

VALIDAÇÃO DO IAF ESTIMADO A PARTIR DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DA RADIAÇÃO PAR

Marcelo Crestani¹; **Luiz Antonio Candido**²; **Santiago Vianna Cuadra**³; **Adriano Maito Tomé**⁴; **Andressa Back de Andrade Lopes**⁴; **Francinei Lopes de Lima**⁴; **Juliana Reis**⁴; **Rafael Morbeque Brizolla**⁴

¹Docente - Pesquisador. <https://www.faron.edu.br/>. Faculdade Marechal Rondon - FARON; ²Docente - Pesquisador. <https://www.gov.br/inpa/pt-br>. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA;

³Pesquisador. <https://www.embrapa.br/en/agricultura-digital>. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA Agricultura Digital (CNPTIA); ⁴Acadêmico de Agronomia. <https://www.faron.edu.br/>. Faculdade Marechal Rondon - FARON

RESUMO

Algumas técnicas de monitoramento da cobertura vegetal têm sido utilizadas para monitorar a biomassa e o rendimento de culturas agrícolas. Do ponto de vista da soja, é importante quantificar o índice de área foliar (IAF), assim como a sua variação ao longo do ciclo produtivo, pois a partir desta torna-se possível sua utilização como variável de entrada em modelos de crescimento e produtividade. Nesse estudo foram realizados experimentos de campo durante as safras sojícolas 2017/2018 e 2018/2019, na Faculdade Marechal Rondon (FARON) em Vilhena-RO, para mensurar o IAF da cultivar 75I77 RSF IPRO a partir da estimativa do coeficiente de extinção da radiação fotossinteticamente ativa (PAR). Medições de IAF foram realizadas semanalmente na safra 2018/2019. Também foram coletados dados de PAR empregando-se o sensor linear barra PAR Apogee® SQ-316-S. Com os dados de IAF e de interceptação de radiação solar, calculou-se o coeficiente de extinção luminosa (Kc). Para esta cultivar encontrou-se um valor de Kc igual 0,687, indicando que mais de 68% da luz foi extinta à medida que adentrou a estrutura vegetal. Ademais, foram comparados os resultados de IAF estimados via Kc e simulados pelo modelo mecanicista CROPGRO-Soybean. Observou-se um melhor ajuste dos valores simulados de IAF pelo primeiro método frente o segundo, já que o r^2 passou de 0,738 para 0,882, a diferença percentual foi reduzida de 19,9 para 13,3 e o d-value mudou de 0,815 para 0,952. Indicando que o método do coeficiente de extinção da radiação PAR é eficiente na estimativa da variável biofísica IAF.

PALAVRAS-CHAVE: soja; índice de área foliar; produtividade;;

INTRODUÇÃO

Durante o ciclo de desenvolvimento de culturas agrícolas a variação da fração de cobertura vegetal (f_c) e o índice de área foliar (IAF) são parâmetros biofísicos considerados fundamentais na dinâmica da vegetação (CHECHI et al., 2021). Permitem um melhor entendimento sobre o particionamento da evapotranspiração das culturas em transpiração das plantas e evaporação da água do solo (PAREDES et al., 2017), atuam na determinação dos coeficientes de cultura (ALLEN; PEREIRA, 2009), estimam a fração de radiação solar fotossinteticamente ativa (PAR) interceptada pelo dossel das plantas (PURCELL et al., 2002) e a matéria seca das culturas (LI et al., 2010). Chechi et al. (2021) destacam que a f_c e o IAF são comumente utilizadas como variáveis obrigatórias em modelos agrícolas como o AquaCrop (FOSTER et al., 2017), o SIMDualKc (PAREDES et al., 2017), o CSM-CROPGRO (CUADRA et al., 2021) e o Agro-IBIS (MOREIRA et al., 2023), dentre outros.

Ao incidir sobre o dossel a radiação é decomposta em fração refletida, absorvida e transmitida. O fluxo de radiação que é transmitido ao solo diminui de forma exponencial com o incremento da área foliar dentro do dossel (JONES, 1992). De acordo com Adeboye et al. (2016), sob ótimas condições ambientais de desenvolvimento, o acúmulo de biomassa por meio do processo fotossintético é fortemente correlacionado com a absorção de radiação pelas plantas na faixa espectral da radiação PAR, que corresponde aos comprimentos de ondas do visível (400 a 700 nm).

Para Fontana et al. (2012) a radiação PAR incidente (interceptada e absorvida) é um parâmetro fundamental na modelagem do crescimento e da produtividade da soja, pois à medida que ocorre a expansão foliar (aumento do IAF), tem-se um aumento da eficiência de aproveitamento dessa radiação, promovendo um maior acúmulo de matéria seca na planta, especialmente nos grãos. Todavia, Jones (1992) e Plénet, Mollier e Pellerin (2000) afirmam que a caracterização da distribuição da radiação PAR internamente ao dossel das plantas não é precisa, devendo-se considerar a arquitetura do dossel (orientação espacial) e as propriedades espectrais das folhas.

Monsi e Saeki (1953) foram os primeiros a tratar a modificação da lei de extinção da radiação de Lambert-Beer por meio de um modelo de distribuição da energia luminosa ao longo do dossel vegetal para áreas homogêneas de cultivo agrícola, e com desenvolvimento foliar denso. Nesse modelo, tem-se uma redução exponencial da radiação com o crescimento do IAF, que foi associado a um coeficiente de extinção (K_c ; adimensional) da radiação PAR (BRÉDA, 2003).

Segundo Shibles e Weber (1965) e Pengelly, Blamey e Muchow (1999), a eficiência na interceptação da radiação PAR está diretamente relacionada ao IAF da cultura e ao K_c característico da espécie (SCHÖFFEL; VOLPE, 2001). Estes fatores influem na taxa de desenvolvimento da área foliar, na duração da área foliar, e no potencial de produção da fitomassa (MAYERS; LAWN; BYTH, 1991ab). Na ausência de estresse, Shibles e Weber (1966) afirmam que a produção de fitomassa é uma função linear do acúmulo da radiação PAR interceptada pela cultura (f_{IPAR}), onde o coeficiente angular da curva de regressão entre a fitomassa, ou massa seca, e a PAR define a eficiência de uso da radiação para a produção de fitomassa.

Todavia, para Steinmetz e Siqueira (1995) a eficiência de conversão de PAR em fitomassa não é constante e sim variável durante o ciclo da planta. Esta hipótese foi avaliada por Steinmetz e Siqueira (2001), os quais verificaram que a eficiência variou entre as cultivares e com as fases de desenvolvimento do arroz irrigado, tendo atingido os valores mais altos entre a diferenciação do primórdio floral e a floração. Considerando que a eficiência de conversão pode variar entre os subperíodos do desenvolvimento da cultura, Müller, Bergamaschi e Silva (2001) verificaram que, para o milho, esta foi de $1,71 \text{ g MJ}^{-1}$ da emergência até a nona folha expandida, e de $3,58 \text{ g MJ}^{-1}$ do final do subperíodo vegetativo até o enchimento de grãos.

A produtividade de grãos de soja também pode ser analisada em termos de eficiência de interceptação e de conversão para fitomassa da radiação