \frac{z_Q - z_P}{\cos\theta} \quad (12)$$

Se o ponto P se encontra fora da copa, a trajetória da luz, será QN (Figura 4):

$$s = \frac{z_Q - z_N}{\cos\theta} \quad (13)$$

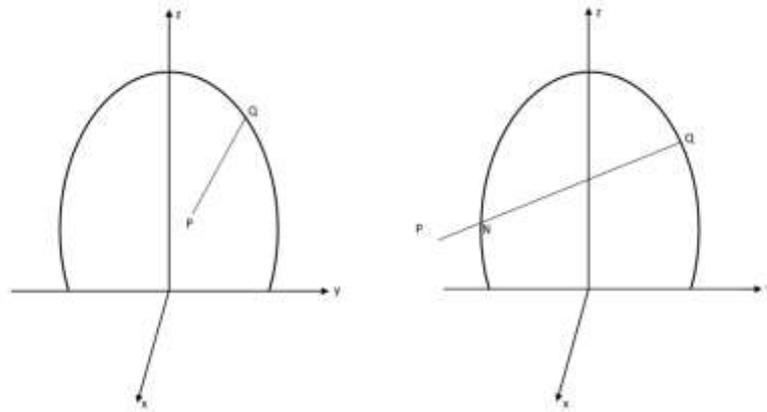


Figura 4. Exemplos de trajetória da luz em plantas isoladas segundo o modelo de CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973).

Utilizando a Equação 11, X_Q e Y_Q podem ser eliminados da Equação 10 fornecendo uma equação quadrática em Z_Q :

$$uz_Q^2 + vz_Q + w = 0 \quad (14)$$

Os coeficientes u , v e w são dados:

$$\begin{aligned} u &= c^2 \text{sen}^2 \theta (b^2 \cos^2 \phi + a^2 \text{sen}^2 \phi) + a^2 b^2 \cos^2 \theta \\ v &= 2c^2 \text{sen} \theta [\cos \theta (b^2 x_p \cos \phi + a^2 y_p \text{sen} \phi) - z_p \text{sen} \theta (b^2 \cos^2 \phi + a^2 \text{sen}^2 \phi)] \\ w &= z_p c^2 \text{sen} \theta [z_p \text{sen} \theta (b^2 \cos^2 \phi + a^2 \text{sen}^2 \phi) - 2 \cos \theta (b^2 x_p \cos \phi + a^2 y_p \text{sen} \phi)] + \\ & c^2 \cos^2 \theta (b^2 x_p^2 + a^2 y_p^2 + a^2 b^2) \end{aligned} \quad (15)$$

Da Equação 14 tem-se:

$$z_Q = \frac{-v \pm \sqrt{v^2 - 4uw}}{2u} \quad (16)$$

Assim se o ponto P se encontra no interior da copa, a raiz desejada é determinada pela condição: $Z_Q \geq Z_P$. Se P está fora da copa, as duas raízes fornecidas pela Equação 16 são Z_Q e Z_N ($Z_Q \geq Z_N$). Se as raízes são imaginárias, então $s = 0$.

1.2. SIMULAÇÃO DA FOTOSSÍNTESE EM DOSSÉIS

Com o desenvolvimento recente das câmaras portáteis, a medição da fotossíntese a nível foliar se tornou amplamente difundida. Entretanto, para plantas inteiras ou mesmo para todo dossel, a determinação da assimilação de CO_2 ainda é um desafio. Dentre os métodos existentes, o método de *eddy covariance* é uma das mais recentes técnicas utilizadas para quantificar o intercâmbio gasoso a nível de

dossel (WANG et al., 2009). Contudo, a instrumentação necessária é extremamente onerosa e sua operacionalidade exige conhecimentos específicos. Alternativamente, pode-se utilizar câmaras que envolvam plantas isoladas ou um conjunto de plantas, como a dimensionada por LONG et al. (1996). Ainda assim, sua utilização exigiria diversos instrumentos, além do cuidado da manutenção da própria câmara para evitar vazamentos. Assim, tem-se recorrido a modelos matemáticos para quantificar a fotossíntese para todo dossel ou para plantas inteiras a partir de características foliares determinadas instrumentalmente (NORMAN, 1993).

Os modelos, em geral, são baseados na curva de resposta da fotossíntese à variação da luz. Assim, conhecendo as características fotossintéticas a nível foliar e sabendo como a luz é distribuída ao longo do dossel, é possível simular a fotossíntese para toda planta (MONTEITH, 1965). NORMAN (1993) apresenta vários métodos de simulação da fotossíntese do dossel a partir de características fotossintéticas foliares. Conceitualmente, o método mais simples é o chamado “big-leaf” que considera que a assimilação de CO₂ em um dossel pode ser representada semelhante a resposta de uma única folha, não sombreada, às variáveis ambientais. Entretanto, embora apresente resultados satisfatórios em algumas situações, o método apresenta várias limitações (WANG et al., 2001; DAI et al., 2004). Outro método amplamente utilizado consiste na separação da área foliar do dossel em folhas de sol e folhas de sombra, com as respectivas características fotossintéticas para cada classe foliar. Essa estratificação do dossel em classes foliares foi proposta inicialmente por SINCLAIR et al. (1976) e é uma simplificação mais próxima da realidade.

Para a simulação da fotossíntese, é necessário determinar a distribuição da irradiação incidente sobre as folhas (JONES, 2013). Baseado nas equações descritas anteriormente, para um dossel horizontalmente homogêneo, a área foliar que recebe radiação solar direta (L_{sol}) pode ser calculada pela expressão:

$$L_{sol} = \frac{[1 - e^{-KL/\cos\theta}] \cos\theta}{K} \quad (17)$$

Cujos parâmetros foram definidos anteriormente. Por diferença, a área das folhas que recebem apenas radiação solar difusa (L_{sombra}):

$$L_{sombra} = L - L_{sol} \quad (18)$$

Assim, a fotossíntese para todo o dossel seria calculado como:

$$A_c = A_{sol} L_{sol} + A_{sombra} L_{sombra} \quad (19)$$

Onde A_{sol} e A_{sombra} são respectivamente, a taxa fotossintética para as folhas de sol e folhas de sombra. Esse método é vantajoso pois leva em consideração as diferenças no comportamento de resposta à luz para cada classe foliar. Assim, por exemplo, as folhas completamente expostas à luz são, provavelmente, as únicas que poderão atingir saturação à luz. As folhas de sombra por sua vez, normalmente, operam próximo da fase linear da curva de resposta à luz (NORMAN, 1993).

Para dosséis descontínuos ou para plantas isoladas, a simulação da fotossíntese é mais complexa comparada com dosséis horizontalmente homogêneos e a disponibilidade de modelos na literatura é limitada. GRACE et al. (1987a) apresentou um modelo para estimativa da fotossíntese em dosséis de *Pinus radiata* (D. Don) baseado no modelo de interceptação da luz de GRACE et al., (1987b). No modelo de GRACE et al. (1987a), as plantas possuem a forma de elipsoide que podem ser truncadas em sua base. Cada elipsoide é subdividido internamente por outros três elipsoides, e posteriormente por seis camadas horizontais, totalizando 52 segmentos (Figura 5). A simulação da fotossíntese é feita primeiramente pela simulação da quantidade de luz interceptada pelas folhas em um ponto dentro de cada segmento e assume-se que esse valor se aplica para todas as folhas do segmento em questão. Somando-se os valores estimados para cada segmento, obtêm-se então, o total para planta inteira.

GRACE et al. (1987a) descreve dois métodos definidos por NORMAN (1980), para vincular a interceptação da luz com a simulação da fotossíntese em dosséis. Embora os métodos tenham sido aplicados inicialmente para dosséis horizontalmente homogêneos, seus princípios podem ser incorporados para plantas isoladas ou dosséis heterogêneos. O primeiro método, definido como o mais preciso, consiste em inicialmente calcular a densidade de fluxo de fótons para radiação solar direta e difusa em diferentes níveis dentro do dossel. Posteriormente, calcula-se a quantidade de fluxo de fótons que é interceptada por folhas de sombra (recebem apenas radiação difusa) e por folhas de sol expostas em diferentes ângulos à radiação solar direta. Por fim, calcula-se a taxa fotossintética para cada classe de folhas. A fotossíntese líquida para uma determinada camada é obtida pela soma da fotossíntese de cada classe foliar ponderado pelas suas respectivas áreas. Somando para todas as

camadas, obtêm-se a fotossíntese de todo o dossel. No segundo método, classificado porém como menos preciso, o dossel é dividido em camadas e a densidade média de fluxo de fótons em um plano horizontal é determinada, em cada camada, calculando-se separadamente a transmissão da radiação direta e difusa. Esse fluxo médio é então, usado para simular a fotossíntese de cada camada.

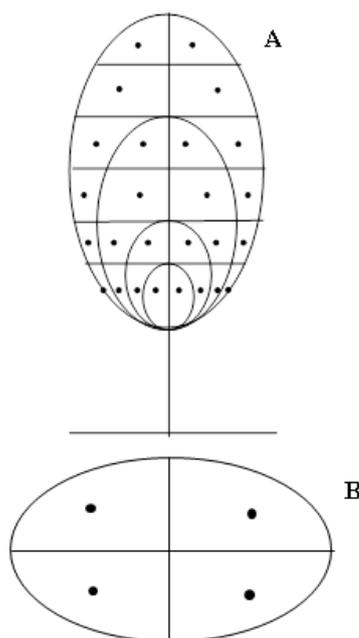


Figura 5. Representação estrutural das árvores no modelo de GRACE *et al.*, (1987a,b). A. Secção transversal vertical. B Secção transversal horizontal da primeira camada no topo da copa.

O modelo de GRACE *et al.* (1987a) foi incorporado como sub-rotina do modelo MAESTRO (WANG & JARVIS, 1990), que posteriormente foi atualizado para MAESTRA e atualmente MAESPA (DUURSMA & MEDLYN, 2012).

NORMAN & WELLES (1983) desenvolveram um modelo de transferência de radiação para plantas isoladas ou para um conjunto de plantas, com forma geométrica de um elipsoide. O modelo permite que o conjunto de plantas possam ser espaçadas aleatoriamente, de maneira regular ou conforme a necessidade da simulação. Outra vantagem do modelo é que, para uma mesma planta, há a possibilidade de se inserir diferentes densidades de área foliar, ou seja, distribuir a área foliar dentro da copa de maneira não uniforme. Além disso, é possível que a densidade foliar seja composta por folhas e ramos em diferentes partes no interior da copa. Assim, por exemplo, a Figura 6 demonstra o caso de uma planta isolada com

dois valores de densidade foliar (ρL e $\rho' L$) e de densidade de ramos (ρb e $\rho' b$). Nesse caso, a probabilidade da radiação atravessar a copa sem ser interceptada é calculada:

$$P_0 = e^{\{-[K_L(\rho_L[S_a-S_b]+\rho'_L[S_b])+K_b(\rho_b[S_a-S_c]+\rho'_b[S_c])]\}} \quad (20)$$

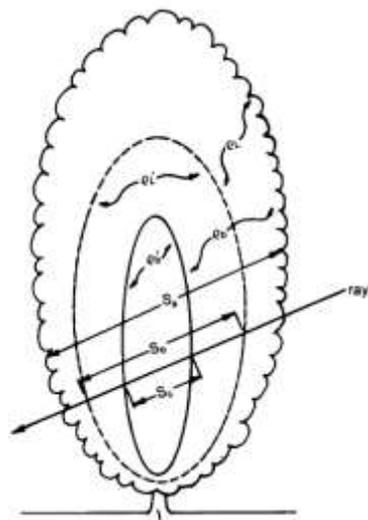


Figura 6. Representação estrutural de uma planta no modelo de NORMAN & WELLES (1983) com diferentes densidades de área foliar (ρL e $\rho' L$) e de ramos (ρb e $\rho' b$) em duas regiões no interior da copa.

Outro modelo de simulação da fotossíntese para plantas isoladas é o modelo criado por THORPE et al. (1978). Esse modelo foi criado inicialmente para simulação da transpiração e fotossíntese em plantas isoladas de macieira. As plantas são representadas por elipsoides subdivididas internamente por três elipsoides concêntricas e por ângulos sucessivos de $\pi/8$ radianos na secção vertical (Figura 7). A secção vertical, rotaciona também em sucessivos ângulos de $\pi/8$ radianos, totalizando 384 elementos no interior da copa.

Com o modelo de THORPE, calcula-se a distribuição da irradiância incidente sobre a superfície das folhas e, combinando com parâmetros da fotossíntese e da condutância estomática obtidos experimentalmente a nível foliar, simula-se a fotossíntese e a transpiração para toda planta. De modo semelhante ao modelo de GRACE et al. (1987a), no modelo de THORPE há uma matriz de pontos no interior da copa para simulação da interceptação da luz e posteriormente da fotossíntese. Em cada secção da planta, a área foliar é dividida em folhas que recebem radiação solar direta (folhas de sol) e folhas que recebem apenas radiação solar difusa (folhas de sombra). Calcula-se a área foliar de cada secção que intercepta determinada classe de

irradiância. Posteriormente, soma-se para toda a planta, as áreas que recebem a mesma classe de irradiância. A fotossíntese de toda a planta é obtida pela soma da resposta da fotossíntese as classes de irradiância em cada secção, ponderada pelas respectivas áreas foliares.

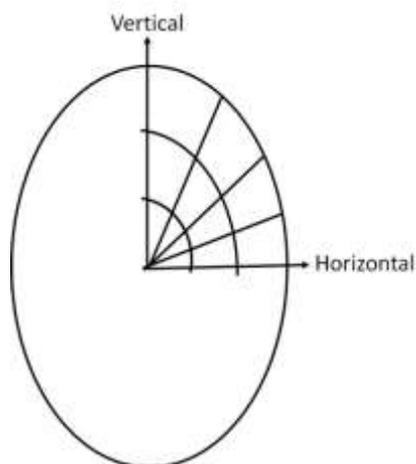


Figura 7. Representação da copa por elipsoide de revolução, e subdividida em pequenos elementos de volume conforme THORPE et al., (1978).

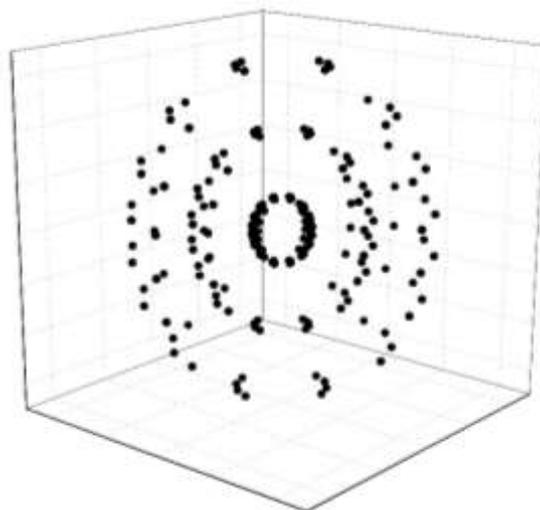


Figura 8. Matriz de pontos no interior da copa obtidos pelo modelo de THORPE et al., (1978).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. INTERCEPTAÇÃO DA LUZ

2.1.1. Validação do modelo de Charles-Edwards & Thornley (1973)

Para validação do modelo de *Charles-Edwards & Thornley (1973)*, o trabalho foi realizado no pomar de cajueiro da fazenda experimental da Universidade Federal de Mato Grosso em Santo Antônio de Leverger, região sudeste do estado (latitude: 15°47'S; longitude: 56°04'W; altitude: 140 m), no período entre 03/09/2012 a 09/11/2012. Foram utilizados três exemplares de *A. occidentale* L. do clone FAGA 1 com dez anos de idade, de um pomar em que as plantas se encontravam dispostas no espaçamento de 7 x 8 m. Dentre as três plantas selecionadas, duas estavam localizadas sequencialmente na mesma linha de plantio e, a terceira em uma linha adjacente. O pomar foi irrigado por aspersão e a quantidade de água aplicada era, em média, de 45 L h⁻¹, com duração média de 5 horas, com turno de rega semanal. As características das plantas encontram-se descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros da copa de cajueiro anão adotados no modelo de interceptação da luz em Santo Antônio de Leverger-MT.

Clone FAGA1	Semi- eixo a (m)	Semi- eixo b (m)	Semi- eixo c (m)	Z ₀ (m)	Volume (m ³)	Densidade foliar (m ² m ⁻³)	
						03/09/12	29/10/12
						a	a
1	4,00	4,13	2,12	2,12	146	1,60	1,75
2	4,00	3,40	2,10	2,12	120	1,37	1,46
3	3,65	3,35	1,66	1,86	85	1,29	1,40

Para avaliação da interceptação da luz foram realizadas medidas da radiação solar transmitida abaixo da copa e da radiação solar que atinge o topo da copa (Figura 9 e Figura 10). As medidas de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) foram realizadas semanalmente em dias de céu limpo ou parcialmente nublado, entre

09:00 até 16:00 h (horário local), utilizando quatro sensores pontuais de fotodiodo de silício (PP Systems, Hitchin, Reino Unido), conectados a um datalogger 21X (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EUA). As leituras foram realizadas a cada segundo com médias a cada 15 min. Para medir a PAR transmitida, três sensores foram dispostos abaixo da copa das plantas e o quarto sensor posicionado na entrelinha sobre um mastro de 1,80 m de altura para coleta da radiação fotossinteticamente ativa incidente acima da copa. A posição dos sensores em relação às plantas foi medida no sentido das linhas e entrelinhas e posteriormente ajustada em relação ao norte verdadeiro para determinação da trajetória da luz no interior da copa em função da posição do sol (ANTUNES JUNIOR et al., 2009).



Figura 9 Medição da luz abaixo da copa de cajueiro anão (*A. occidentale* L.)



Figura 10. Medição da luz incidente acima da copa de cajueiro anão (*A. occidentale* L.).

No modelo de CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973) há combinação da informação da posição do sol com a geometria da planta para calcular

o comprimento da trajetória da luz no interior da copa, s . Assumindo que a copa possui o formato de elipsoide, sua superfície pode ser descrita pela expressão 10.

Introduzindo Z_0 - ou seja, distância entre a superfície do solo e o centro da copa hemi-elipsoidal no eixo Z (ABRAHA & SAVAGE, 2010), a Equação 10 resulta em:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z - z_0)^2}{c^2} = 1 \quad (21)$$

Considerando um ponto Q sobre a superfície da copa e um ponto P qualquer, as respectivas intensidades de luz e I_q e I_p estão relacionadas do seguinte modo (CAMPELO JÚNIOR et al., 1996):

$$I_p = I_q \times \exp^{-KL} \quad (22)$$

em que: I_p - PAR transmitida no ponto P ; I_q - PAR incidente no ponto Q ; L - índice de área foliar ao longo da trajetória QP projetada sobre um plano normal à QP ; K - coeficiente da extinção de luz, considerado como $K = OPG / \text{sen}(\beta)$, conforme GOUDRIAAN (1988); β - é o ângulo de elevação solar.

O parâmetro L pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$L = F \times OPG \times s \quad (23)$$

Sendo F - a densidade de área foliar (relação entre a área foliar e o volume da copa), OPG - a projeção média da área unitária na direção do sol, com valor de 0,5 admitindo-se uma distribuição esférica ou aleatória do ângulo das folhas e s - o comprimento da trajetória da luz no interior da copa.

As coordenadas dos pontos P e Q são definidas utilizando geometria sólida pelas equações:

$$\frac{x_Q - x_P}{\text{sen}\theta \cos\phi} = \frac{y_Q - y_P}{\text{sen}\theta \text{sen}\phi} = \frac{z_Q - z_P}{\cos\theta} \quad (24)$$

Se P está na superfície da copa, então a trajetória da luz de P a Q , é calculada:

$$s = \frac{z_Q - z_P}{\cos\theta} \quad (25)$$

Assumindo que o ponto P está na superfície da copa, então os pontos x_Q, y_Q e z_Q devem satisfazer a Equação 21 de modo:

$$\frac{x_Q^2}{a^2} + \frac{y_Q^2}{b^2} + \frac{(z_Q - z_0)^2}{c^2} = 1 \quad (26)$$

Utilizando a Equação 24 e a Equação 26, x_Q e y_Q podem ser eliminados, resultando em uma equação quadrática do tipo $uz_Q^2 + vz_Q + w = 0$, cujos parâmetros u , v e w são calculados pelas expressões:

$$\begin{aligned} u &= c^2 \sin^2 \theta (b^2 \cos^2 \phi + a^2 \sin^2 \phi) + a^2 b^2 \cos^2 \theta \\ v &= 2[c^2 \sin \theta (\cos \theta (b^2 x_p \cos \phi + a^2 y_p \sin \phi) - z_p \sin \theta (b^2 \cos^2 \phi + a^2 \sin^2 \phi)) - a^2 b^2 z_0 \cos^2 \theta] \\ w &= (z_p c^2 \sin \theta) [z_p \sin \theta (b^2 \cos^2 \phi + a^2 \sin^2 \phi) - 2 \cos \theta (b^2 x_p \cos \phi + a^2 y_p \sin \phi)] \\ &+ \cos^2 \theta [c^2 b^2 x_p^2 + c^2 a^2 y_p^2 + a^2 b^2 (z_0^2 - c^2)] \end{aligned} \quad (27)$$

Desenvolvendo a equação quadrática obtêm-se:

$$z_Q = \frac{-v \pm \sqrt{v^2 - 4uw}}{2u} \quad (28)$$

Para um determinado par de ângulos ϕ e θ , utilizando o resultado da Equação 28, o valor de s pode ser calculado pela Equação 25. Nesse caso, a raiz desejada, ou seja, z_Q , é aquela no qual $z_Q \geq z_p$. Se as raízes são imaginárias, então $s = 0$.

A densidade de área foliar inserida na Equação 24 foi estimada para cada planta nos dias 28/09/12 e 05/11/12 pela equação abaixo, descrita por ANTUNES JUNIOR et al. (2009), cujos parâmetros foram definidos anteriormente:

$$F = -\frac{\ln\left(\frac{I_p}{I_q}\right)}{0,5 \times K \times s} \quad (29)$$

Para simular a quantidade de luz incidente abaixo da copa em todos os demais dias de medida, a densidade foliar foi estimada como o valor médio de todas as estimativas obtidas com o emprego da Equação 29 nas medidas realizadas a intervalos de 10 min, nos dias 28/09/12 e 05/11/12. Portanto, os dados medidos nestes dois dias foram utilizados exclusivamente para estimar duas densidades foliares adotadas na simulação e não puderam ser empregados na comparação entre dados medidos e simulados de interceptação da luz.

Os valores simulados e observados de luz incidente abaixo da copa, a intervalos de 60, 120, 180, 240 e 300 min, foram comparados utilizando-se o coeficiente de determinação (R^2), o índice de concordância de Willmott (d), o

coeficiente de confiança (c) proposto por CAMARGO & SENTELHAS (1997) e o erro absoluto médio percentual ($EAMP$).

A densidade de área foliar foi estimada também de modo independente, no período de 24/08/2012 e 19/12/2012, por método não destrutivo, em plantas diferentes daquelas utilizadas no modelo de interceptação da luz. As plantas utilizadas foram selecionadas, aleatoriamente, numa área de 16 x 56 m do mesmo pomar, sendo 3 plantas do clone FAGA 1, 3 do FAGA 10 e 3 do FAGA 11. As estimativas foram realizadas em amostragens realizadas mensalmente, para obter a área foliar e o volume de um ramo de aproximadamente 1,5 m de comprimento, previamente identificado em cada planta.

A área foliar de cada ramo foi obtida pelo produto entre o número de “lançamentos” (nL) e a área foliar média deles (AFL). A área foliar média dos lançamentos foi obtida em três lançamentos selecionados visualmente como representativos do ramo, nos quais foi contado o número de folhas e efetuadas as medidas do comprimento e maior largura da folha visualmente mais representativa. O comprimento e a maior largura da folha mais representativa foram utilizados para obter a área da folha com o uso de um fator de correção (FC). O FC foi obtido por uma equação de regressão linear ($R^2 = 0,9184$), que correlacionou a área foliar de 50 folhas digitalizadas pelo programa Sigma Scan Pro® e o produto do comprimento e da maior largura dessas mesmas folhas, medidos com paquímetro ($Fc = 0,6452x$). O volume do ramo foi determinado por $V = 4\pi abc/3$ em que a foi a metade do comprimento do ramo, e b e c foram as metades das dimensões do ramo medidas na transversalmente na posição central do comprimento, baseado na forma geométrica de um elipsoide.

A análise estatística dos dados de densidade de área foliar, foi efetuada por meio da análise de variância ($\alpha = 0,05$) com dois fatores (Data e Clone), considerando delineamento inteiramente casualizado. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Os dados foram submetidos previamente aos testes de normalidade e de homocedasticidade.

2.1.2. Caracterização do índice de área foliar

As plantas utilizadas para validação do modelo, foram também caracterizadas quanto ao índice de área foliar. As medições se iniciaram em 27/08/2012 e se estenderam até o dia 26/06/2013, com frequência mensal. As medições foram realizadas com ceptômetro (AccuPAR LP-80). O valor de *IAF* obtido foi resultado da média de quatro leituras distantes em aproximadamente 90° entre si.

2.1.3. Simulação da interceptação da luz com o modelo de Charles-Edwards & Thorpe (1976)

Além da avaliação do modelo de CHARLES-EDWARD & THORNLEY (1973) descrita anteriormente, avaliou-se, por simulação, qual a direção de plantio que permitiu maior interceptação da luz ao longo do dia. Para tanto, utilizou-se o modelo de CHARLES-EDWARD & THORPE (1976), assumindo que as características de arquitetura da copa não variassem ao longo da linha de plantio. Assim, portanto, a simulação foi executada considerando o pomar composto por fileiras contínuas de plantas, e não mais por plantas isoladas. Os azimutes das linhas de plantio adotados foram de 0°, 45°, 90° e 135° com relação ao norte geográfico. A simulação foi efetuada para quatro locais diferentes com relação à latitude: 0, -5, -10 e -15°. O azimute solar utilizado no modelo tem como referência a linha perpendicular à linha de plantio e, portanto, é necessário corrigir o azimute solar calculado. A simulação foi feita entre as 7:00 e 17:00 h para o solstício de verão, dia mais longo e teoricamente com maior disponibilidade de radiação solar diária para locais do hemisfério sul. A fração da radiação transmitida foi calculada com base na Lei de Lambert-Beer e a proporção média do total de radiação absorvida em todo o dia foi obtida integrando numericamente a expressão:

$$A = \frac{1}{h} \int_{x_0}^{x_0+h} [1 - \tau(x)] dx \quad (30)$$

em que $\tau(x)$ é a radiação transmitida no ponto P com as coordenadas cartesianas $(x_p, 0, 0)$. Os valores de x variaram de $3h/2$ a $5h/2$. O símbolo h , representa o espaçamento entre as linhas de plantio.

2.1.4. Um novo modelo geométrico

A fim de avaliar qual a melhor característica das plantas que promovem maior interceptação da luz no pomar, derivou-se um novo modelo geométrico do pomar a partir do modelo de CHARLES-EDWARD & THORPE (1976). No modelo de CHARLES-EDWARD & THORPE (1976), o pomar é formado por fileiras contínuas de plantas (Figura 3). Matematicamente, as copas são descritas pela Equação 31:

$$\frac{(x-nh)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} = 1 \quad (31)$$

Na equação anterior x é a coordenada na entre-linha e os parâmetros n e h determinam os limites da copa nessa direção. A coordenada y representa a linha de plantio no qual a copa não varia nessa direção. Assim, introduzindo os parâmetros m e p , na direção y , pode-se delimitar a dimensão da copa ao longo da linha de plantio. A equação anterior com os parâmetros m e p resulta em:

$$\frac{(x-nh)^2}{a^2} + \frac{(y-mp)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} = 1 \quad (32)$$

Na Figura 11 abaixo está exemplificado a formação de um pomar descrito pela Equação 32. Assim, é possível avaliar qual o efeito da variação do espaçamento entre plantas e entre linhas na interceptação da luz para um conjunto de plantas do pomar.

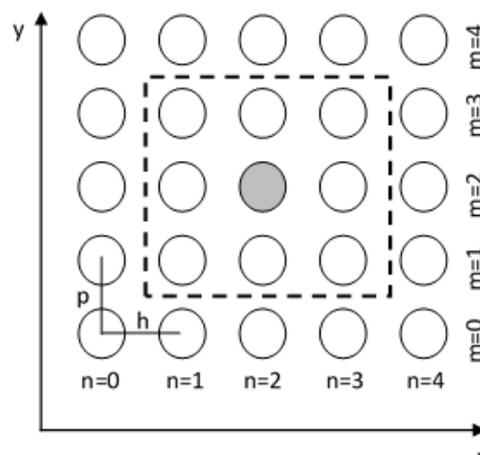


Figura 11. Vista superior do pomar descrito pela Equação 32. Os parâmetros p e h descrevem o espaçamento entre plantas e entre linhas do pomar, respectivamente. Círculos representam as plantas do pomar. Círculo destacado representa a planta analisada.

Para esta simulação considerou-se que as plantas individuais do pomar possuem as mesmas características descritas pelo modelo de THORPE et al. (1978), ou seja, são formadas por 384 elementos de volume. As características de latitude, longitude e direção do plantio foram: 15,5°S, -56,07°W e azimute do pomar de 105° em relação ao norte geográfico. O horário de simulação considerado foi de 7 às 17 hora. A variável simulada foi a fração da luz transmitida (Equação 52) e o valor considerado foi a média geral de todos os 384 valores obtidos em cada horário de simulação. O valor final considerado foi a média obtida para os horários simulados. Os espaçamentos avaliados variaram de 4 x 4 m até 10 x 10, sempre mantendo-se uma disposição quadrada. É válido frisar que o modelo pode ser utilizado para avaliar qualquer disposição de plantio. Entretanto, como uma primeira avaliação, adotou-se apenas a disposição quadrada.

2.2.MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE ÁREA FOLIAR

Com a finalidade de se avaliar diferentes métodos de determinação da densidade de área foliar, foram comparados três métodos não destrutivos. Foram utilizadas plantas dos clones FAGA 1, FAGA 10 e FAGA 11, cada qual com três exemplares, totalizando 9 plantas. A determinação foi efetuada por métodos diretos e indiretos. O método direto consistiu em selecionar em cada planta um ramo de aproximadamente 1,5 m de comprimento onde todas suas folhas foram contadas. Nesse mesmo ramo, foi determinado seu volume pela medição do comprimento longitudinal e de duas larguras transversais baseado na forma geométrica de um elipsoide. Com isso, obteve-se a densidade foliar, ou seja, quantidade de folhas em um determinado volume da copa. Para a obtenção da densidade de área foliar, é necessário determinar a área foliar total do ramo. Assim, para tanto, selecionou-se três folhas avaliadas como representativas do ramo, ou seja, que apresentassem tamanho semelhante às demais folhas presentes, e mediu-se o seu comprimento e a maior largura. Nesse caso, é necessário corrigir a área obtida pelo fator de correção descrito no tópico anterior.

Alternativamente, com o objetivo de se propor um método indireto mais rápido e de baixo custo, nos mesmos ramos selecionados para obtenção de forma direta, foi determinado o número total de “lançamentos”, conforme descrito no

tópico anterior. Considerou-se como lançamento, os fluxos de crescimentos em que as folhas são emitidas em períodos de florescimento e crescimento vegetativo.

O terceiro método de determinação da densidade de área foliar foi por meio da análise da fração da luz transmitida pela copa. A luz transmitida pela copa foi medida com auxílio do ceptômetro (AccuPAR LP-80). A determinação da densidade de área foliar foi feita pelo modelo descrito em ANTUNES JUNIOR et al. (2009) que assume que a copa possui uma distribuição foliar aleatória, sem preferências quanto à inclinação e ao ângulo azimutal foliar. Considerando que as medições foram feitas preferencialmente próximas ao meio dia, o comprimento da trajetória da luz no interior da copa foi considerado como sendo igual à altura da planta.

Essas avaliações de densidade de área foliar foram realizadas com frequência mensal entre 19/12/2012 a 04/12/2013 para o método direto e para o método dos “lançamentos”. Para o “método da luz”, as medidas de luz iniciaram em 29/04/2013 e se estenderam até 04/12/2013. Para a comparação entre os métodos não foi feita a distinção entre os clones. Utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2), o índice de concordância de Willmott (d) e o coeficiente (c) de CAMARGO & SENTELHAS (1997).

2.3. CURVA DE RESPOSTA DA FOTOSÍNTESE À LUZ

As curvas de resposta da fotossíntese líquida à luz foram determinadas com sistema portátil de medição de fotossíntese modelo LI-6400 (LI-COR Bioscience, Lincoln, NE, USA) em 21/11/2014. Foram utilizados três indivíduos dos clones FAGA1, FAGA 10 e FAGA 11, totalizando nove plantas. Em cada planta, as curvas foram realizadas em folhas totalmente expostas ao sol e de folhas sombreadas, pois, a resposta da fotossíntese à luz é diferente para cada tipo de folha (Figura 12). A resposta da fotossíntese líquida em função da irradiância foi realizada em quatorze níveis de densidade de fluxo de fótons fotossintéticos: 0, 25, 40, 60, 80, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1250, 1500 e 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em ordem decrescente, com intervalos de 2-3 minutos entre cada leitura e registradas quando o coeficiente de variação total (CV) for inferior a 0,5%.

Há vários modelos matemáticos para ajuste da resposta fotossintética à luz. LOBO et al. (2013) fizeram uma revisão dos principais modelos utilizados e

automatizaram o ajuste dos parâmetros por meio de planilha eletrônica. Assim, para as folhas expostas ao sol, foram ajustados e comparados nove modelos matemáticos descritos em LOBO et al. (2013) e os modelos de RABINOWITCH, (1951), MONTEITH (1963) e de WIT (1965). Para as folhas sombreadas, frequentemente, após a fotossíntese atingir seu valor máximo em resposta à luz, há uma posterior diminuição com o aumento da irradiância. Esse efeito, conhecido como fotoinibição é previsto pelo modelo de YE (2007), descrito em LOBO et al. (2013).



Figura 12. Medição da curva de resposta da fotossíntese à luz em folha de sombra (A) e de sol (B) em cajueiro anão (*A. occidentale* L.).

Os modelos utilizados e as respectivas referências são:

Rabinowitch (1951), Monteith (1963) e de Wit (1965):

$$P_N = \frac{P_{\max} \times I}{\frac{P_{\max}}{\phi_{(I_0)}} + I} \quad (33)$$

Baly (1935):

$$P_N = \frac{\phi_{(I_0)} \times I \times P_{gmax}}{\phi_{(I_0)} \times I + P_{gmax}} - R_D \quad (34)$$

Kaipiainen (2009):

$$P_N = \frac{I \times P_{gmax}}{I + I_{(50)}} - R_D \quad (35)$$

Smith (1936):

$$P_N = \frac{\phi_{(I_0)} \times I \times P_{gmax}}{\sqrt{\phi_{(I_0)}^2 \times I^2 + P_{gmax}^2}} - R_D \quad (36)$$

Jassby & Platt (1976):

$$P_N = P_{gmax} \times \tanh\left(\frac{\phi_{(I_0)} \times I}{P_{gmax}}\right) - R_D \quad (37)$$

Abe et al., (2009):

$$P_N = P_{gmax} \times \tanh\left(\frac{I}{I_{sat}}\right) - R_D \quad (38)$$

Prioul & Chartier (1977):

$$P_N = \frac{\phi_{(I_0)} \times I + P_{gmax} - \sqrt{(\phi_{(I_0)} \times I + P_{gmax})^2 - 4\theta \times \phi_{(I_0)} \times I \times P_{gmax}}}{2\theta} - R_D \quad (39)$$

Webb et al. (1974):

$$P_N = \left\{ P_{gmax} \left[1 - \exp\left(\frac{-\phi_{(I_0)} \times I}{P_{gmax}}\right) \right] \right\} - R_D \quad (40)$$

Prado & Moraes (1997):

$$P_N = \left\{ P_{gmax} \left[1 - \exp(-k(I - I_{comp})) \right] \right\} - R_D \quad (41)$$

Ye (2007):

$$P_N = \phi_{(I_0 - I_{comp})} \times \frac{I - \beta \times I}{1 + \gamma \times I} \times (I - I_{comp}) \quad (42)$$

Em que:

I : densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos ($\mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

I_{comp} : ponto de compensação luminoso ($\mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

I_{opt} : densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos quando $P_N = P_{gmax}$ ($\mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

I_{sat} : ponto de saturação luminoso ($\mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

$I_{(50)}$: ponto de saturação luminoso quando $P_N + R_D = 50\%$ da P_{gmax} ($\mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

k : fator de ajuste [$\text{s m}^2 \mu\text{mol}(\text{fótons})^{-1}$];

P_{gmax} : estimativa assintótica da taxa fotossintética bruta máxima ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

P_N : taxa fotossintética líquida ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

R_D : taxa de respiração no escuro ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

β : fator de ajuste (adimensional);

γ : fator de ajuste (adimensional);

θ : convexidade da curva (adimensional);

$\phi_{(I_0)}$: rendimento quântico quando $I = 0$ ($\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol fótons}^{-1}$);

$\phi_{(I_0-I_{comp})}$: rendimento quântico obtido no intervalo I_0 e I_{comp} ($\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol fótons}^{-1}$);

A comparação dos modelos, com relação à qualidade de ajuste aos dados experimentais, foi feita com base no coeficiente de determinação (R^2) e na soma de quadrado dos resíduos (SSE).

2.4. SIMULAÇÃO DA FOTOSÍNTESE PARA PLANTA ISOLADA

Quando se deseja simular a fotossíntese em plantas ou para dosséis como um todo, é necessário conhecer a distribuição da irradiância sobre a superfície das folhas. Para tanto, normalmente, divide-se os níveis de irradiância em diferentes classes, baseado no valor máximo possível interceptado por uma folha na posição perpendicular aos raios solares. Assim, em cada camada, ou seção da copa, agrupa-se a área das folhas pertencentes a mesma classe de irradiância.

Entretanto, é necessário também que a área das folhas agrupadas em uma mesma classe, possuam a mesma resposta da fotossíntese à variação da luz. Para isso, separa-se também as folhas em duas classes, folhas de sol e folhas de sombra. Originalmente, em seu modelo THORPE et al. (1978) utilizaram um único modelo matemático de resposta da fotossíntese à luz, independentemente do tipo de folha. Esse procedimento foi alterado no modelo, adotando-se uma equação para folhas de sol e outra para folhas de sombra. Além disso, calculou-se separadamente a distribuição da irradiância solar sobre as folhas de sol e de sombra. No modelo original, a área das folhas que recebem apenas radiação difusa poderiam ser agrupadas na mesma classe de irradiância que a área das folhas que recebem baixos valores de irradiância direta. Isso ocorre em situações, por exemplo, em que o valor máximo de irradiância (referência para determinação das classes) é baixo, associado a valores altos de irradiância difusa.

A irradiância que a atinge as folhas de sol é composta pela irradiância solar direta, a irradiação difusa do céu e refletida pelo solo, e a irradiação espalhada no interior da própria planta que é reinterceptada pelas folhas. As folhas de sombra, interceptam apenas a irradiância difusa do céu e refletida pelo solo e a irradiância espalhada pela planta. Assim, calculando a contribuição da fotossíntese de cada tipo de folha, cada qual com o tipo e valor de irradiação, determina-se a assimilação total de CO_2 para cada elemento delimitado no interior da planta. Somando-se a contribuição de todos os elementos, obtêm-se o valor total de CO_2 da planta inteira.

2.4.1. Geometria da copa

A forma geométrica da copa é representada por um elipsóide de revolução, formado pela rotação em torno do eixo vertical (Figura 7). A copa é dividida em vários elementos, formados primeiramente pela divisão da seção vertical da elipse em três elipses concêntricas. Posteriormente, a secção vertical da elipse é subdividida por sucessivos raios de $\pi/8$ radianos. Finalmente, os elementos são gerados pela rotação sucessiva da secção vertical em ângulos de $\pi/8$ radianos. Assim, a copa é formada por 384 elementos. Geometricamente, esses elementos são segmentos de toro.

2.4.2. A matriz de posições no interior da copa

Seja TR o raio total da elipse em um ângulo qualquer com relação ao eixo vertical, calculado como:

$$TR = \frac{a \times c}{\sqrt{(c \times \text{sen} \varphi)^2 + (a \times \text{cos} \varphi)^2}} \quad (43)$$

Em que:

a : semieixo horizontal da elipsoide;

c : semieixo vertical da elipsoide.

φ : ângulo formado entre uma posição qualquer e o eixo vertical, contado a partir do topo da elipse. O incremento desse ângulo adotado originalmente foi de $\pi/8$ radianos.

O menor raio da elipse (RX), ou seja, determinado pela menor elipse concêntrica, pode ser calculado:

$$RX = \frac{TR}{2 \times NR} \quad (44)$$

Onde NR é o número de elipses concêntricas.

Assim, a distância do centro do elipsoide ao ponto qualquer pode ser calculada:

$$R = RX(2 \times J - 1) \quad (45)$$

Em que J , varia de 1 a NR . Assim, as coordenadas x , y , e z do ponto determinado por R é calculada por:

$$POSx = R \times \text{sen}\varphi \times \cos\phi \quad (46)$$

$$POSy = R \times \text{sen}\varphi \times \text{sen}\phi \quad (47)$$

$$POSz = R \times \cos\varphi \quad (48)$$

Na Figura 13 está exemplificado o resultado do cálculo da matriz de posições geradas para as três elipse concêntricas.

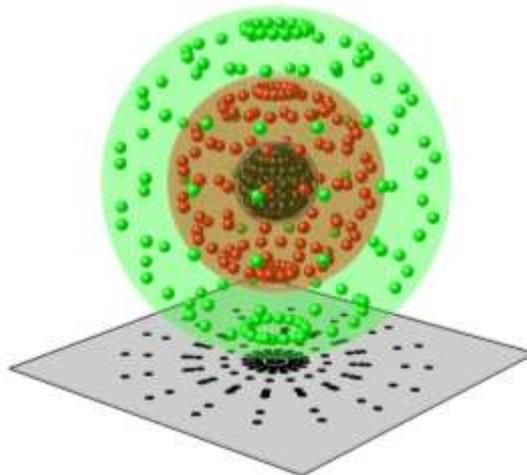


Figura 13. Geometria da copa pelo modelo de Thorpe et al. (1978), demonstrado as três elipsoides concêntricas com pontos de amostragens no interior de cada elipsoide.

2.4.3. O volume dos segmentos

Seja R_0 o raio da elipse concêntrica i no semi-eixo C :

$$R_0 = \frac{IK \times c}{NR} \quad (49)$$

Em que:

IK : parâmetro que varia de 1 a quantidade de elipses concêntricas, sendo 1 para elipse de menor diâmetro;

C : semi-eixo vertical da elipse;

NR : número de elipses concêntricas.

De modo semelhante, seja R_{90} o raio da elipse concêntrica i no semi-eixo A :

$$R_{90} = \frac{IK \times a}{NR} \quad (50)$$

Em que A é o semi-eixo horizontal da elipse.

A área de uma secção i da elipse definida pelos ângulos ϕ_1 e ϕ_2 (Figura 14), com relação ao semi-eixo vertical é calculada por:

$$AR = \frac{a \times c}{2} \times \left(\tan^{-1} \left(\frac{c}{a} \times \tan \phi_2 \right) - \tan^{-1} \left(\frac{c}{a} \times \tan \phi_1 \right) \right) \quad (51)$$

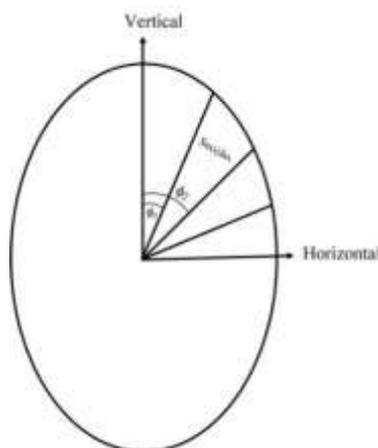


Figura 14. Demonstração da secção i com área calculada pela Equação 51.

O cálculo da área de uma secção delimitada por duas elipses concêntricas (Figura 7) é determinada pela diferença entre a área da secção i da elipse externa pela área da secção j da elipse interna. O volume de uma secção qualquer é calculada integrando a área obtida pela Equação 51 de 0 a $\pi/8$.

2.4.4. Penetração e espalhamento da radiação solar

As folhas no interior da copa são distribuídas de maneira aleatória, com relação a sua inclinação, posição e direção. Essa conformação é definida como distribuição foliar esférica (de WIT, 1965).

Com o modelo calcula-se o balanço de radiação de maneira separada para o espectro visível (0,4 – 0,7 μm) e infravermelho (0,7-3,0 μm). Em cada elemento de volume, determina-se a proporção da radiação incidente que é refletida, absorvida e transmitida. Posteriormente, a contribuição de cada elemento é somada, fornecendo o total absorvido, transmitido e refletido para toda copa.

A fração da área das folhas no elemento i que recebe radiação solar ininterruptamente na direção (θ, ϕ) , depende do comprimento da trajetória da radiação (l_i) no interior da copa naquela direção:

$$f_{bi} = e^{-KF_{s_i}} \quad (52)$$

Onde F , e l_i são a densidade foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$) e a trajetória da luz (m) no interior da copa, definidos anteriormente.

A radiação solar direta é interceptada em todos os ângulos pelas folhas do elemento i , e a área da superfície das folhas que recebe radiação solar direta em qualquer superfície no intervalo de R a $(R + dR)$ é calculado por:

$$dA_i = 2FV_i f_{bi} R dR / R_p^2 \quad (53)$$

em que R_p é a irradiação perpendicular ao feixe de luz (W m^{-2}), e V_i é o volume do elemento i (m^3). A área em 10 classes de irradiação de mesma amplitude é calculada somando a equação anterior para todos os elementos da copa.

A radiação difusa do céu que penetra o elemento i é recebida igualmente por todas as folhas do elemento. A proporção recebida em uma superfície horizontal dentro do elemento i é calculada por:

$$f_{di} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \exp^{-KF_{s_i}} \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (54)$$

Além da radiação difusa do céu, o modelo considera também que o elemento i recebe radiação difusa do solo, assumindo que este espalha a radiação isotropicamente. Assim, a radiação espalhada pelo solo e que penetra o elemento i , f_{gi} , é numericamente igual a f_{dj} , onde o elemento j é diametralmente oposto ao elemento i , e com a mesma distância do centro do elipsoide.

A energia total inicialmente interceptada pela copa, ou seja, radiação solar direta e difusa, e a radiação espalhada pelo solo, é determinada somando a contribuição de cada elemento da copa:

$$U_0 = \Sigma FV_i (f_{bi}Rp + f_{di}Rd + \alpha_g f_{gi}Rt) \quad (54)$$

onde R_p é a irradiância solar em um plano perpendicular ao feixe, R_d é irradiância difusa, R_t é a irradiância solar global (direta + difusa) e α_g é o albedo do solo.

Da energia total interceptada inicialmente em cada elemento, uma fração ω é espalhada isotropicamente pelas folhas e, parte dessa energia é perdida pela copa. A fração da energia espalhada que é perdida para o céu e para o solo, são, respectivamente: $1/2\omega f_{di}$ e $1/2\omega f_{gi}$. O total perdido por toda copa após o espalhamento inicial é calculado:

$$T_1 = \Sigma 1/2 \omega FV_i (f_{bi}Rp + f_{di}Rd + \alpha_g f_{gi}Rt) (f_{di} + f_{gi}) \quad (55)$$

Parte da radiação que foi inicialmente espalhada é interceptada pela segunda vez:

$$U_1 = \omega U_0 - T_1 \quad (56)$$

Para simplificar, assume-se que energia U_1 é recebida igualmente por todas as folhas. Entretanto, parte dela, ωU_1 , é espalhada novamente pelas folhas, e então, parcialmente perdida pela copa, $T_2 = \omega t U_1$. A fração que é perdida pela copa, t , pode ser calculada somando a radiação perdida em cada elemento:

$$T_2 = \omega t U_1 = \Sigma \omega FV_i U_1 1/2 (f_{di} + f_{gi}) / At \quad (57)$$

E, conseqüentemente:

$$t = \Sigma 1/2 FV_i (f_{di} + f_{gi}) / At \quad (58)$$

em que, At é a área foliar total da planta.

Parte da radiação espalhada pela segunda vez é reinterceptada, U_2 , espalhada e então perdida novamente pela copa, T_3 :

$$U_2 = \omega U_1 (1-t) \quad (59)$$

$$T_3 = \omega t U_2 = \omega^2 t U_1 (1-t) \quad (60)$$

Assim, a energia total perdida após a primeira interceptação é representada por uma série geométrica:

$$T_0 = T_1 + \sum_{n=2}^{\infty} T_n = T_1 + \omega t U_1 / (1 - \omega + \omega t) \quad (61)$$

A radiação total que é espalhada e absorvida uniformemente pelas folhas é calculada:

$$U = \omega U_0 - T_0 = \frac{U_1(1-\omega)}{A_1(1-\omega + \omega t)} \quad (62)$$

A irradiância fotossinteticamente ativa é calculada para cada classe de irradiância, considerando a radiação direta incidente, radiação difusa do céu e refletida pelo solo, e a radiação espalhada dentro da árvore mas que não foi perdida pelos espaços na copa.

2.4.5. Partição da radiação solar

Em modelagem do processo de transferência da radiação solar através da vegetação, é necessário tratar separadamente a fração da radiação solar direta e difusa para as faixas espectrais do visível (0,4-0,7 μm) e do infravermelho (0,7-3,0 μm), nos diferentes processos biofísicos, como a fotossíntese e a transpiração. Entretanto, em um mesmo local ou região, dificilmente se dispõe de todas essas medidas radiométricas. Assim, recorre-se a modelos matemáticos que fornecem a fração da radiação direta e difusa para cada região espectral, a partir de um único tipo de medida, geralmente a radiação solar global. Assim, utilizou-se o modelo de WEISS & NORMAN (1985), com algumas adaptações, que serão descritas a seguir.

A radiação solar direta potencial no espectro do visível que atinge a superfície do solo pode ser calculada pela Equação 63:

$$R_{DV} = S_V \left[-0,185 \left(\frac{P_L}{P_0} \right) m_o \right] \cos \theta \quad (63)$$

Onde S_V representa a radiação solar visível no topo da atmosfera, P_L e P_0 são respectivamente a pressão atmosférica do local e a pressão atmosférica ao nível do mar, m_o representa a massa óptica e θ é o ângulo zenital. WEISS & NORMAN (1985) utilizaram o valor médio de 600 W m^{-2} para S_V . Entretanto, o valor adotado foi obtido utilizando as Equações 64 e 65:

$$S_V = 0,439 S_0 \quad (64)$$

$$S_0 = 1367 \left(1,0 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi DJ}{365} \right) \right) \quad (65)$$

Onde 0,439 é a fração da radiação visível no espectro solar no topo da atmosfera, e S_0 é a constante solar. A massa óptica foi calculada pela expressão:

$$m_o = 1 / \cos \theta \quad (66)$$

A radiação difusa potencial no espectro visível foi calculada:

$$R_{dV} = 0,4(S_{VU} - R_{DV}) \cos \theta \quad (67)$$

A radiação solar direta infravermelha potencial que atinge a superfície do solo foi obtida por:

$$R_{DN} = S_N e^{(-0,06(P/P_0)m_o - w) \cos \theta} \quad (68)$$

Onde S_N , ou seja, a radiação solar infravermelha no topo da atmosfera, foi calculado por:

$$S_N = 0,527 S_0 \quad (69)$$

Em que 0,527 representa a fração da radiação solar infravermelha no topo da atmosfera.

A radiação difusa potencial no espectro infravermelho foi calculado por:

$$R_{dV} = 0,6(S_N - R_{DN} - w) \cos \theta \quad (70)$$

Onde w , representa a absorção da água no espectro infravermelho, obtido pela expressão:

$$w = S_0 \times \text{anti log}[-1,195 + 0,4459 \log_{10} m_o - 0,0345(\log m_o)^2] \quad (71)$$

A radiação solar visível total foi calculada por:

$$S_V = R_t \left[\frac{R_v}{R_v + R_N} \right] \quad (72)$$

Cujos valores de R_v e R_N foram obtidos:

$$R_v = R_{DV} + R_{dV} \quad (73)$$

$$R_N = R_{DN} + R_{dN} \quad (74)$$

A fração da radiação visível direta foi estimada:

$$f_v = \frac{R_{DV}}{R_v} \left[1 - \left(\frac{A - \text{RATIO}}{B} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (75)$$

Da mesma maneira, a radiação solar infravermelha total e a fração direta foram determinados por:

$$S_N = R_t \left[\frac{R_N}{R_v + R_N} \right] \quad (76)$$

$$f_N = \frac{R_{DN}}{R_N} \left[1 - \left(\frac{C - \text{RATIO}}{D} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (77)$$

As constantes A , B , C e D fornecidas pelos autores foram 0,9;0,7;0,88 e 0,68 respectivamente. O parâmetro *RATIO* foi calculado:

$$\text{RATIO} = \left[\frac{R_t}{R_v + R_N} \right] \quad (78)$$

Frequentemente, há disponibilidade apenas de medições da radiação fotossinteticamente ativa e não da radiação solar global (R_t). Nesses casos, o valor de R_t , necessário como entrada no modelo de WEISS & NORMAN (1985), pode ser obtido pela relação entre a fração da radiação visível em relação a radiação global, ou seja, após atravessar a atmosfera.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. INTERCEPTAÇÃO DA LUZ

Os resultados da densidade de área foliar medidos estão descritos na Tabela 2. Houve diferença significativa entre as datas de avaliação e entre os clones, porém, a interação Data x Clone não foi significativa pela análise de variância ($p > 0,05$). A FAGA 10 foi o clone que obteve o menor valor de densidade de área foliar, com a média geral de $1,04 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$. Com relação as datas de avaliação, houve diferença apenas entre o meses de agosto/2012 e outubro/2012, com valores de $1,12 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ e $2,02 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ respectivamente. Contudo, não é possível afirmar que houve aumento ou diminuição na densidade de área foliar ao longo do tempo, já que os demais meses não diferiram estatisticamente entre si.

Por outro lado, pela dinâmica do índice de área foliar (Figura 15) observa-se que houve variações bruscas da área foliar ao longo do período. Essa variação ocorre devido o processo natural de renovação das folhas durante o ciclo da planta. O surgimento de novas folhas ocorre pela brotação dos fluxos vegetativos e reprodutivos produzidos principalmente na periferia da copa. Inicialmente, os fluxos possuem uma pequena área foliar e, conseqüentemente, pouca influência na interceptação da luz. Posteriormente, as folhas produzidas se desenvolvem e crescem até se tornarem completamente expandidas com máxima área foliar, e maior capacidade de interceptação da luz.

Esse comportamento fenológico de enfolhamento e desfolhamento da cultura foi descrito anteriormente por PARENTE (1981) e ALMEIDA et al. (2002). Segundo

os autores, o cajueiro apresenta uma aparente fase de repouso vegetativo que ocorre em um período de alta concentração de chuvas (janeiro a abril). Apesar de a queda das folhas ocorrer durante todo o ano, há uma acentuação entre os meses de maio e agosto. Concomitantemente, há intensa brotação das gemas que resultará no surgimento dos novos fluxos vegetativos. Posteriormente, ocorre novo fluxo de crescimento, embora menos expressivo, após o fim da floração, normalmente em meados de novembro/dezembro. Porém, essas características variam de intensidade e época de ocorrência, conforme as condições ambientais do local, especialmente com relação a luminosidade e distribuição de chuvas (PARENTE 1981).

Tabela 2. Valores médios da densidade de área foliar dos clones FAGA 1, FAGA 10 e FAGA 11 de cajueiro anão entre 24/08/2012 e 23/11/2012 com frequência de medição mensal

Data	Densidade de área foliar ($m^2 m^{-3}$)			Média ($m^2 m^{-3}$)
	FAGA 1	FAGA 10	FAGA 11	
24/08/12	0,98	0,96	1,41	1,12 B
21/09/12	2,05	0,83	1,15	1,35 AB
26/10/12	2,38	1,36	2,34	2,02 A
23/11/12	2,22	0,99	1,86	1,69 AB
19/12/12	1,74	1,08	2,04	1,62 AB
Média	1,875 a	1,043 b	1,761 a	*1,56
CV (%)				39

Médias seguidas de mesma letra na linha e na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). * Valor correspondente a média geral da densidade de área foliar. CV: coeficiente de variação.

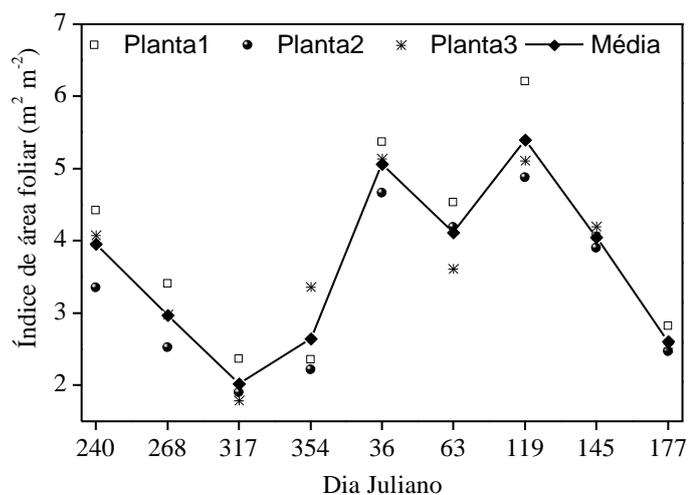


Figura 15. Índice de área foliar de plantas de cajueiro anão, clone FAGA 1 (Planta1, Planta2 e Planta3) entre 27/08/2012 (Dia Juliano 240) e 26/06/2013 (Dia juliano 177) com frequência de medição mensal. Santo Antônio de Leverger - MT. Dados correspondentes a médias de quatro leituras distantes em aproximadamente 90° entre si.

Pela variação nos dados medidos de densidade foliar nota-se que, conforme afirmado por ABRAHA & SAVAGE (2010), dentre os parâmetros de entrada do modelo, a densidade de área foliar pode ser considerada a variável mais difícil de se obter e, além disso, é uma das que mais influenciam no resultado. Diante disso, diversas metodologias para determinação direta ou indireta deste parâmetro têm sido desenvolvidas. A utilização da interceptação da luz como metodologia de estimativa da densidade de área foliar foi proposta por diversos autores como JAHN (1979) em citros e ANTUNES JUNIOR et al. (2009) em mangueira. Para dosséis horizontais e homogêneos, a estimativa pode ser obtida pela simples inversão do modelo de Lambert-Ber. No caso de dosséis descontínuos, como em plantas isoladas, é necessário encontrar modelos capazes de simular a interceptação da luz em copas com formatos muitas vezes complexos. Nesse sentido, o modelo de CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973) é uma alternativa para plantas cuja copa possui a forma de um elipsoide. Para tanto, a validação do modelo é de fundamental importância.

Analisando os resultados simulados obtidos com o modelo observa-se que, em todo período de estudo, a transmissão da radiação fotossinteticamente ativa variou entre as plantas e entre a escala temporal adotada. Nota-se que, a exceção da

planta 2, a medida que a simulação foi efetuada em uma escala temporal maior, houve aumento nos valores de R^2 , d e c , e redução no $EAMP$ (Figura 16; Figura 17; Figura 18; Figura 19; Figura 20). Na última escala horária simulada os parâmetros estatísticos alcançaram valores de R^2 : 0,90; d : 0,96; c : 0,91 e $EAMP$: 5,65%, para planta 1 (Figura 20A; Figura 20D). Durante todo período de estudo, independentemente da escala temporal utilizada, os maiores valores de R^2 , d e c , e os menores de $EAMP$ foram encontrados na planta 1. Na planta 2 foram encontrados valores máximos de 0,20; 0,63; e 0,27 para R^2 , d e c respectivamente, e $EAMP$ mínimo de 21,45% (Figura 16E; Figura 20E). A planta 3 por sua vez, obteve R^2 , d , c , e $EAMP$ intermediários às plantas 1 e 2 (Figura 16C; Figura 16F; Figura 17C; Figura 17F; Figura 18C; Figura 18F; Figura 19C; Figura 19F; Figura 20C; Figura 20F).

ABRAHA & SAVAGE (2010) utilizaram o modelo de CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973) para simular a interceptação da radiação solar global em escala horária para várias espécies. Em alguns casos, o modelo apresentou tendência de subestimar ou superestimar a quantidade de radiação solar transmitida abaixo da copa, especialmente em plantas de grande porte. Assim, segundo os resultados apresentados por estes autores, a concordância entre os valores simulados e medidos, avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2) e pelo d , variou de 0,35 a 1 e 0,58 a 1, respectivamente. Segundo os autores, as causas dessa discrepância seriam a assimetria das copas com relação à ramificação, a densidade foliar e as dimensões da copa. Outro modelo tridimensional foi apresentado por CASTRO & FETCHER (1998), que dividiram a copa em células cúbicas caracterizadas pelo ângulo foliar e índice de área foliar. O coeficiente de determinação entre os valores simulados e medidos encontrado pelos autores foi 0,714.

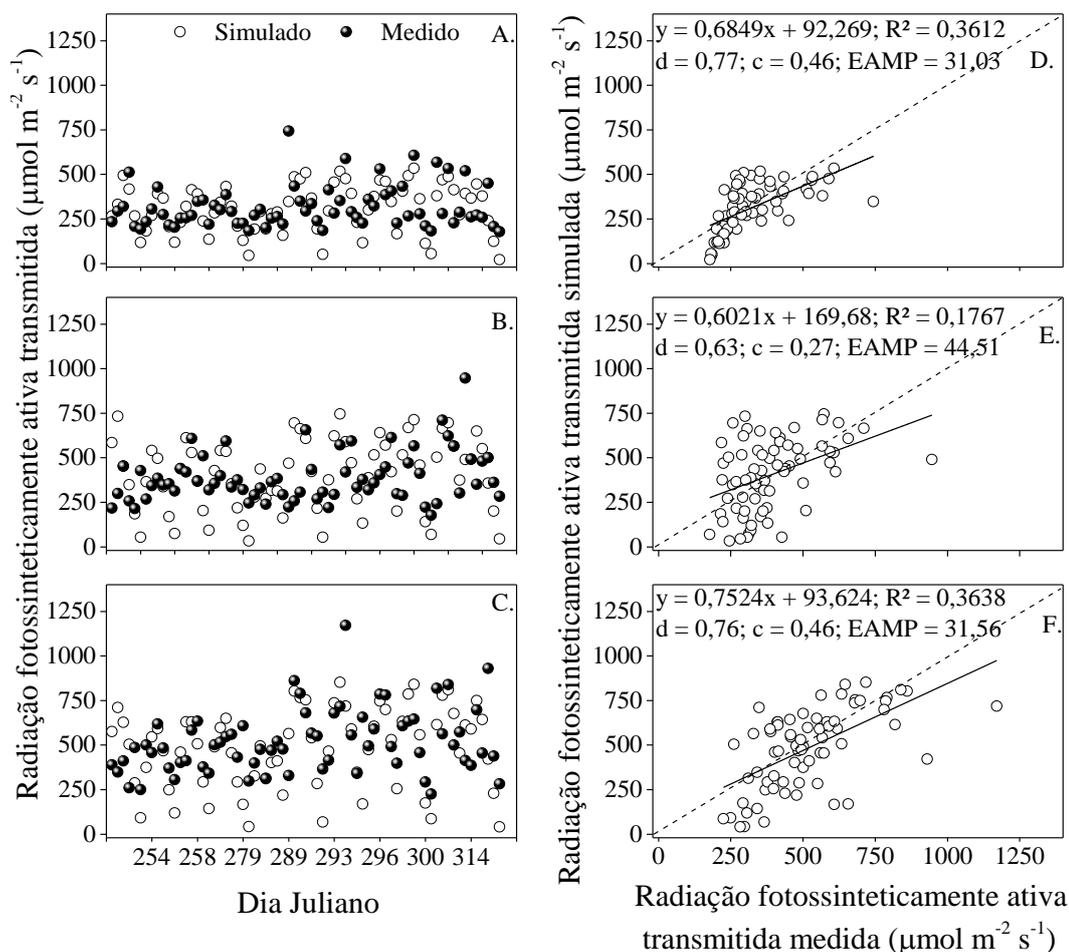


Figura 16. Radiação fotossinteticamente ativa transmitida abaixo da copa da planta 1 (A e D), planta 2 (B e E) e planta 3 (C e F) de cajueiro anão, simulada e medida com sensores pontuais a cada 60 min entre 09:00 até 16:00 h, no período de 03/09/2012 (Dia Juliano 247) a 09/11/2012 (Dia Juliano 314), com frequência semanal. Santo Antônio de Leverger-MT. Regressões significativas ($p < 0,05$).

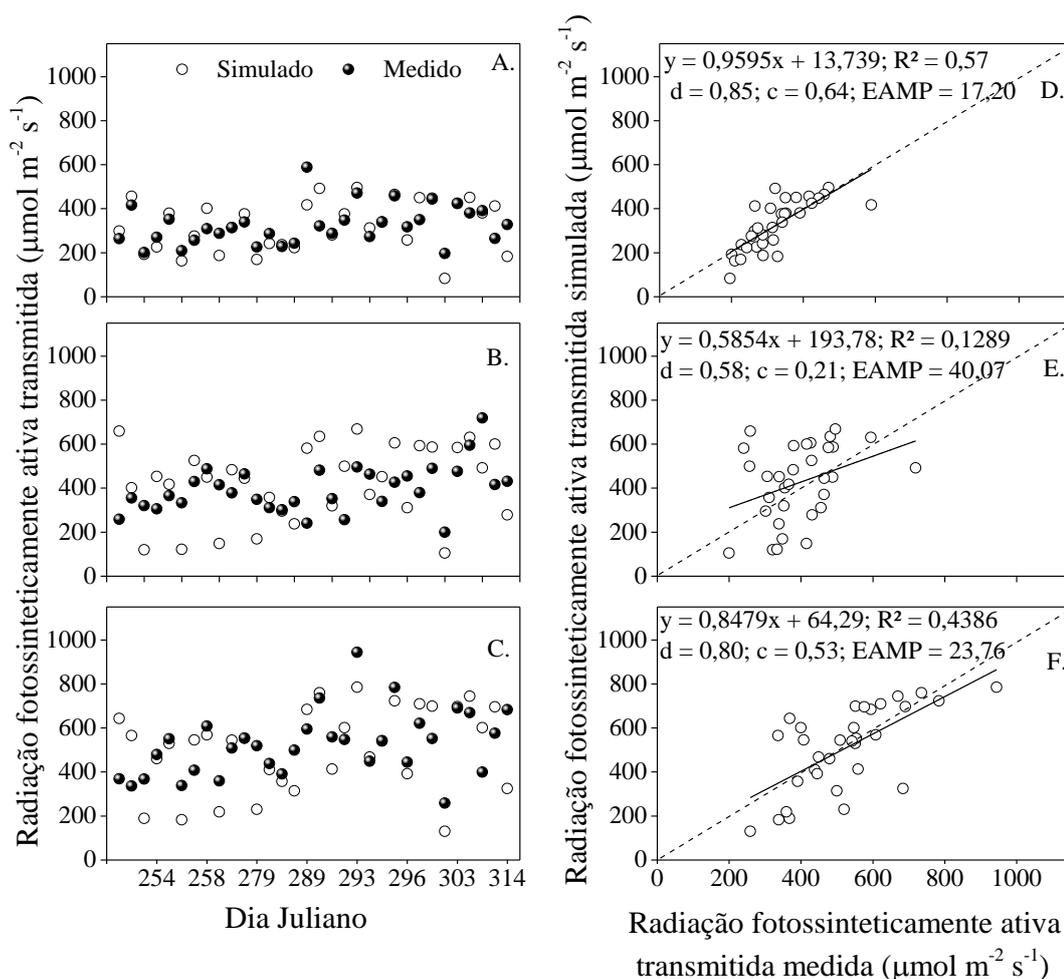


Figura 17. Radiação fotossinteticamente ativa transmitida abaixo da copa da planta 1 (A e D), planta 2 (B e E) e planta 3 (C e F) de cajueiro anão, simulada e medida com sensores pontuais a cada 120 min, entre 09:00 até 16:00 h, no período de 03/09/2012 (Dia Juliano 247) a 09/11/2012 (Dia Juliano 314), com frequência semanal. Santo Antônio de Leverger-MT. Regressões significativas ($p < 0,05$).

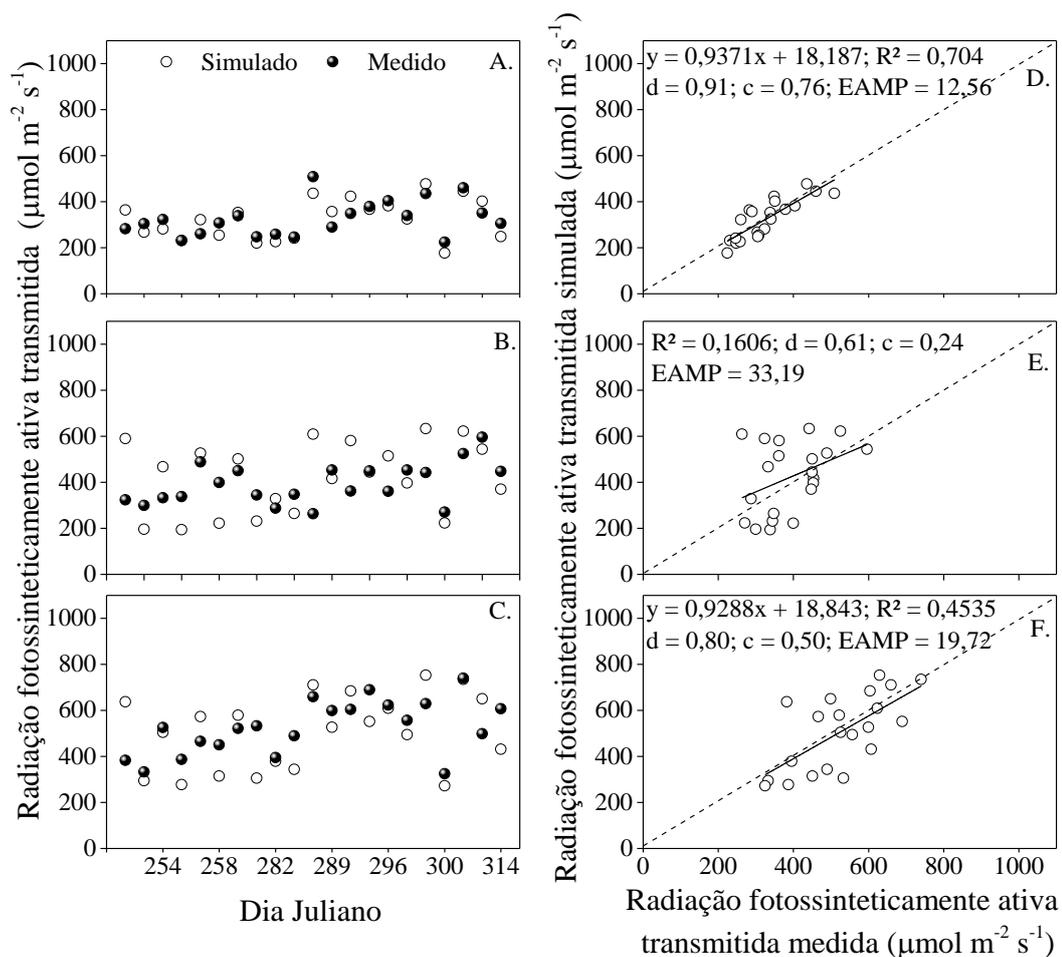


Figura 18. Radiação fotossinteticamente ativa transmitida abaixo da copa da planta 1 (A e D), planta 2 (B e E) e planta 3 (C e F) de cajueiro anão, simulada e medida com sensores pontuais a cada 180 min, entre 09:00 até 16:00 h, no período de 03/09/2012 (Dia Juliano 247) a 09/11/2012 (Dia Juliano 314), com frequência semanal. Santo Antônio de Leverger-MT. Regressões significativas ($p < 0,05$).

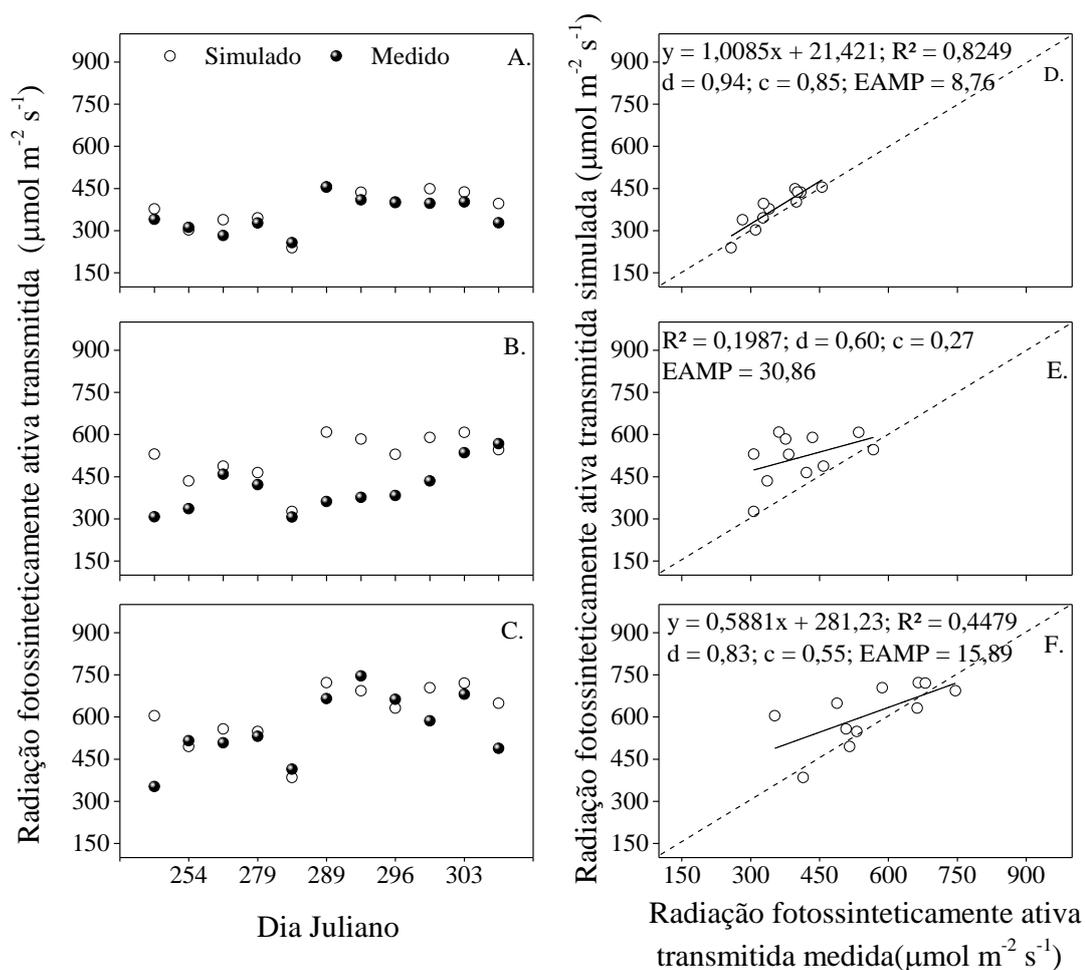


Figura 19. Radiação fotossinteticamente ativa transmitida abaixo da copa da planta 1 (A e D), planta 2 (B e E) e planta 3 (C e F) de cajueiro anão, simulada e medida com sensores pontuais a cada 240 min, entre 09:00 até 16:00 h, no período de 03/09/2012 (Dia Juliano 247) a 09/11/2012 (Dia Juliano 314), com frequência semanal. Santo Antônio de Leverger-MT. Regressões significativas ($p < 0,05$).

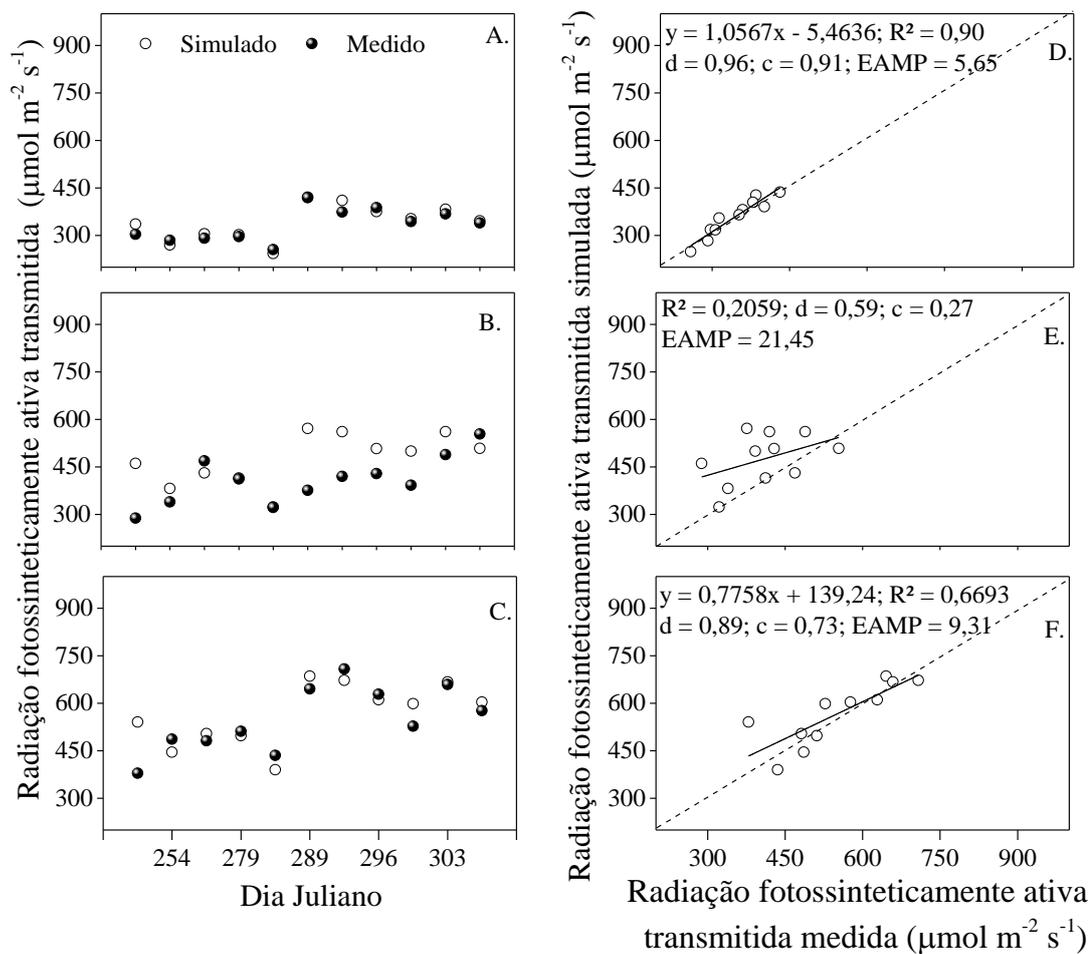


Figura 20. Radiação fotossinteticamente ativa transmitida abaixo da copa da planta 1 (A e D), planta 2 (B e E) e planta 3 (C e F) de cajueiro anão, simulada e medida com sensores pontuais a cada 300 min, entre 09:00 até 16:00 h, no período de 03/09/2012 (Dia Juliano 247) a 09/11/2012 (Dia Juliano 314), com frequência semanal. Santo Antônio de Leverger-MT. Regressões significativas ($p < 0,05$).

Pelas diferenças, entre as plantas, na qualidade do ajuste estatístico nota-se que dependendo do local escolhido no interior ou abaixo da copa, a simulação da interceptação da luz para dados pontuais pode ser impraticável. Isso ocorre devido a diferença natural das características da arquitetura e distribuição da área foliar na copa. Pela avaliação visual, observou-se que a planta 1 foi a que possuía a copa com características estruturais mais próximas das exigida pelo modelo. O modelo de Lambert-Beer assume que a copa é horizontalmente homogênea com folhas distribuídas aleatoriamente no espaço, o que pode resultar em erros na simulação. Segundo WHITEHEAD et al. (1990), a suposição de que a densidade foliar segue distribuição aleatória na copa pode levar a superestimação de 20 a 30% na simulação da interceptação da luz.

Outra possível fonte de erros seria a ocorrência de períodos em que a luz direta atravessa a copa sem ser interceptada ou quando é minimamente interceptada pelas folhas, já que a transmissão da radiação solar através da folhagem é caracterizada por uma grande variabilidade horizontal (COHEN & FUCHS, 1987).

Na Figura 21 estão apresentadas as médias de 10 min da PAR medida acima e abaixo da copa das plantas em dois dias de avaliação. Observa-se que em alguns períodos do dia, ocorrem determinados “picos” de medição da luz devido à maior incidência de luz solar direta sobre os sensores. Isso ocorre devido à presença de espaços vazios dentro da própria copa das plantas (CAMPELO JÚNIOR et al., 1996). Nesse caso, como o modelo de interceptação da luz adotado assume que a copa possui formato geométrico de um elipsoide com distribuição foliar uniforme ao longo da copa, a simulação da transmissão da luz abaixo da copa tende a subestimar o valor real. Situação semelhante a esta foi encontrada por COHEN & FUCHS (1987) trabalhando com citros, CAMPELO JÚNIOR et al. (1996) com seringueira e, por MARISCAL et al. (2000) com oliveira.

Uma alternativa para minimizar a situação descrita anteriormente seria a utilização de tubos solarímetros que integram a radiação solar medida numa determinada área representativa, como feito por ANNANDALE et al. (2004) e ABRAHA & SAVAGE (2010). Porém, a medição da PAR com sensores pontuais e a comparação entre dados medidos e simulados permite avaliar a possibilidade de

estimar a radiação fotossinteticamente ativa interceptada em ramos de cajueiro, como feito em coníferas por SMOLANDER & STERNBERG (2001).

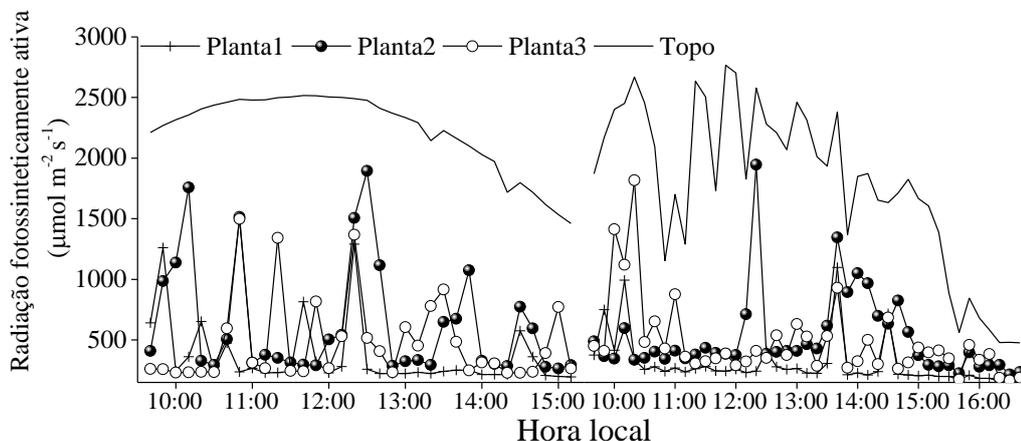


Figura 21. Valores medidos com sensores pontuais de radiação fotossinteticamente ativa incidente e transmitida pela copa das plantas de cajueiro anão utilizadas no estudo, nos dias 29/10/2012 e 09/11/2012. Santo Antônio de Leverger-MT. Dados correspondentes a médias a cada 10 min.

Os melhores resultados obtidos pela simulação da interceptação da luz em escalas maiores podem ser explicados pela redução na variabilidade espacial e temporal da quantidade de luz transmitida pela copa (COHEN & FUCHS, 1987; GÉNARD & BARET, 1994; MARISCAL et al., 2000). Essa variação foi encontrada em citros (COHEN & FUCHS, 1987), em pessegueiro (GÉNARD & BARET, 1994) e em oliveira (MARISCAL et al., 2000), e foi atribuída, em parte, pelas características da arquitetura das plantas e distribuição foliar dentro da copa. Como consequência, as suposições assumidas nos modelos da transmissão da luz podem não ser suficientes para simulação em escala horária em algumas espécies.

Para contornar esse problema descrito anteriormente, GÉNARD & BARET (1994) sugeriram a introdução de parâmetros explicativos que variem dentro da copa, como por exemplo, a distribuição da densidade foliar. OYARZUN et al. (2007) utilizaram a porosidade da copa como parâmetro de entrada em um modelo tridimensional de interceptação da luz. Os autores estimaram este parâmetro a partir da proporção entre “sunflecks” com a área sombreada pela copa no solo.

A utilização de dados simulados em escala horária tem a vantagem de representar com maior precisão temporal a posição do sol em relação à copa das

plantas e os diversos processos ecofisiológicos dependentes da luz interceptada (ABRAHA & SAVAGE, 2010). Além disso, com a disponibilidade de equipamento para medidas fotossintéticas instantâneas no campo, a obtenção de resultados horários da transmissão da luz pode resultar no entendimento mais adequado dos processos que resultam na produção de frutos. Entretanto, dentro das suposições assumidas no modelo, os resultados demonstraram que, pontualmente, a simulação da interceptação da luz com o modelo tridimensional de CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973) não foi adequado em escala horária sendo mais próxima do valor medido quando simulado em escala temporal de 300 min.

3.2. EFEITO DAS CARACTERÍSTICAS DO POMAR NA INTERCEPTAÇÃO DA LUZ

Observa-se que na simulação da direção do plantio, a direção que proporcionou maior interceptação da luz foi variável de acordo com as latitudes (Figura 22 e Figura 23). Nota-se porém, que para região de Cuiabá (-15,5°S), o azimute de 90° (Leste-Oeste) foi o que obteve maiores valores durante todo o dia. Quando se considera os valores médios diários, observa-se que a partir da latitude de -5°, o azimute de 90° possui valores ligeiramente superiores aos demais. Esse resultado, embora com diferenças pouco expressivas, é oposto do recomendado por CRISÓSTOMO et al. (1992), que sugere que as linhas de plantio de cajueiro sejam dispostas perpendiculares a direção Leste-Oeste.

Com relação ao espaçamento, na Figura 24 pode-se verificar o efeito da variação do espaçamento na fração da radiação solar transmitida. A fração da radiação transmitida representa o quanto da radiação solar incidente acima da copa é transmitida ao atravessar a vegetação. Para uma determinada planta no pomar, a diminuição da fração transmitida pode ser devido a interceptação da radiação pela própria planta ou pelas plantas em seu entorno. Visto que as características da planta, como densidade foliar, altura e largura foram mantidas constantes na simulação, a redução da fração transmitida na Figura 24 demonstra o efeito do sombreamento causado pelas plantas do entorno. Assim, nota-se que a partir de 50 m² de espaçamento por planta no pomar, há uma tendência de estabilizar a fração

transmitida pela planta. Esse resultado deve ser considerado considerando no planejamento de pomares.

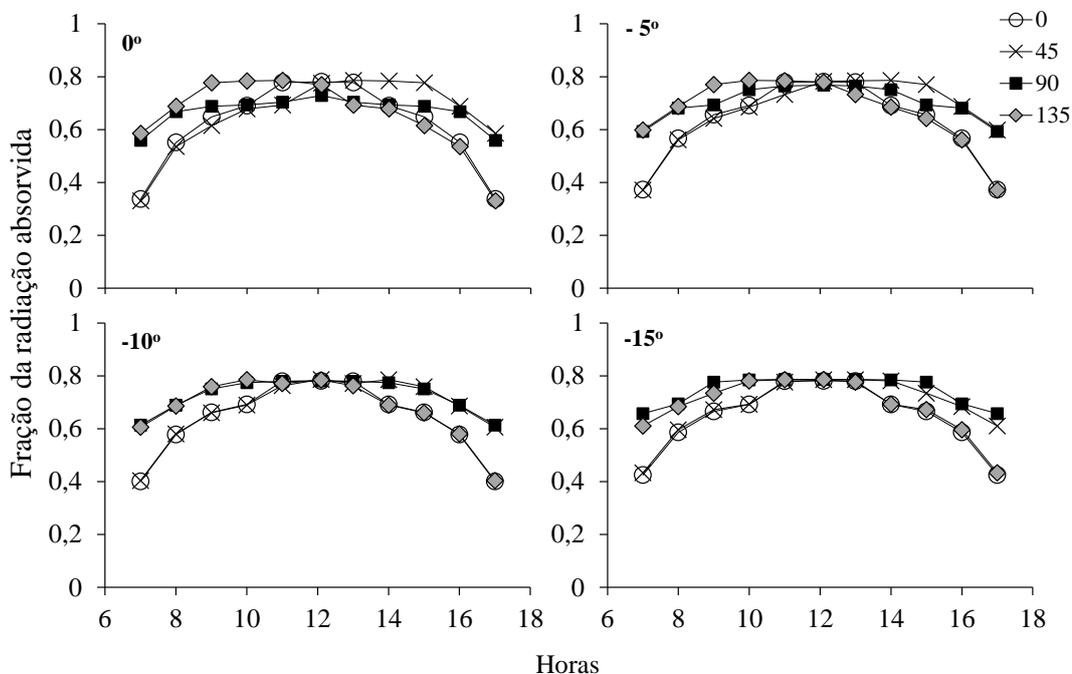


Figura 22. Efeito da variação do azimuth da linha de plantio, na simulação da fração da radiação da solar absorvida, para as latitudes de 0°, -5°, -10° e -15°. Simulação realizada para o solstício de verão no hemisfério sul.

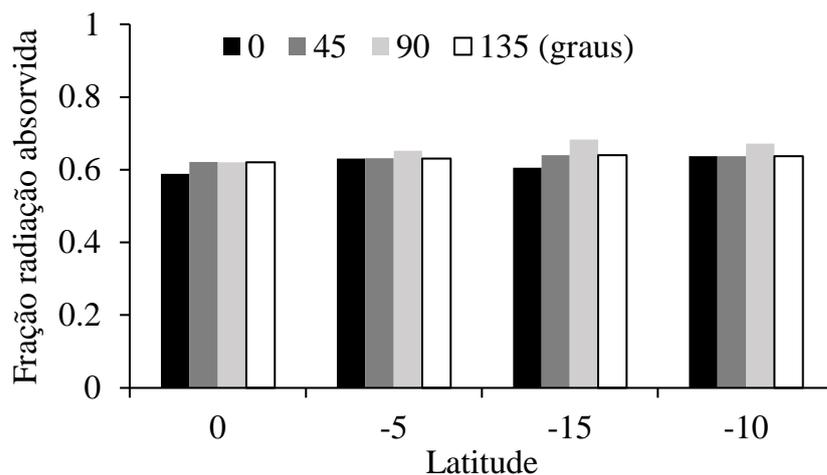


Figura 23. Efeito da variação do azimuth da linha de plantio, na média diária da fração da radiação da solar absorvida, para as latitudes de 0°, -5°, -10° e -15°. Simulação corresponde ao solstício de verão no hemisfério sul.

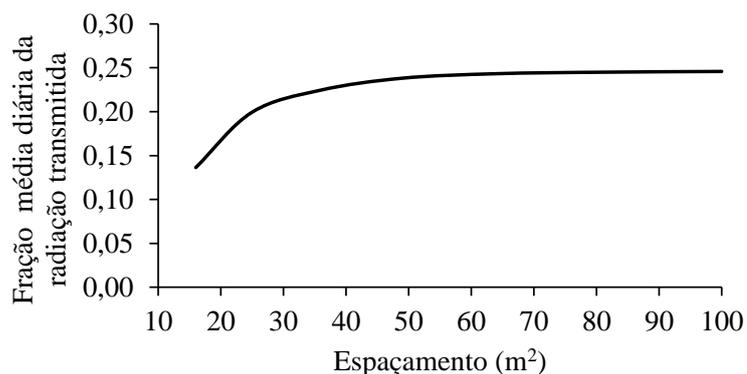


Figura 24. Efeito da variação do espaçamento da linha e entrelinha de plantio, na média diária da fração da radiação da solar transmitida. Simulação corresponde ao solstício de verão no hemisfério sul.

É válido apontar algumas considerações sobre esse tema. Atualmente, a tendência da agricultura moderna é de se adotar espaçamentos cada vez mais adensados, seja em culturas anuais ou em culturas perenes como o cajueiro. Essa recomendação é, geralmente, baseada na premissa de aumento da produtividade associado à redução dos custos de produção e otimização no uso de insumos agrícolas. Além disso, do ponto de vista do uso de recursos naturais, o maior adensamento reduz a perda de água do solo por evaporação devido a menor incidência de radiação solar sobre o solo e, conseqüentemente, menor disponibilidade de energia. Os dados apresentados na figura 24, são baseados apenas na interceptação da luz e, ainda, em uma disposição quadrada de plantio. Nesse caso, o espaçamento mais adequado é aquele em que não há competição entre as plantas por luz. Como resultado, provavelmente, haveria uma maior fotossíntese e produtividade por planta. Porém, para todo o pomar, o recomendado é que se simule a fotossíntese e produtividade do pomar, alterando o espaçamento entre plantas e entre linhas e verificando o resultado que promovesse uma maior produtividade, o que, não necessariamente, corresponde ao espaçamento de 50 m² apresentado na figura 24.

3.3. DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE ÁREA FOLIAR

De modo geral, observa-se que ao longo de todo período de estudo, não houve discrepância entre os dois métodos, considerando que as duas estimativas

apresentaram, entre si, valor de 0,89 para o índice de concordância de Willmott (Figura 25). Assim, a determinação da densidade de área foliar pelo método da contagem do número de lançamentos pode ser uma alternativa simples e de baixo custo. Entretanto, o método apresenta como dificuldade a necessidade de uma amostra de tamanho suficiente para representar toda a planta, o que pode demandar mais tempo e esforço para se obter o resultado.

Na Figura 26 estão apresentados os dados de densidade de área foliar determinados pelo método direto e pela fração da luz transmitida. Nota-se que, a variação da transmitância ao longo do período de avaliação acompanhou a variação na densidade foliar. Apesar disso, o coeficiente de determinação entre essas variáveis foi de apenas 0,09. A estimativa da densidade foliar pelo método da transmissão da luz não apresentou resultados satisfatórios. Observa-se que o método não acompanhou a variação da densidade foliar determinada pelo método padrão.

Esse fato pode ser explicado pela sua dinâmica temporal. Em cajueiro, a desfolha e o enfolhamento ocorrem de maneira concomitante. Assim, ao mesmo tempo em que há o surgimento de novas brotações vegetativas, ocorre a queda das folhas velhas. Essa dinâmica possui consequências na transferência da luz pela copa. Possivelmente, no início, a queda das folhas velhas tem maior influência sobre a transferência da luz do que as brotações novas, aumentando a transmissão da luz pela copa mesmo com o aumento da densidade foliar (Figura 26). Posteriormente, o crescimento das folhas novas provoca maior interceptação da luz, porém, ainda com simultânea queda das folhas velhas. Como as novas brotações surgem majoritariamente na parte mais externa da copa, há um aumento no índice de área foliar, mas, com diminuição da densidade de área foliar e da transmissão da luz.

Assim, aparentemente, há um atraso na detecção da variação da densidade de área foliar pelo método da luz, que fica evidenciado pela comparação entre os dados médios mensais. Além disso, há de se considerar que o método assume que a copa possui uma distribuição foliar aleatória. Apesar disso, considerando apenas os valores médios do período, não houve diferença estatística entre os métodos, com valores de 1,18 e 1,15 $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ para método padrão e método da interceptação da luz, respectivamente.

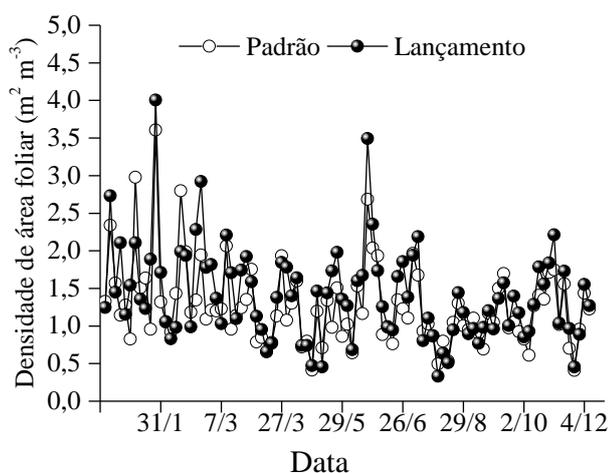


Figura 25. Densidade de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$) de cajueiro anão determinado pelo método padrão e pelo método dos lançamentos entre o período de 19/12/12 à 04/12/13 em Santo Antônio de Leverger, MT.

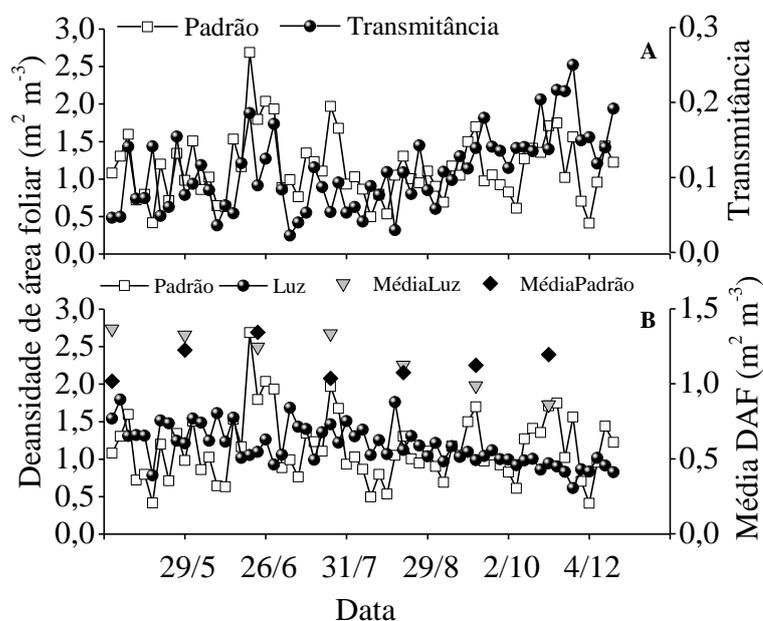


Figura 26. Densidade de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$) determinado pelo método padrão e transmitância da luz em cajueiro anão (A); Comparação entre DAF determinado pelo método padrão e pelo método da transmitância da luz (B). Medições realizadas entre o período de 29/04/12 à 04/12/13 em Santo Antônio de Leverger, MT.

3.4. CURVAS DE RESPOSTA DA FOTOSÍNTESE À LUZ

O ajuste dos modelos de resposta da fotossíntese em relação à luz para os três clones e para as duas classes foliares são apresentados nas Figuras 27, 28, 29 e 30. Os parâmetros da regressão de cada modelo ajustados estão descritos nas Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5. Para as folhas de sol, de um modo geral, pela análise visual, todos os modelos testados se ajustaram adequadamente aos dados. O valor máximo de

fotossíntese obtido foi aproximadamente $15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, independentemente do clone. A soma de quadrados dos erros, variou de 0,2135 a 2,6272 para FAGA1, de 0,1276 a 2,8839 para FAGA10 e de 0,2313 a 2,2631 para o clone FAGA11. Apesar disso, é necessário escolher o modelo caracterizado pelo melhor ajuste estatístico, já que o cálculo de algumas variáveis ecofisiológicas derivadas dos modelos podem sofrer alteração de até 100%, conforme demonstrado por LOBO et al. (2014).

Os modelos que obtiveram melhor ajuste aos dados experimentais foram o de PRIOUL & CHARLIER (1974), WEBB et al. (1974) e PRADO & MORAES (1997), e o modelo de YE (2007), para os clones FAGA1, FAGA10 e FAGA11. Para as folhas de sombra foi ajustado apenas o modelo de YE (2007) que apresenta o efeito de fotoinibição. Entretanto, pelo teste F obtido pelo método da soma de quadrados extra, não foi possível obter um único ajuste global para os três clones ($P < 0,0001$). A fotossíntese máxima atingida foi de aproximadamente $9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para todos os clones. Além disso, nota-se que para os três clones há diminuição da fotossíntese com aumento da intensidade luminosa, efeito característico de fotoinibição.

As variáveis ecofisiológicas para cada clone e os dois tipos de classe foliar estão descritos nas Tabelas 6 e 7. Para as folhas de sol, o ponto de compensação de luz (I_{comp}) ou seja quantidade de luz absorvida na qual a taxa fotossíntese líquida é igual a zero, foi de 30,0 (modelo de PRIOUL & CHARLIER (1974)), 22,8 (modelo de WEBB et al., (1974)) e $28,38 \mu\text{mol (fótons) m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (modelo de YE (2007)), Tabela 4) para os clones FAGA1, FAGA10 e FAGA11, respectivamente. Para folhas de sombra, os valores de I_{comp} foram de 12,88 para FAGA1, 10,35 para FAGA10 e $10,76 \mu\text{mol (fótons) m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para o clone FAGA11. O ponto de saturação de luz (I_{max}) proposto por LOBO et al. (2013), ou seja, o ponto além do qual não há variação significativa nos valores de fotossíntese, foi de 1263,0, 930,0 e 1056,0 $\mu\text{mol (fótons) m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em folhas de sol, para os clones FAGA1, FAGA10 e FAGA11, respectivamente. Em folhas de sombra, I_{max} foi de 613,0, 693,0 e 678,0 $\mu\text{mol (fótons) m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente para os mesmo clones. Associado a estes valores, a taxa fotossintética máxima obtida quando $I = I_{max}$, foi 15,1 e 8,4 para FAGA1, 14,3 e 8,9 para FAGA10 e 13,7 e 8,4 $\mu\text{mol (CO}_2) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para FAGA11, em folhas de sol e sombra respectivamente.

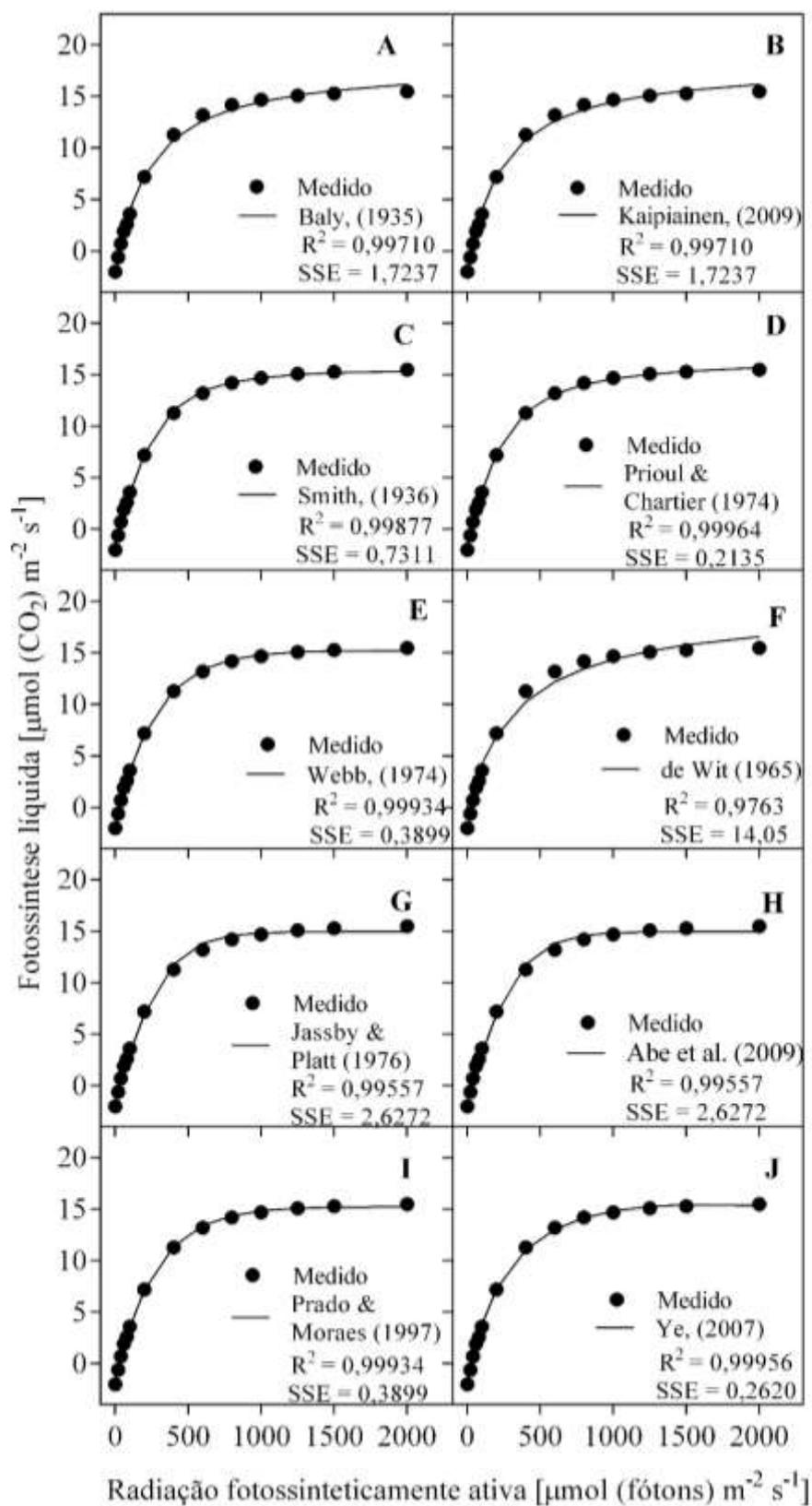


Figura 27. Ajuste de modelos de resposta da fotossíntese à luz em folhas de sol do clone FAGA 1 de cajueiro anão (*A. occidentale* L.). SSE: soma de quadrado do erro. Santo Antônio de Leverger-MT.

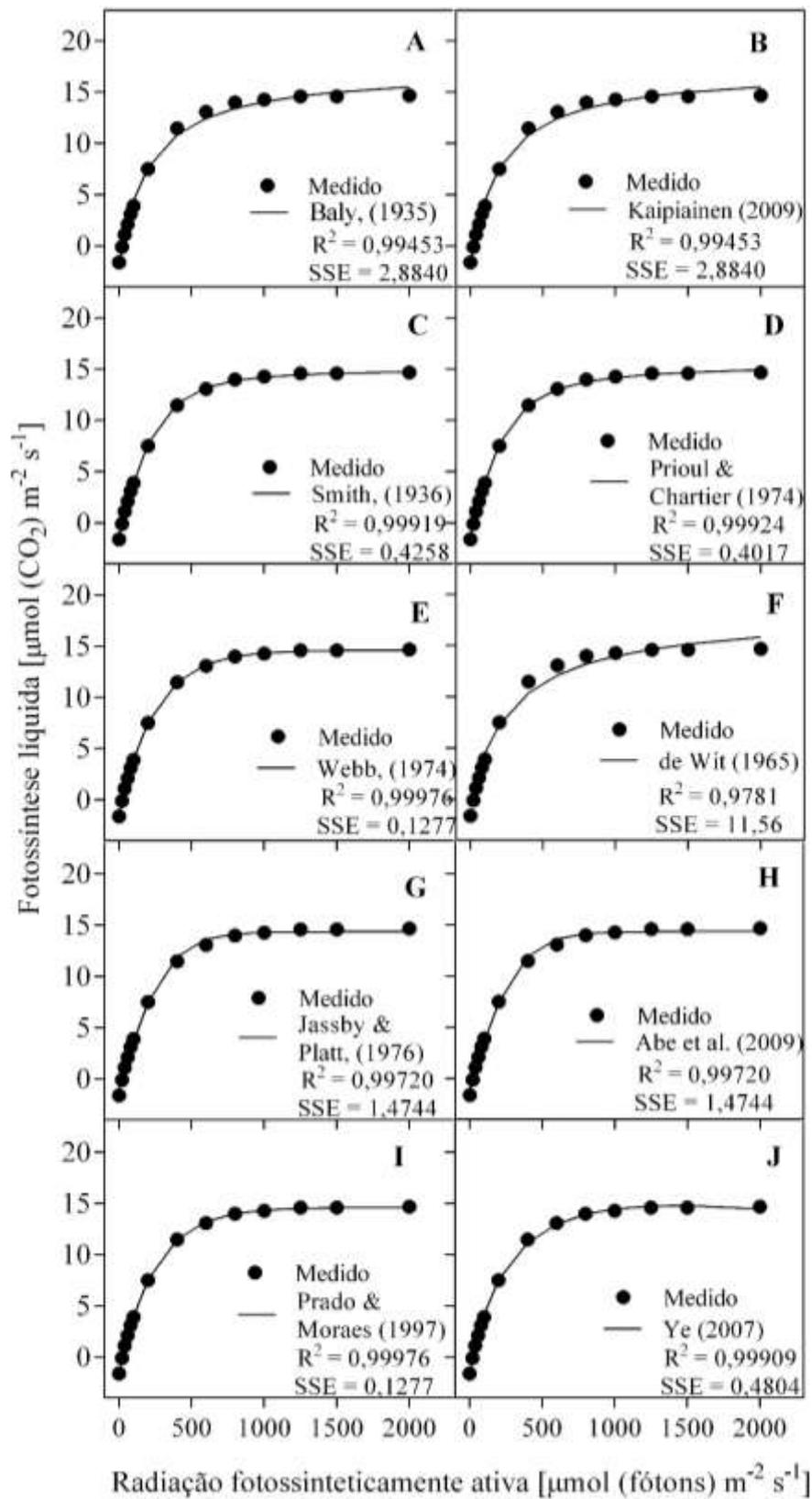


Figura 28. Ajuste de modelos de resposta da fotossíntese à luz em folhas de sol do clone FAGA 10 de cajueiro anão (*A. occidentale* L.). Santo Antônio de Leverger-MT.

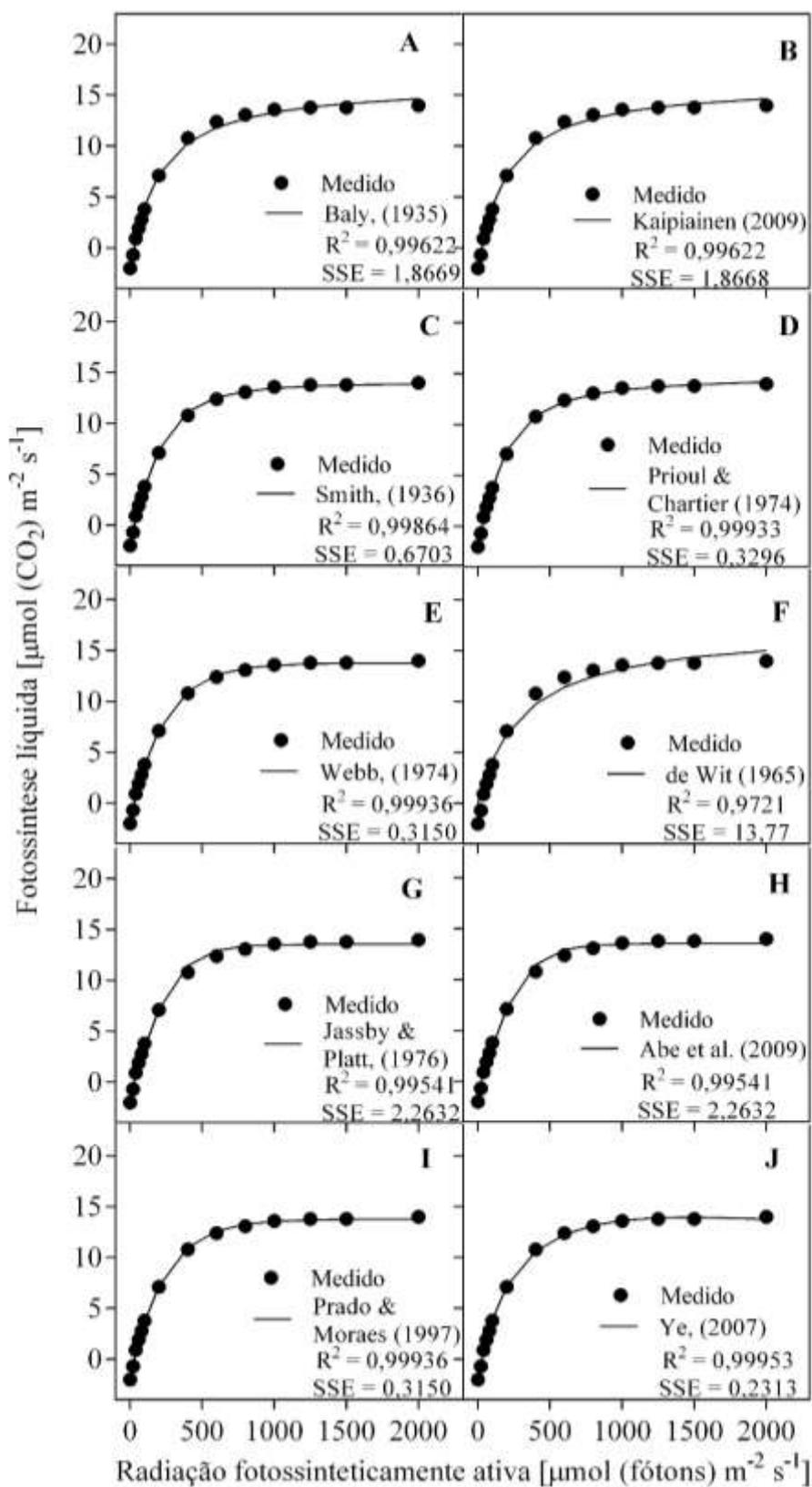


Figura 29. Ajuste de modelos de resposta da fotossíntese à luz em folhas de sol do clone FAGA 11 de cajueiro anão (*A. occidentale* L.). Santo Antônio de Leverger-MT.

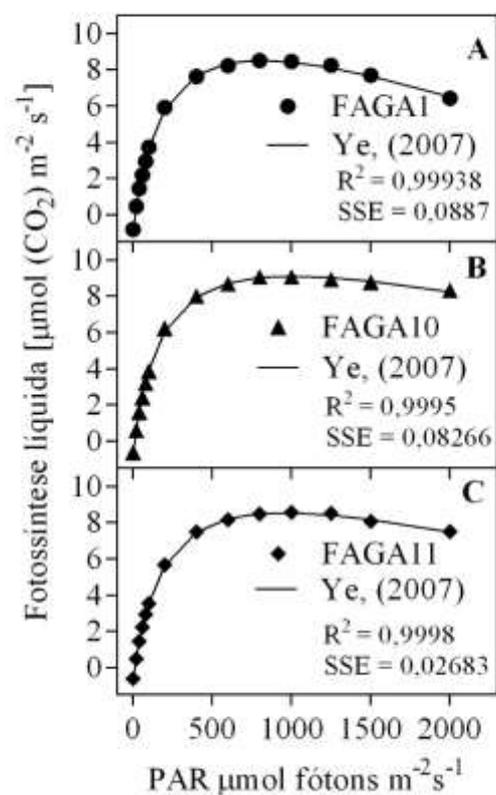


Figura 30. Ajuste do modelo de resposta da fotossíntese à luz em folhas de sombra dos clones FAGA 1 (A), FAGA10 (B) e FAGA11 (C) de cajueiro anão (*A. occidentale* L.). Santo Antônio de Leverger-MT.

Tabela 3. Parâmetros dos modelos de regressão utilizados no ajuste da resposta da fotossíntese à luz em folhas de sol do clone FAGA1 de cajueiro anão (*Anacardium occidentale*. L.).

Parâmetros	Baly, (1935)	Kaipiainen, (2009)	Smith, (1936)	Jassby & Platt, (1976)	de Wit, (1965)	Abe et al., (2009)	Prioul & Chartier, (1977)	Webb <i>et al.</i> , (1974)	Prado & de Moraes (1997)	Ye, (2007)
P_{gmax}	20,62	20,62	17,07	16,15	19,59	16,15	18,56	16,96	16,19	
$\phi_{(I_0)}$	0,09181		0,0510	0,0446	0,0539		0,0627	0,0623		
$\phi_{(I_0-I_{comp})}$										0,0708
R_D	2,359	2,359	1,496	1,2		1,2	1,809	1,711	0,9384	
I_{sat}						361,8				
$I_{(50)}$		224,6								
θ							0,6291			
K									0,003678	
I_{comp}									12,67	29,18
β										$8,98 \times 10^{-5}$
γ										0,0032

I_{comp} – ponto de compensação da luz [$\mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; I_{sat} – ponto de saturação da luz [$\mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; $I_{(50)}$ – ponto de saturação da luz para $P_N + R_D$ igual a 50% de P_{Nmax} [$\mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; k – fator de ajuste [$\text{s} \text{m}^2 \mu\text{mol}(\text{fótons})^{-1}$]; P_{gmax} – taxa fotossintética máxima [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; R_D – respiração no escuro [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; β – fator de ajuste (adimensional); γ – fator de ajuste (adimensional); θ – fator de convexidade (adimensional); $\phi_{(I_0)}$ – rendimento quântico em $I = 0 \mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \mu\text{mol}(\text{fótons})^{-1}$]; $\phi_{(I_0-I_{comp})}$ – rendimento quântico no intervalo entre $I = 0 \mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e I_{comp} [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \mu\text{mol}(\text{fótons})^{-1}$].

Tabela 4. Parâmetros dos modelos de regressão utilizados no ajuste da resposta da fotossíntese à luz em folhas de sol do clone FAGA10 de cajueiro anão (*Anacardium occidentale*. L.).

Parâmetros	Baly, (1935)	Kaipiainen, (2009)	Smith, (1936)	Jassby & Platt, (1976)	de Wit, (1965)	Abe et al., (2009)	Prioul & Chartier, (1977)	Webb <i>et</i> <i>al.</i> , (1974)	Prado & de Moraes (1997)	Ye, (2007)
P_{gmax}	19,32	19,32	16,14	15,31	18,22	15,31	16,94	16,05	15,11	
$\phi_{(I_0)}$	0,09676		0,05341	0,04689	0,0603		0,05879	0,06554		
$\phi_{(I_0-I_{comp})}$										0,07281
R_D	2,038	2,038	1,211	0,9341		0,934	1,331	1,428	0,491	
I_{sat}						326,6				
I_{50}		199,7								
θ							0,7426			
K									0,00408	
I_{comp}									14,73	23,26
β										0,00011
γ										0,00337

I_{comp} – ponto de compensação da luz [$\mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; I_{sat} – ponto de saturação da luz [$\mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; $I_{(50)}$ – ponto de saturação da luz para $P_N + R_D$ igual a 50% de P_{Nmax} [$\mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; k – fator de ajuste [$\text{s m}^2 \mu\text{mol}(\text{fótons})^{-1}$]; P_{gmax} – taxa fotossintética máxima [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; R_D – respiração no escuro [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; β – fator de ajuste (adimensional); γ – fator de ajuste (adimensional); θ – fator de convexidade (adimensional); $\phi_{(I_0)}$ – rendimento quântico em $I = 0 \mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \mu\text{mol}(\text{fótons})^{-1}$]; $\phi_{(I_0-I_{comp})}$ – rendimento quântico no intervalo entre $I = 0 \mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e I_{comp} [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \mu\text{mol}(\text{fótons})^{-1}$].

Tabela 5. Parâmetros dos modelos de regressão utilizados no ajuste da resposta da fotossíntese à luz em folhas de sol do clone FAGA11 de cajueiro anão (*Anacardium occidentale*. L.).

Parâmetros	Baly, (1935)	Kaipiainen, (2009)	Smith, (1936)	Jassby & Platt, (1976)	de Wit, (1965)	Abe et al., (2009)	Prioul & Chartier, (1977)	Webb <i>et</i> <i>al.</i> , (1974)	Prado & de Moraes (1997)	Ye, (2007)
P_{gmax}	18,68	18,68	15,66	14,86	17,34	14,86	16,85	15,57	14,51	
$\phi_{(I_0)}$	0,1004		0,0550	0,0480	0,0558		0,0665	0,0668		
$\phi_{(I_0-I_{comp})}$										0,07562
R_D	2,438	2,438	1,609	1,316		1,316	1,882	1,795	0,7326	
I_{sat}						309,5				
I_{50}		186,2								
θ							0,6517			
K									0,00429	
I_{comp}									16,46	28,38
β										$9,5 \times 10^{-5}$
γ										0,00387

I_{comp} – ponto de compensação da luz [$\mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; I_{sat} – ponto de saturação da luz [$\mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; $I_{(50)}$ – ponto de saturação da luz para $P_N + R_D$ igual a 50% de P_{Nmax} [$\mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; k – fator de ajuste [$\text{s m}^2 \mu\text{mol}(\text{fótons})^{-1}$]; P_{gmax} – taxa fotossintética máxima [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; R_D – respiração no escuro [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; β – fator de ajuste (adimensional); γ – fator de ajuste (adimensional); θ – fator de convexidade (adimensional); $\phi_{(I_0)}$ – rendimento quântico em $I = 0 \mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \mu\text{mol}(\text{fótons})^{-1}$]; $\phi_{(I_0 - I_{comp})}$ – rendimento quântico no intervalo entre $I = 0 \mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e I_{comp} [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \mu\text{mol}(\text{fótons})^{-1}$].

Tabela 6. Variáveis calculadas dos modelos utilizados no ajuste da resposta da fotossíntese à luz em folhas de sol dos clone FAGA1, FAGA10 e FAGA11 de cajueiro anão (*Anacardium occidentale*. L.).

Parâmetros	Baly, (1935)	Kaipiainen, (2009)	Smith, (1936)	Jassby & Platt, (1976)	Abe et al., (2009)	de Wit (1965)	Prioul & Chartier, (1977)	Webb <i>et</i> <i>al.</i> , (1974)	Prado & de Moraes (1997)	Ye, (2007)
FAGA1										
I_{comp}	29,0	29,0	29,4	26,9	26,9		30,0	28,9		
I_{max}	1615,0	1949,0	1052,0	859,0	859,0	1924,0	1263,0	1022,0	1022,0	1187,0
$P_{N(I_{max})}$	15,7	16,1	14,8	14,7	14,7	16,5	15,1	14,9	14,9	15,2
FAGA10										
I_{comp}	23,5	23,5	22,7	19,9	19,9		23,1	22,8		
I_{max}	1477,0	1949,0	964,0	781,0	781,0	1705,0	1062,0	930,0	930,0	1063,0
$P_{N(I_{max})}$	15,0	15,5	14,2	14,1	14,1	15,5	14,3	14,3	14,3	14,6
FAGA11										
I_{comp}	27,9	27,9	29,4	27,5	27,5		29,5	28,5		
I_{max}	1405,0	1949,0	917,0	743,0	743,0	1675,0	1088,0	888,0	888,0	1056,0
$P_{N(I_{max})}$	14,1	14,6	13,3	13,3	13,3	14,6	13,5	13,4	13,4	13,7

I_{comp} – ponto de compensação da luz [$\mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; I_{max} – ponto de saturação da luz a partir do qual não há variação significativa em P_N [$\mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; P_{Nmax} – taxa fotossíntese líquida máxima obtida quando $I = I_{max}$ [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$].

As diferenças nos valores das variáveis ecofisiológicas calculadas demonstra que não é possível utilizar uma única curva característica de resposta da fotossíntese à luz para representar toda a planta. Os modelos ajustados são utilizados, separadamente para cada tipo de folha, para simular a fotossíntese para todo o dossel conforme recomendado por NORMAN (1982). Apesar disso, há alguns trabalhos que utilizaram uma única curva de resposta da fotossíntese à luz, independentemente do tipo de classe foliar, para estudos de simulações, como por exemplo SANDS (1995).

Os valores máximos de fotossíntese obtidos para folhas de sol foram próximos aos valores obtidos por SOUZA et al. (2005) para mudas de cajueiro anão, clone CP06, cultivados em condições controladas. A taxa de assimilação de CO₂ máxima encontrada por esses autores foi de cerca de 13 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com saturação pela luz em torno de 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. SHAPER & CHACKO (1993), trabalhando com cajueiros no campo nas condições do nordeste da Austrália, também avaliaram o efeito da fotossíntese em função da luz. Os autores observaram que saturação da fotossíntese ocorreu aproximadamente em 1200 $\mu\text{mol (fótons) m}^{-2} \text{s}^{-1}$, valores de assimilação de CO₂ em torno de 20 $\mu\text{mol (CO}_2\text{) m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Na Figura 31 encontra-se a variação da eficiência quântica em função da irradiância solar em folhas de sol e de sombra, para os clones FAGA1, FAGA10 e FAGA11 (Figura 31A e B). De modo geral, o clone FAGA11 apresentou uma eficiência quântica máxima ligeiramente superior aos demais clones, com valores em torno de 0,08 ($\mu\text{mol (CO}_2\text{) } \mu\text{mol}^{-1}$ (fótons)) em folhas de sol (Figura 31A). Os demais valores máximos são semelhantes para os demais clones, independentemente do tipo de folha, sendo de aproximadamente 0,06 $\mu\text{mol CO}_2$ ($\mu\text{mol fótons}^{-1}$). Observa-se também que, as folhas de sombra apresentaram um decaimento mais acentuado com o aumento da irradiância quando comparado com as folhas de sol (Figura 31B). Esses valores são próximos aos encontrados por SOUZA et al. (2005) em mudas de cajueiro anão (0,05 $\mu\text{mol CO}_2$ ($\mu\text{mol fótons}^{-1}$)).

Tabela 7. Parâmetros de regressão ajustados e variáveis calculadas pelo modelo de YE, (2007) de resposta da fotossíntese à luz em folhas de sombra de cajueiro anão (*Anacardium occidentale*. L.).

Parâmetros	FAGA1	FAGA10	FAGA11
$\phi_{(I_0-I_{comp})}$	0,0624	0,0673	0,0595
I_{comp}	12,88	10,35	10,76
β	0,000231	0,000146	0,000169
γ	0,00462	0,00525	0,00473
Variáveis			
I_{max}	613,0	693,0	678,0
$P_{N(I_{max})}$	8,4	8,9	8,4

I_{comp} – ponto de compensação da luz [$\mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; β – fator de ajuste (adimensional); γ – fator de ajuste (adimensional); $\phi_{(I_0-I_{comp})}$ – rendimento quântico entre $I = 0 \mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e I_{comp} [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \mu\text{mol}(\text{fótons})^{-1}$]; I_{max} – ponto de saturação da luz a partir do qual não há variação significativa em P_N [$\mu\text{mol}(\text{fótons}) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; P_{Nmax} – taxa fotossíntese líquida máxima obtida quando $I = I_{max}$ [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$].

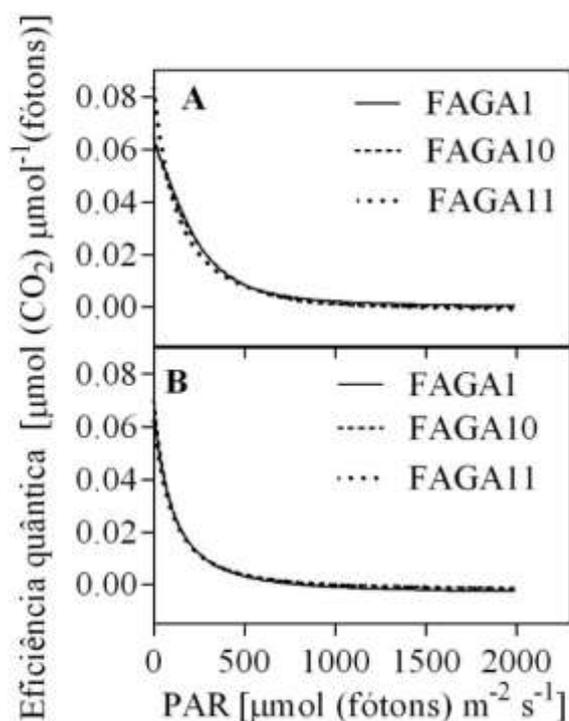


Figura 31. Eficiência quântica em função da luz em folhas de sol (A) e de sombra (B) nos clones FAGA1, FAGA 10 e FAGA11 de cajueiro anão (*A. occidentale* L.). Santo Antônio de Leverger-MT.

3.5.SIMULAÇÃO DA DENSIDADE DE ÁREA FOLIAR

A maioria dos modelos de transferência da radiação apresenta como pressuposto a distribuição homogênea da área foliar ao longo do dossel. Entretanto, para muitas espécies, essa premissa não é válida, como demonstrado, inicialmente por LEMEUR (1973). Para pomares, ou plantas isoladas, há locais no interior da copa que possuem densidade foliar diferenciada das demais regiões. Em algumas plantas, especialmente as de grande porte, a região mais interna da copa normalmente possui menor densidade foliar comparada com as regiões mais externas. Para contornar esse problema, recorre-se a modelos que descrevem a variação da densidade foliar em função, por exemplo, do índice de área foliar acumulado ou do azimute da copa. Para tanto, é necessário ter várias amostragens, suficientemente numerosas para representar a variação da copa. Além disso, há variações naturais da densidade foliar que não são previstas em modelos, com por exemplo, a queda natural de galhos, ou ataque de doenças em determinadas regiões da copa que resultam na morte e queda das folhas, etc. No modelo utilizado, é possível implementar de maneira diferenciada valores de densidade foliar para qualquer local da copa. Na Figura 32 abaixo, simulou-se a distribuição da densidade foliar para três regiões distintas da copa.

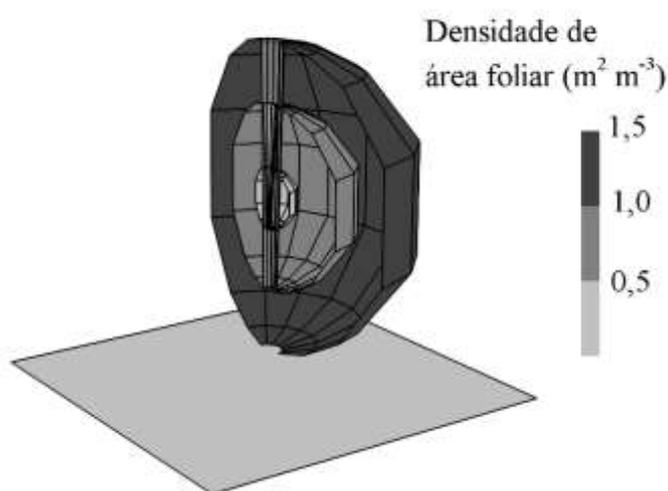


Figura 32. Simulação da densidade de área foliar para três regiões no interior da copa. Corte longitudinal interceptando o centro da copa.

3.6. DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOBRE A ÁREA DAS FOLHAS E SIMULAÇÃO DA FOTOSSÍNTESE

Os dados da área das folhas de sol e folhas de sombra distribuídas nas classes de irradiância para as três elipses concêntricas em quatro instantes do dia encontram-se na Figura 33. Nota-se que, independentemente do instante e da elipse, a maior parte da área foliar encontra-se sombreada e conseqüentemente, recebe apenas irradiância difusa. Como esperado, a elipse 3 (Figura 33C, F, I e L) ou seja, a subdivisão mais externa da copa, apresentou os menores valores de área foliar sombreada. A área das folhas que recebem irradiância solar direta, representam uma pequena parte da área foliar total.

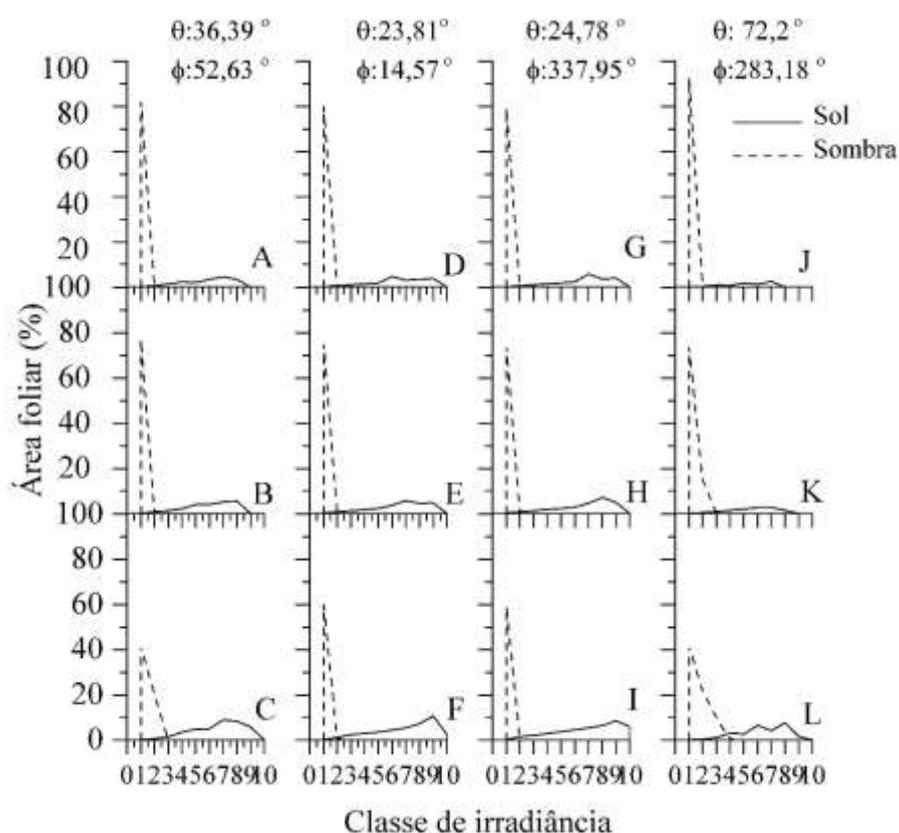


Figura 33. Distribuição da área foliar (%) de folhas de sol e folhas de sombra de cajueiro anão (*A. occidentale* L.) nas classes de irradiância para a elipse concêntrica 1 (A, D, G e J), 2 (B, E, H e K) e 3 (C, F, I e L) em quatro instantes, simulados para o dia 03/09/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.

A distribuição da energia interceptada pela área das folhas em cada classe de irradiância encontra-se na Figura 34. De modo geral, observa-se que os maiores valores estão distribuídos para a área das folhas que interceptam irradiância direta, durante os quatro períodos do dia e independentemente da elipse. Esse efeito é consistente com o que ocorre em condições reais, ou seja, a simulação do efeito *sunfleck*, no qual a radiação solar direta atravessa a copa sem ser interceptada até atingir a superfície de uma folha em um ponto qualquer. Nota-se também a evolução da energia interceptada com o decorrer do dia, ou seja, os valores são maiores para ângulos zenitais menores. Assim, ao final do dia, cujo valor do ângulo zenital é de $72,2^\circ$ a energia interceptada ao longo das classes de irradiância, para qualquer elipse, foi a menor comparada com as demais.

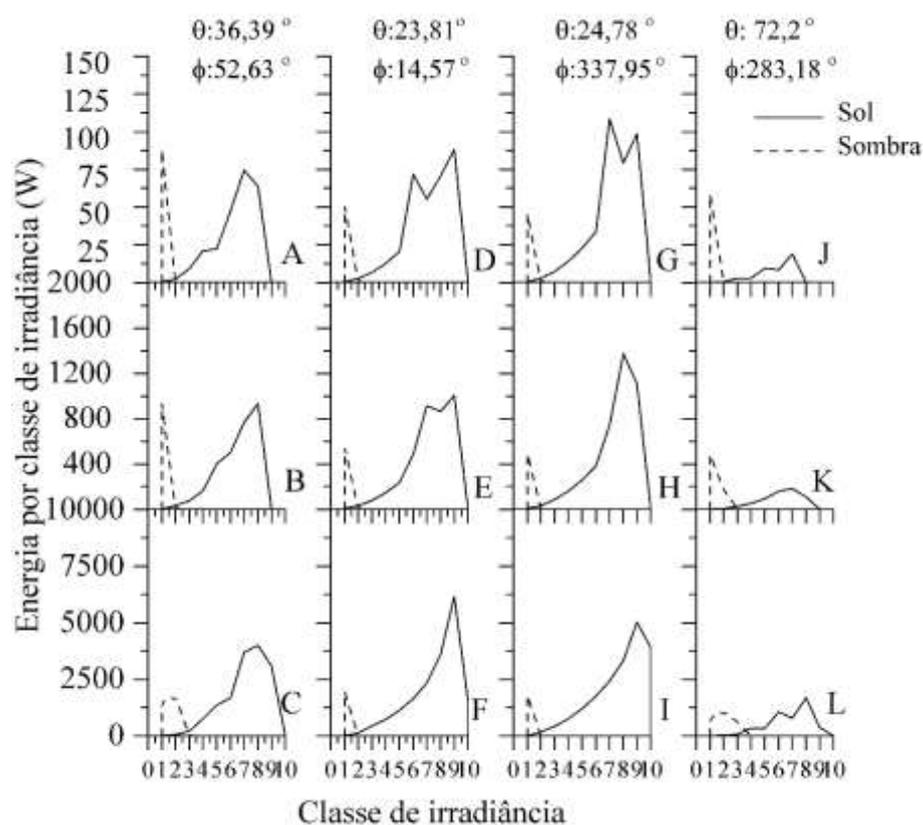


Figura 34. Energia distribuída por classe de irradiância (W) em folhas de sol e sombra de cajueiro-anão (*A. occidentale* L.) para a elipse concêntrica 1 (A, D, G e J), 2 (B, E, H e K) e 3 (C, F, I e L) em quatro instantes, simulados para o dia 03/09/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.

Na Figura 35 estão apresentadas a fotossíntese líquida em cada classe de irradiância considerando a área das folhas contida nas respectivas classes. Os modelos utilizados para simulação da fotossíntese foram o de PRIOUL & CHARLIER (1974) e de YE (2007) ajustados para o clone FAGA1. Destaca-se os valores de assimilação de CO₂ obtido pela área da folhas sombreadas, nas três elipses e nos quatro instantes do dia. Isso se deve principalmente a uma maior área foliar sombreada do que a uma maior eficiência quântica desse tipo de folha.

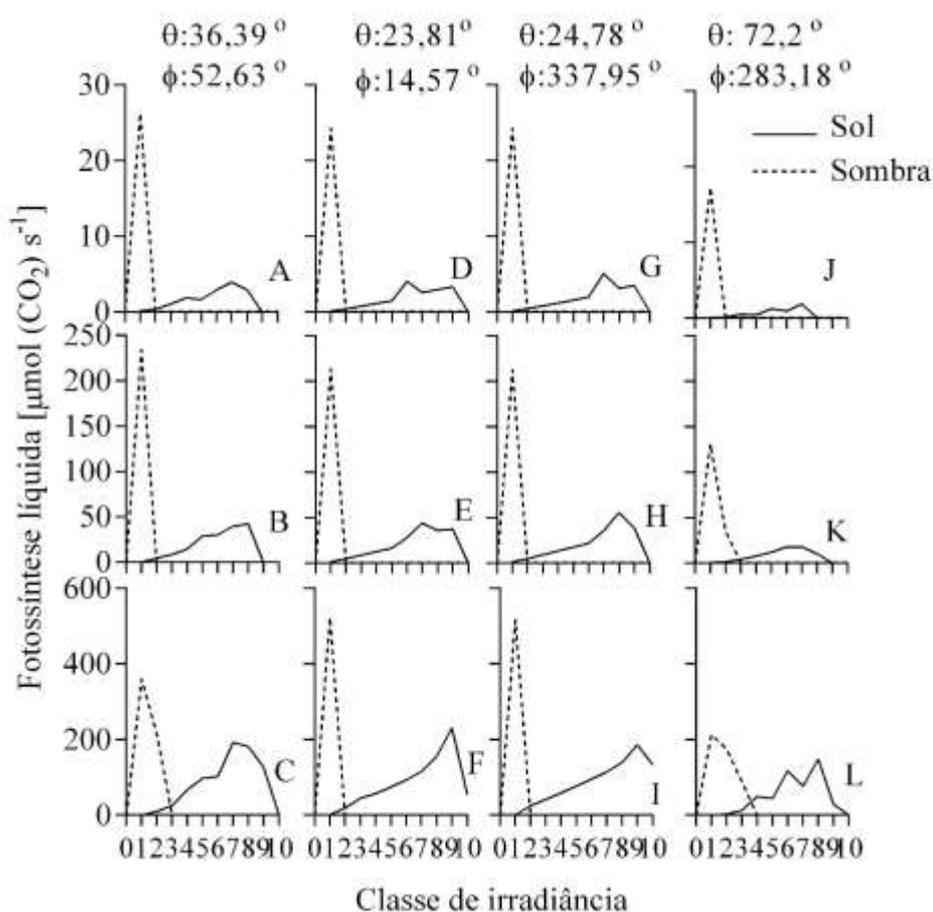


Figura 35. Fotossíntese líquida ($\mu\text{mol (CO}_2\text{) s}^{-1}$) distribuída por classe de irradiância em folhas de sol e sombra de cajueiro anão (*A. occidentale* L.) para a elipse concêntrica 1 (A, D, G e J), 2 (B, E, H e K) e 3 (C, F, I e L) em quatro instantes, simulados para o dia 03/09/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.

Considerando o total de assimilação de cada elipsoide (Figura 36), nota-se que a maior parte da fotossíntese total do elipsoide 1 e 2, são da área foliar que

recebe apenas irradiação difusa. Para elipsoide 3, ou seja, subdivisão mais externa da copa, a maior contribuição é da área das folhas que recebe irradiância direta.

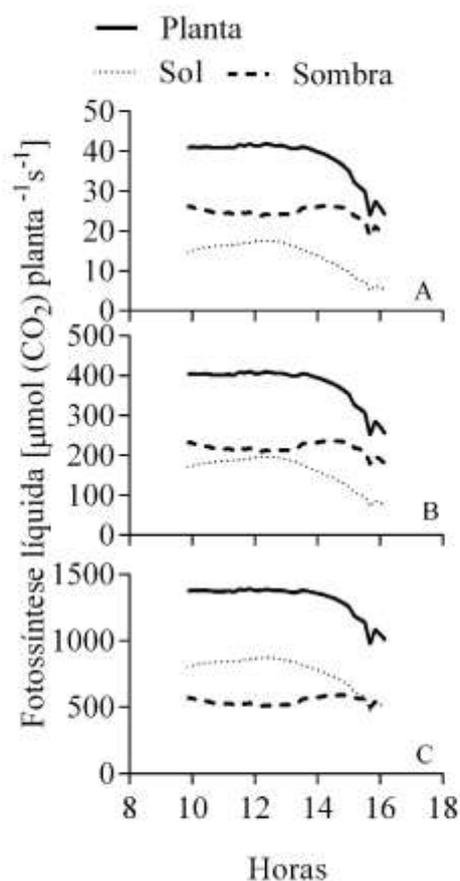


Figura 36. Fotossíntese líquida ao longo do dia ($\mu\text{mol (CO}_2\text{) planta}^{-1} \text{s}^{-1}$) em folhas de sol e sombra de cajueiro anão (*A. occidentale* L.) para a elipse concêntrica 1 (A), 2 (B) e 3 (C), simulados para o dia 03/09/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.

Considerando a fotossíntese total da planta, pela Figura 37 observa-se a contribuição da fração da fotossíntese total pelas folhas de sol e pelas folhas de sombra em dois dias distintos. De modo geral observa-se que a fotossíntese total acompanhou a variação da radiação fotossinteticamente ativa ao longo do dia. Em ambos os dias, a contribuição da fotossíntese pelas folhas de sol foi maior durante a maior parte do dia, sendo superada apenas no fim do período, quando a fração da radiação difusa excedeu a contribuição da fração direta na radiação fotossinteticamente ativa. Entretanto, destaca-se que no dia 08/10/2012, em grande parte do período, houve variações bruscas na radiação, consequência da alteração da cobertura de nuvens no céu. Consequentemente, nesses períodos, a maior parte da

radiação incidente no local foi difusa, conforme previsto pelo modelo de WEISS & NORMAN (1983) de partição da radiação solar. Nota-se, porém, que durante esse período, aproximadamente entre as 11:00 e 13:30 horas (Figura 37B), a diminuição na fração direta da radiação teve pouco efeito na fotossíntese das folhas de sol. Além disso, o aumento da fração difusa não resultou em um aumento acentuado na fotossíntese das folhas de sombra. Com relação a primeira situação, KNOH & BALDOCCHI (2008) levantaram a hipótese de que a baixa resposta das folhas de sol à diminuição da fração direta da radiação deve-se a saturação da fotossíntese aos altos níveis de irradiância interceptado por estas folhas. Assim, mesmo com a diminuição da fração direta da radiação, a irradiância que atinge a superfície das folhas ainda alcança níveis suficientemente altos para provocar a saturação da fotossíntese.

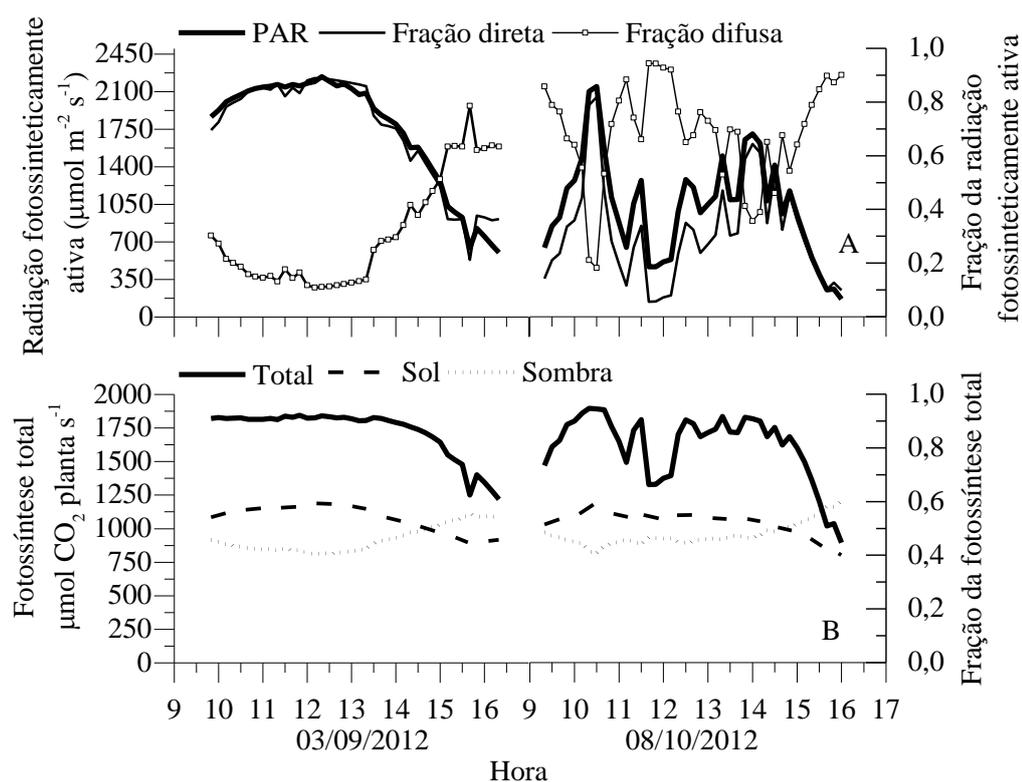


Figura 37. Radiação fotossinteticamente ativa, fração direta e fração difusa (A), fotossíntese líquida total de cajueiro anão (*A. occidentale* L.) ao longo do dia ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ planta s}^{-1}$) e fração da fotossíntese total (B). Simulação para os dias 03/09/2012 e 08/10/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.

Para analisar essa hipótese, na Figura 38 estão apresentados a distribuição da área foliar nas classes de irradiância ao longo do dia. É possível observar que, para o dia 03/09/2012, a maior parte da área foliar está concentrada na extremidade superior, ou seja, nas classes com maiores valores de irradiância. Além disso, pela Figura 37 observa-se visualmente que para esse mesmo dia, a fotossíntese total se estabiliza entre, aproximadamente, as 10:00 e 13:30 h, enquanto que a radiação fotossinteticamente ativa medida aumenta até aproximadamente $2200 \mu\text{mol (fótons)} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Analisando todos os dados, para todo o espectro da radiação solar, e para o período de 03/09/2012 a 03/11/2012, observa-se que houve uma tendência de diminuição da fotossíntese total com o aumento da fração da radiação difusa (Figura 39). KNOH & BALDOCCHI (2008) encontraram um valor ótimo entre a razão radiação difusa e radiação global de 0,45. Esse valor parece consistente com os dados analisados.

Com relação ao dia 08/10/2012, a baixa resposta da fotossíntese das folhas de sombra às acentuadas variações da fração difusa da radiação solar pode estar relacionado também com a saturação da fotossíntese à luz, já que, para este tipo de folha, a fotossíntese atinge seu máximo a valores de $613 \mu\text{mol(fótons)} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Nos períodos de grande variação da fração difusa, entre 10:30 as 14:30 h, a irradiância difusa atinge valores de até $900 \mu\text{mol(fótons)} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 37A).

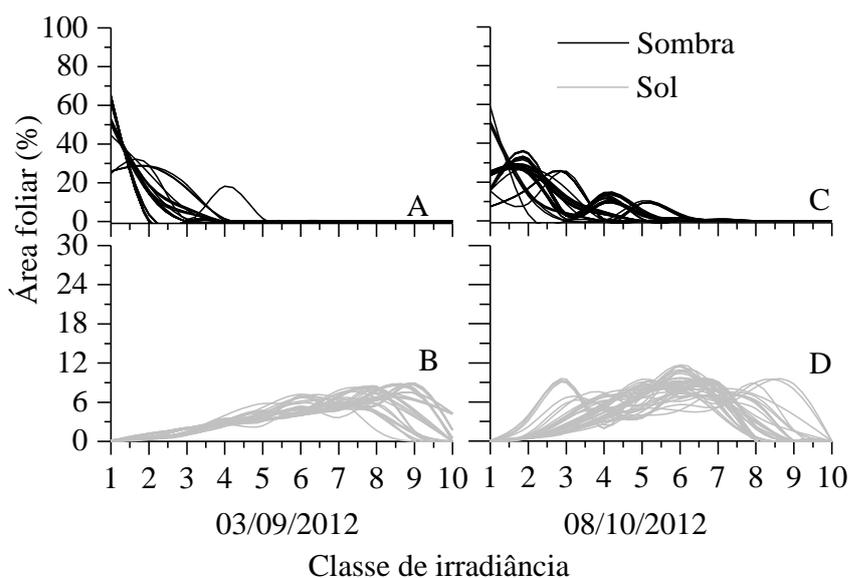


Figura 38. Área das folhas (%) de sombra (A e C) e de sol (B e D) de cajueiro anão (A. *occidentale* L.) distribuídas nas classes de irradiância nos dias 03/09/2012 e 08/10/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.

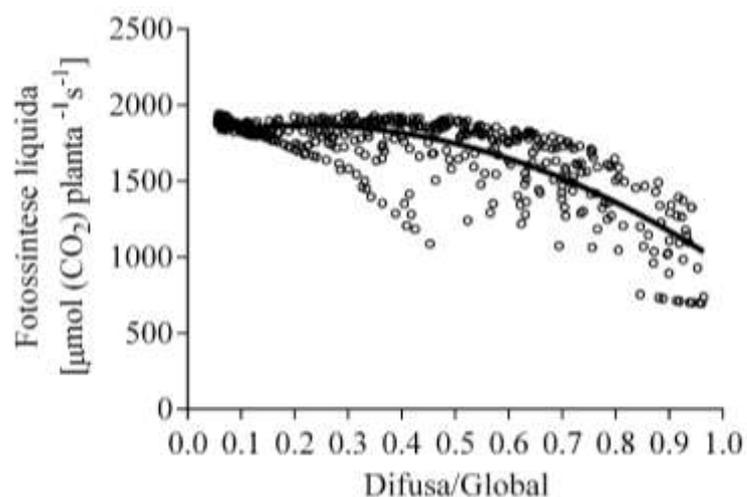


Figura 39. Relação entre a fotossíntese líquida total ($\mu\text{mol (CO}_2\text{) planta}^{-1} \text{s}^{-1}$) de cajueiro anão (*A. occidentale* L.) e a fração difusa da radiação global. Simulação entre o período de 03/09/2012 a 09/11/2012, com dados a cada trinta minutos. Santo Antônio de Leverger-MT.

No modelo original foram implementadas rotinas de modo que fosse possível mapear a distribuição da fotossíntese ao longo de toda superfície da copa, para cada elipse concêntrica. O resultado encontra-se na Figura 40. Observa-se que os resultados com a modelagem permitem identificar a variação nas regiões de maior assimilação da CO_2 ao longo do dia. Além disso, pode-se verificar a ocorrência de menores valores no interior da copa.

Na Figura 41 estão os resultados da simulação ao longo de todo o período de estudo. Os valores máximos de assimilação de CO_2 obtidos foram de aproximadamente $7 \text{ mol CO}_2 \text{ planta}^{-1} \text{ h}^{-1}$ e o valor mínimo foi em torno de $3 \text{ mol CO}_2 \text{ planta}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Esse valor não inclui as perdas por respiração de todos os órgãos da planta. Não há na literatura medições de fotossíntese em plantas inteiras de cajueiro para comparação. Entretanto, em um processo de aproximações sucessivas, pode-se ajustar o modelo, comparando resultados medidos e simulados de produção de matéria seca, assim como feito por COHEN & FUCHS (1987). Para cajueiros, RICHARDS (1992) avaliou a variação de matéria seca em diversas partes da planta com idades variando de 6-70 meses. A variação média para plantas com idade de 46 a 70 meses foi de aproximadamente 320 g MS d^{-1} .

É necessário, porém, que o modelo seja submetido a diversas situações de manejo e de clima para avaliar sua resposta e verificar se a produtividade do pomar é correlacionada com a fotossíntese simulada. Além disso, é preciso atualizá-lo

sucessivamente com novas informações e submodelos para que os dados simulados sejam o mais próximo da realidade e enfim possa se obter o balanço de carbono para toda planta, considerando as perdas pela respiração, para obter a produtividade do pomar.

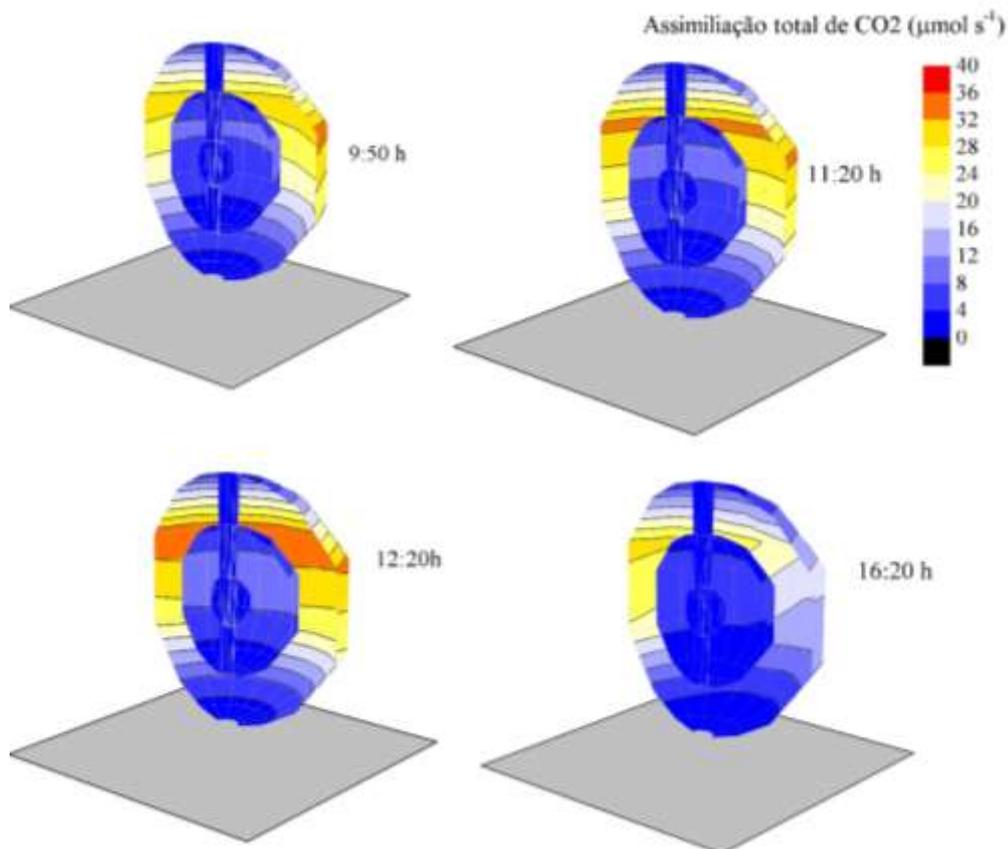


Figura 40. Fotossíntese líquida ($\mu\text{mol (CO}_2\text{) s}^{-1}$) ao longo de toda superfície da copa de cajueiro anão (*A. occidentale* L.) para três elipsoides concêntricas em quatro instante do dia (09:50, 11:20, 12:20 e 16:20, hora local). Vista representa corte longitudinal passando pelo centro da copa. Simulação para o dia 03/09/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.

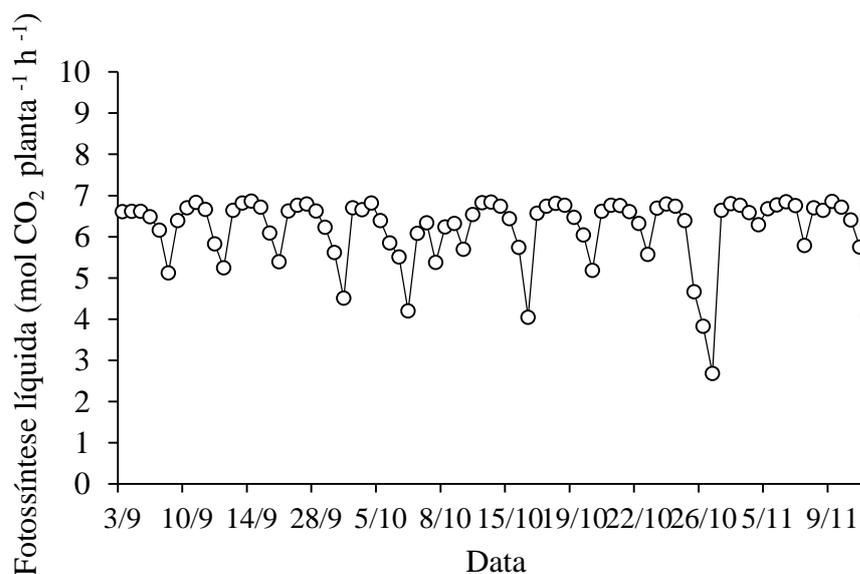


Figura 41. Fotossíntese líquida (mol (CO₂) planta⁻¹ h⁻¹) de cajueiro anão (*A. occidentale* L.) entre o período de 03/09/2012 a 09/11/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.

3.7. DISTRIBUIÇÃO GEOMETRICAMENTE DESUNIFORME DA DENSIDADE FOLIAR NO INTERIOR DA COPA

Em muitas frutíferas adultas é comum observar uma diminuição ou mesmo a completa ausência de folhas no interior da copa. Em cajueiro notou-se também a ocorrência dessa tendência que é tanto mais pronunciada quanto maior o porte da planta. Assim, simulou-se a fotossíntese em uma condição de completa ausência de folhas no interior da copa, ou seja, as duas elipses concêntricas mais internas. Nesse caso toda a modelagem da penetração e espalhamento da radiação, distribuição da irradiância sobre a superfície das folhas e por fim, a fotossíntese deve ser recalculada considerando a trajetória da luz no interior da copa com a respectiva densidade foliar da subdivisão em questão. Matematicamente a Equação 52 descrita anteriormente, foi reformulada de maneira semelhante àquela descrita por NORMAN & WELLES (1983): $f_{bi} = \exp[-k(F_3(l_3 - l_2) + F_2(l_2 - l_1) + F_1 l_1)]$, em que os subscritos 3, 2 e 1 relatam a densidade foliar (F) e a trajetória da luz (l) para as elipses concêntricas 3, 2 e 1.

A simulação da fotossíntese para todo o período de estudo encontra-se na Figura 42. Naturalmente, houve uma diminuição da fotossíntese para toda a planta. A fotossíntese horária atingiu patamares máximos de aproximadamente $5,5 \text{ mol CO}_2 \text{ planta}^{-1} \text{ h}^{-1}$, cerca de $1,5 \text{ mol CO}_2 \text{ planta}^{-1} \text{ h}^{-1}$ a menos comparado com a simulação anterior (Figura 42). A exclusão da área foliar nas duas subdivisões mais internas ocasionou uma redução de aproximadamente 30% da área foliar ou seja, de 202 m^2 para 142 m^2 . Aumentando-se o valor da densidade foliar de $1,5$ a $6,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ para uma condição de distribuição geometricamente uniforme e desuniforme de área foliar, observou-se que houve tendência de aumento na fotossíntese diária com posterior decréscimo, em ambas as situações (Figura 43). As plantas com densidade foliar uniforme apresentaram maiores taxas fotossintéticas até aproximadamente $4,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ sendo, posteriormente superadas pelas plantas com densidade foliar desuniforme. Observa-se também que o decréscimo na fotossíntese é maior em plantas com distribuição uniforme. Além disso, nota-se que o patamar obtido ocorreu com a densidade foliar em torno de $4,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$. Interessantemente, esse valor coincidiu o valor máximo medido de densidade foliar durante o período de avaliação (Figura 25). Assim, uma hipótese seria de que esse valor seria o máximo possível que a planta poderia sustentar sem reduzir significativamente a taxa fotossintética devido o autosombreamento. Resultados semelhantes foram encontrados por WANG & JARVIS (1990) em floresta de coníferas. Os autores observaram que o dossel com distribuição foliar uniforme atingiram maiores valores de fotossíntese com o aumento do índice de área foliar até o valor de $6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Posteriormente, o dossel com área foliar desuniforme apresentou maiores taxas fotossintética.

É importante ressaltar que a simulação da transferência da radiação com variação da densidade foliar dentro da copa é fundamental também na simulação da transpiração. No modelo, a transpiração é simulada por meio de um processo iterativo com base no balanço de energia. Entretanto, para completa implementação do módulo da transpiração é necessário ainda obter um submodelo que descreva o comportamento estomático em função dos parâmetros ambientais. Atualmente, apenas o modelo *MAESPA* e o modelo *RATP* (SINOQUET et al., 2001) permitem simular a transferência da radiação, fotossíntese e transpiração em plantas isoladas com variação da densidade foliar dentro da copa.

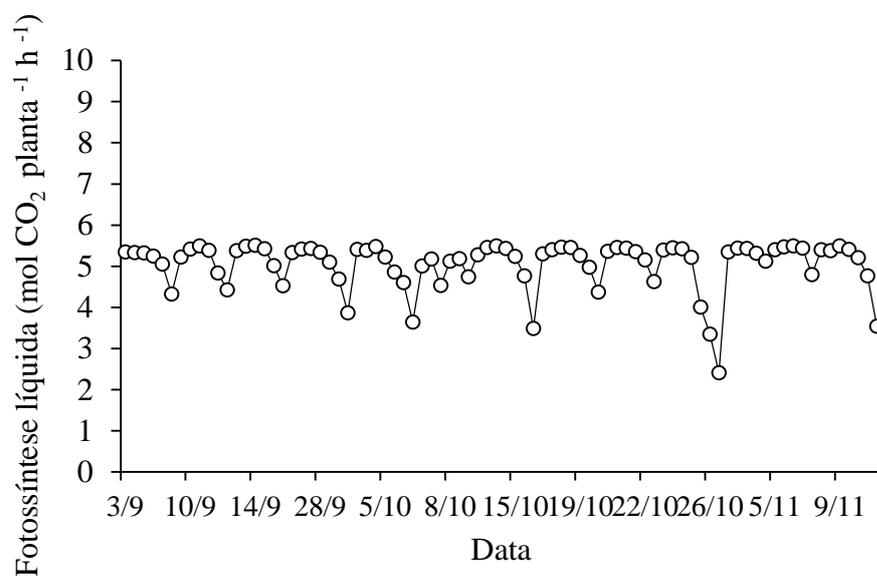


Figura 42. Fotossíntese líquida ($\text{mol CO}_2 \text{ planta}^{-1} \text{ h}^{-1}$) de cajueiro anão (*A. occidentale* L.) entre o período de 03/09/2012 a 09/11/2012 considerando apenas a área foliar da elipse mais externa. Santo Antônio de Leverger-MT.

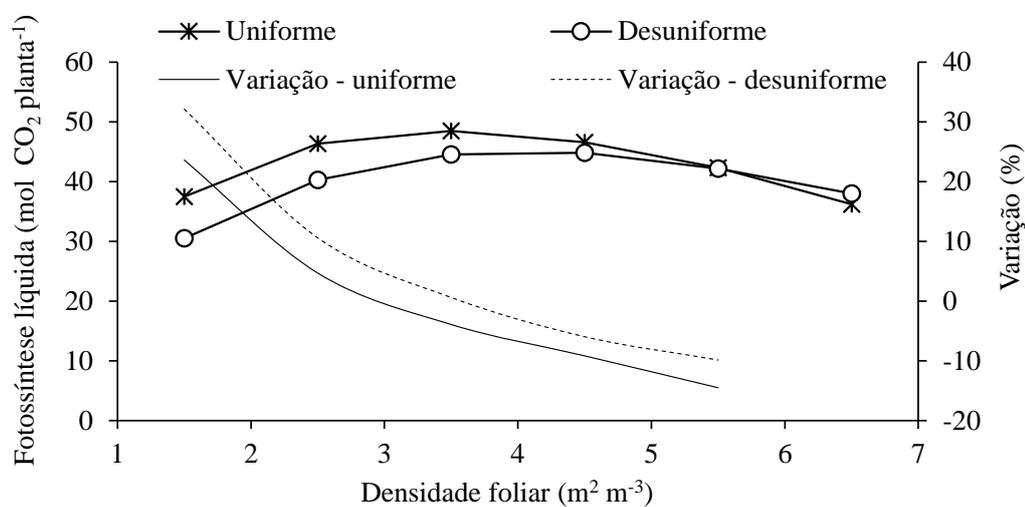


Figura 43. Fotossíntese líquida total e sua respectiva variação ($\text{mol CO}_2 \text{ planta}^{-1}$) de cajueiro anão (*A. occidentale* L.) para o dia 03/09/2012 considerando a distribuição da densidade foliar geometricamente uniforme e desuniforme (seção externa da copa). Santo Antônio de Leverger-MT.

3.8. COPA COM FORMATO HEMI-ELIPSOIDAL

Além do formato elipsoidal descrito anteriormente, a fotossíntese foi simulada para uma copa com formato hemielipsoidal e distribuição geométrica desuniforme das folhas (Figura 44A). Neste caso, há um plano imaginário horizontal que corta a elipsoide ao meio e assim, a matriz de pontos dentro da copa não é mais de 384 pontos, mas sim de 192 pontos. Porém, a copa possui as mesmas dimensões de altura e largura da elipsoide adotada no formato anterior. Esse formato geométrico é semelhante às formas de algumas plantas encontradas à campo, especialmente as de grande porte.

Para a aplicação do modelo de simulação da fotossíntese para este formato de copa, é necessário reformular o cálculo da fração difusa da radiação que foi espalhada pelo solo (f_{gi}). Inicialmente, o valor de f_{gi} de um elemento qualquer para a copa com formato elipsoidal foi obtido como sendo igual ao valor de f_{dj} , em que f_{dj} é o elemento diametralmente oposto à f_{gi} . Essa suposição é válida para a copa elipsoidal já que há simetria na seção vertical. Para copa hemielipsoidal, entretanto, não é possível utilizar deste princípio diretamente. Assim, nesse caso, a trajetória da luz bem como sua integração hemisférica, necessários para a determinação de f_{dj} , foram calculados considerando apenas a metade inferior da seção vertical da elipsóide (Figura 44B). Após essa adequação, o valor de f_{gi} para copa hemielipsoidal pode ser considerado igual à f_{dj} , no qual f_{dj} é o elemento diametralmente oposto localizado na metade inferior da seção vertical da elipsóide.

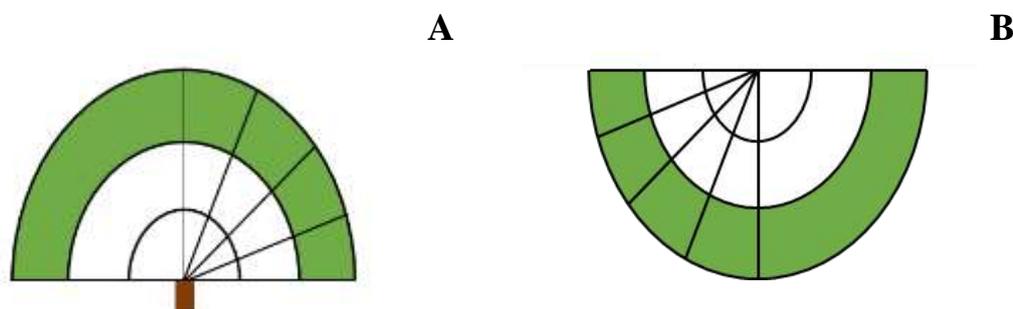


Figura 44. Demonstração do formato hemi-elipsoidal da copa de cajueiro anão (*Anacardium occidentale* L.) com distribuição desuniforme da área foliar dentro da copa (A). Seção vertical utilizada no cálculo de f_{gi} para copa com formato hemielipsoidal (B). Áreas em verde e branco representam locais com presença e ausência de folhas, respectivamente.

O resultado final da simulação da fotossíntese para os três formatos de copa encontra-se na Figura 45. Nota-se que houve redução da fotossíntese para a copa com formato hemielipsoidal em relação aos demais formatos. Especificamente com relação à elipse com distribuição geométrica desuniforme, a redução média na fotossíntese foi de aproximadamente 5%. Embora essa redução seja pouco expressiva, o formato hemielipsoidal com distribuição geométrica desuniforme é adequado para descrever a copa do cajueiro bem como de outras frutíferas. Na figura 46 estão apresentados os dados medidos da distribuição foliar no interior da copa de cajueiro anão. Observa-se que as suposições utilizadas nas simulações foram bem próximas da realidade. A região de ausência de folhas abrangeu um volume elipsoidal cujos raios na direção x e y foram de aproximadamente 2,0 e 3,0 m, respectivamente. Com isso, a maior parte das folhas se concentraram no espaço delimitado entre as elipses 1 e 2 (Figura 46).

WHITNEY & WHEATON (1984) avaliaram a distribuição da produção de frutos dentro da copa de plantas adultas de laranjeira. Em média, durante os cinco anos de avaliação, cerca de 86% da produção de frutos estavam distribuídos na parte mais externa da copa para as plantas maiores, região definida como zona produtiva.

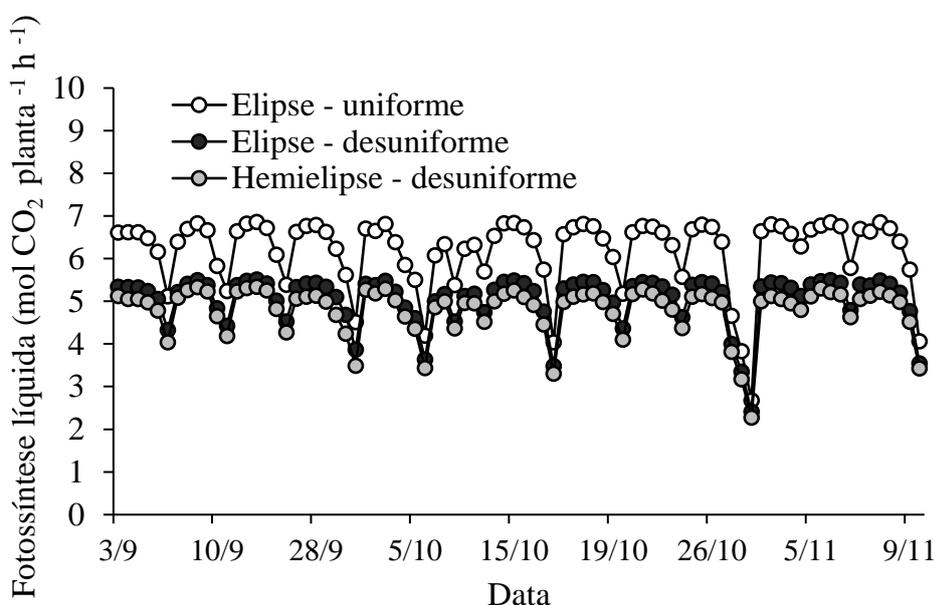


Figura 45. Fotossíntese líquida ($\text{mol (CO}_2\text{) planta}^{-1} \text{h}^{-1}$) de cajueiro anão (*A. occidentale* L.) simulados para três formatos geométricos da copa, entre o período de 03/09/2012 a 09/11/2012. Santo Antônio de Leverger-MT.

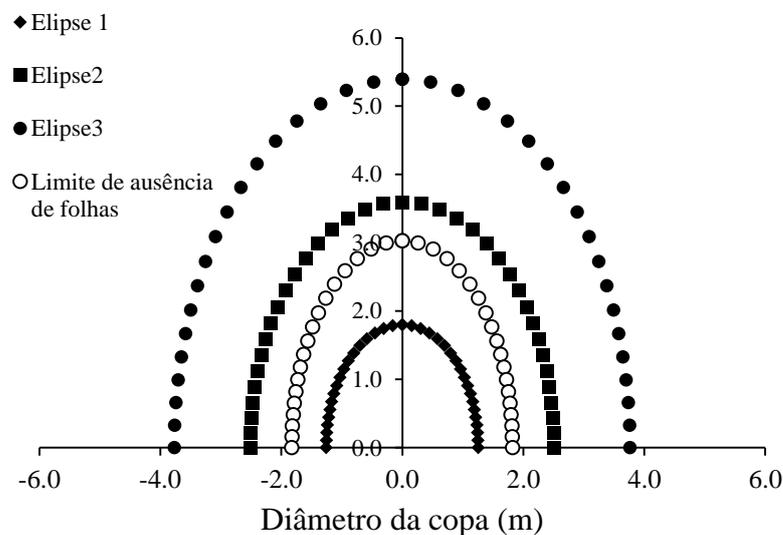


Figura 46. Presença de folhas no interior da copa de cajueiro anão (*A. occidentale* L.).

4. CONCLUSÕES

O modelo tridimensional de CHARLES-EDWARDS & THORNLEY (1973) pode ser utilizado para simular a interceptação da luz em cajueiro anão em escalas temporais a partir de 300 minutos, para dados pontuais.

A densidade de área foliar em cajueiro anão pode ser determinada pelo método da contagem de lançamentos, sendo uma alternativa simples e de baixo custo. O método da interceptação da luz não detectou as variações temporais iniciais da densidade de área foliar.

A direção de plantio teve pouco efeito na média diária da fração da radiação solar absorvida, entre as latitudes de 0° , -5° , -10° e -15° . Considerando a fração média diária da radiação solar transmitida observou-se que a área útil mínima para plantas adultas de cajueiro anão, clones FAGA 1, FAGA 10 e FAGA 11 é de 50 m^2 , considerando uma disposição quadrada de plantio.

A simulação da fotossíntese para toda a copa de plantas adultas de cajueiro anão, utilizando o modelo de THORPE et al. (1978), em uma condição de densidade foliar geometricamente uniforme, indicou que a maior parte da área foliar é sombreada e, conseqüentemente apresenta taxas menores de fotossíntese ao longo dia em comparação com as folhas na periferia da copa. A variação dos valores de densidade foliar e sua distribuição no interior da copa demonstrou que a presença de folhas apenas na parte externa da copa promove maiores taxas fotossintéticas em condições de alta densidade foliar ($> 5,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$).

5. BIBLIOGRAFIAS

ABE, M., YOKOTA, K., KURASHIMA, A., MAEGAWA, M. High water temperature tolerance in photosynthetic activity of *Zostera japonica* Ascherson and Graebner seedlings from Ago Bay, Mio Prefecture, central Japan. **Fisheries Science**. v.75, p. 1117-1123, 2009.

ABRAHA, M. G.; SAVAGE, M. J. Validation of a three-dimensional solar radiation interception model for tree crops. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v.139, p.636-652, 2010.

ALLEN, L.H Model of light penetration into a wide row crop. **Agronomy Journal**.v.66, p.41-47,1974.

ANNANDALE, J. G.; JOVANOVIC, N. Z.; CAMPBELL, G. S.; DU SAUTOY, N.; LOBIT, P. Two-dimensional solar radiation interception model for hedgerow fruit trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.121, p.207-225, 2004.

ANTUNES JUNIOR, M. Z.; FERRONATO, A.; FERRONATO, S. D.; RODRIGUES, K.; GALLON, M. M. P.; GOMES, N. M. G.; STIEVEN, A.

C.; CAMPELO JÚNIOR, J. H. Métodos não destrutivos para estimativa de densidade de área foliar em mangueira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.1624-1630, 2009.

BALY, E.C.C.: The kinetics of photosynthesis. – **Proceedings of Royal Society**. Lond. B v. 117, p 218-239, 1935.

CAMARGO, Â. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997.

CAMPELO JUNIOR, J. H.; MENDONÇA, E. D. D.; MENDONÇA, M. M. D. D.; PRIANTE FILHO, N.; CANEPPELE, M. A. B. Interceptação de luz pela seringueira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4, p.21-28, 1996.

CASTRO, F.; FETCHER, N. Three dimensional model of the interception of light by a canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.90, p 215-233, 1998.

CHARLES-EDWARDS, D. A.; THORNLEY, J. H. M. Light interception by an isolated plant: a simple model. **Annals of Botany**, v.37, p.919-28, 1973.

CHARLES-EDWARDS, D. A.; THORPE, M.R. Interception of diffuse and direct beam radiation by a hedgerow apple orchard. **Annals of Botany**, v.40, p.603-613, 1976.

COHEN, S.; FUCHS, M. The distribution of leaf area, radiation, photosynthesis and transpiration in a shamouti orange hedgerow orchard: Leaf area and radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.40, p.123-144, 1987.

CRISÓSTOMO, J.R.; ALMEIDA, J. I. L.; GADELHA, J. W. R.; FELIPE, E.M. **Orientação para o plantio de cajueiro em relação aos pontos cardeais**. Fortaleza: EMBRAPA/CNPAT. 1992. 2p. (Comunicado Técnico, 3).

DAI, Y. J., DICKINSON, R. E. & WANG, Y. P. A two-big-leaf model for canopy temperature, photosynthesis, and stomatal conductance. **Journal of Climate**. v. 17, p. 2281- 2299, 2004.

DE WIT C. T. Photosynthesis of Leaf Canopies. **Agricultural Research Report** No. 663. Pudoc Wageningen.1965.

DUURSMA, R.A.; B.E. MEDLYN. MAESPA: a model to study interactions between water limitation, environmental drivers and vegetation function at tree and stand levels, with an example application to [CO₂] × drought interactions. *Geoscientific Model Development*. v. 5, p.919-940, 2012.

GÉNARD, M.; BARET, F. Spatial and temporal variation of light inside peach trees. **Journal of American Society of Horticulture Science**, v.119, p. 669 -677, 1994.

GOEL, N.S., NORMAN, J.M. Remote sensing and biophysical measurements of soils and vegetation. In: GOEL, N.S., NORMAN, J.M. Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions. **Remote Sensing Reviews**, v. 5, p.1-12, 1990.

GIJZEN, H. GOUDRIAAN, J. A flexible and explanatory model of light distribution and photosynthesis in row crops. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 48, p.1-20, 1986.

GOUDRIAAN, J. **Crop Micrometeorology: a Simulation Study** Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen. 1977, 249 pp.

GOUDRIAAN AND VAN LAAR, **Modelling Potential Crop Growth Processes** Textbook with Exercises, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1994, 238 p.

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

GONIAS, E.D., OOSTERHUIS, D.M., BIBI, A.C. Cotton radiation use efficiency response to plant growth regulators. **Journal of Agriculture Science**. v. 150, p. 595–602, 2012.

GRACE, J.C, JARVIS, P.G, NORMAN, J.M. Modelling the interception of solar radiant energy in intensively managed stands. **New Zealand Journal of Forestry Science**. v.17,p. 193-209. 1987a.

GRACE, J.C, ROOK, D.A, LANE, P.M. Modelling canopy photosynthesis in *Pinus radiata* stands. **New Zealand Journal of Forestry Science**. v.17,p. 210-228. 1987b.

IBGE. Produção agrícola municipal 2011. Lavoura permanente. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/Tabela/protabl.asp?c=1613&z=t&o=11&i=P>> Acesso em: 7 fev. 2012.

JAHN, O.L. Penetration of photosynthetically active radiation as a measurement of canopy density of citrus trees. **Journal American Horticultural Science**, v.4, p.557-560, 1979.

JASSBY, A.D., PLATT, T. Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton. **Limnology Oceanography**. v. 21, p 540-547, 1976.

JACKSON, J.E. PALMER. A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. **Annals of Botany**. v.44, p. 381-383, 1979.

JOHNSON, R. S.; LAKSO, A. N. Approaches to modeling light interception in orchards. **HortScience**, v.26, p.1002-100, 1991.

JONES, H. G. **Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology.** 3rd ed. Cambridge University Press, New York. 2013, 428p.

KAIPIAINEN, E.L.: Parameters of photosynthesis light curve in *Salix dasyclados* and their changes during the growth season. **Russian Journal of Plant Physiology.** v.56, p. 445-453, 2009.

KIM, H. S., PALMROTH, S., THEREZIEN, M., STENBERG, P., OREN, R. Analysis of the sensitivity of absorbed light and incident light profile to various canopy architecture and stand conditions. **Tree Physiology.** v31, p.30–47, 2011.

KNOHL, A.; BALDOCCHI, D. D. Effects of diffuse radiation on canopy gas exchange processes in a forest ecosystem. **Journal of Geophysical Research.** v.113,p.1-17,2008.

LEMEUR, R. Effects of spatial leaf distribution on penetration and interception of direct radiation. In: Slatyear, R.O. (Ed.), **Plants response to climatic factors.** Proceedings Uppsala Symposium, 1970 (Ecology and conservation 5), UNESCO, pp. 349-356.1973.

LOBO, F,D,A.; DE BARROS, M.;; DALMAGRO, H.; DALMOLIN, Â.; PEREIRA, W.; DE SOUZA, É.; VOURLITIS, G. ORTÍZ, C.R. Fitting net photosynthetic lightresponse curves with Microsoft Excel—a critical look at the models. **Photosynthetica**, v.51, p. 445-456,2013.

LONG, S.P.; FARAGE, P.K.; GARCIA, R.L. Measurement of leaf and canopy photosynthetic CO₂ exchange in the field. **Journal of Experimental Botany**, v.47, p.1629- 642, 1996.

MARISCAL, M.J.; ORGAZ, F.; VILLALOBOS, F.J. Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies. **Agricultural and Forest Meteorology.** v.100, p. 183-197, 2000.

MONTEITH, J. L. Gas exchange in plant communities. In: Evans, L. T. **Environmental control of plant growth.** New York: Academic Press, 1963, 449 p., p. 95-111.

MONTEITH, J.L. Light distribution and photosynthesis in field crops. **Annals of Botany.** v.29, p. 17-37. 1965.

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

MONTEITH, J.L. Climate and efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society: B.** v. 281, p.277–294, 1977.

MONTEITH, J.L. UNSWORD, M.H. **Principles of environmental physics**. 4th ed. London: Edward Arnold, 2013, 401p.

MONSI M, SAEKI T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. **Japanese Journal of Botany** 14: 22–52. 1953.

NORMAN, J. M. Scaling processes between leaf and canopy levels. In: Ehleringer JR, Field CB (eds). **Scaling physiological processes: leaf to globe**. Academic Press, San Diego, p 41–75, 1993.

NORMAN, J. M.; WELLES, J.M.; Radiative transfer in array of canopies. **Agronomy Journal**. v.75,p.481-488,1983.

OKER-BLOM, P. Photosynthetic radiation regime and canopy structure in modeled forest stands. **Acta Forestalia Fennica**. v. 197,p.1–44. 1986.

OYARZUN, R. A.; STOCKLE, C. O.; WHITING, M. D. A simple approach to modeling radiation interception by fruit-tree orchards. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, p. 12-24, 2007.

PRADO, C.H.B.A., DE MORAES, J.P.A.P.V.: Photosynthetic capacity and specific leaf mass in twenty woody species of cerrado vegetation under field conditions. **Photosynthetica**. v. 33, p. 103-112, 1997.

PRIOUL, J.L., CHARTIER, P.: Partitioning of transfer and carboxylation components of intracellular resistance to photosynthetic CO₂ fixation: A critical analysis of the methods used. **Annals of Botany**. v.41, p. 789-800, 1977.

RABINOWITCH, E. I. **Photosynthesis and related process**. Vol II Part I, London: Interscience Publishers, 1951, 623 p.

RICHARDS, N. K.; Cashew tree nutrition related to biomass accumulation, nutrient composition and nutrient cycling in sandy red earths of Northern Territory, Australia. **Scientia Horticulturae**, v. 52, p. 25-142, 1992.

ROSS, J. Radiative Transfer in Plant Communities, In: **Vegetation and the Atmosphere**, I. MONTEITH, J.L (ed). Academic Press. p. 13-55. 1975.

ROSS, J. **The radiation regime and architecture of plant stands**. London: Junk, 1981. 391 p.

SANDS, P.J. Modeling canopy production. II. From single-leaf photosynthetic parameters to daily canopy photosynthesis. **Australian Journal of Plant Physiology**. v.22, p. 603-614, 1995.

SCHAPER, H.; CHACKO, E.K. Effect of irradiance, leaf age, chlorophyll content and branch-girdling on gas exchange of cashew (*Anacardium occidentale* L.) leaves. **Journal of Horticultural Science**, v.68, p.541-550, 1993.

SINOQUE, T. H.; LE ROUX, X.; ADAM, B.; AMEGLIO, T.; DAUDET F.A. RATP: a model for simulating the spatial distribution of radiation absorption, transpiration and photosynthesis within canopies: application to an isolated tree crown. **Plant, Cell and Environment**. v. 24, p. 395–406, 2001.

SMITH, E.L.: Photosynthesis in relation to light and carbon dioxide. – **PNAS** v.22, p. 504-511, 1936.

SINCLAIR, T. R., C. E. MURPHY, AND K. R. KNOERR, Development and evaluation of simplified models for simulating canopy photosynthesis and transpiration. **Journal of Applied Ecology**, v.13, p.813–829, 1976.

SINCLAIR, T.R., MUCHOW, R.C. Radiation use efficiency. **Advances in Agronomy**. v.65, p.215–265, 1999.

SMOLANDER, S.; STENBERG, P. A method for estimating light interception by a conifer shoot. **Tree Physiology**, v. 21, p.797-803, 2001.

SOUZA, R. P.; RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E. C.; OLIVEIRA, R. F.; SILVEIRA, J. A. G. Photosynthetic responses of young cashew plants to varying environmental conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 40, p.735-744. 2005.

TEH, C. B. S. **Introduction to mathematical modeling of crop growth: How the equations are derived and assembled into a computer program**. 1.ed. Boca Raton: Brown Walker Press, 2006, 256p.

THORPE, M.R.; SAUGIER, B.; AUGIER,S.; BERGER,A.; METHY,M. Photosynthesis and transpiration of isolated tree: model and validation. **Plant, Cell and Environment**. v.1, p.269-277, 1978.

WANG, H. A.; CLEUGH, P.; COPPIN, A. Parameter estimation in surface exchange models using non-linear inversion: How many parameters can we estimate and which measurements are most useful? **Global Change Biology**. v.7, p. 495–510. 2001.

WANG Y.P.; JARVIS P.J. Influence of crown structural properties on PAR absorption, photosynthesis and transpiration in Sitka spruce – application of a model (MAESTRO). **Tree Physiology**, v. 7, p.297–316, 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**, v. 143, p. 106 – 122, 2007.

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

WEBB, W.L.; NEWTON, M.; STARR, D. Carbon dioxide exchange of *Alnus rubra*: a mathematical model. – **Oecologia**. v.17, p. 281- 291, 1974.

WEISS, A.; NORMAN, J. M. Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared components. **Agriculture Forest Meteorology**. v. 34, p. 205-213. 1985.

WHITEHEAD, D.; GRACE, J.C.; GODFREY, M. J. S. Architectural distribution of foliage in individual *Pinus radiata* D. Don crowns and the effects of clumping on radiation interception. **Tree Physiology**, v. 7, p. 135-155, 1990.

WARREN WILSON J. Inclined point quadrat. *New Phytology*, v.58, p. 92-101, 1960.

WANG, M., GUAN, D.X., HAN, S.J., E WU, J.L. Comparison of eddy covariance and chamber-based methods for measuring CO₂ flux in a temperate mixed forest. **Tree Physiology**, 30:149–163, 2009.

WÜNSCHE, J. N.; LAKSO, A. N.; ROBINSON, T. Comparison of four methods for estimating total light interception by apple trees of varying forms. **HortScience**, v.30, p.272-276, 1995.

WHITFIELD, D.M. A simple model of light penetration into row crops. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.36, p. 297-315, 1986.

WHITNEY, J.D.; WHEATON, T.A. Tree spacing affects citrus fruit distribution and yield. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**. v.97, p. 44-47, 1984.

YE, Z.P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa*. – **Photosynthetica** v. 45, p. 637-640, 2007.

ZHANG, D.; ZHANG, L.; LIU, J.; HAN, S.; WANG, Q.; EVERS, J.; LIU, J. VAN DER WERF, W.; LI, L.; Plant density affects light interception and yield in cotton grown as companion crop in young jujube plantations. **Field Crops Research**. v.169, p. 132-139, 2014.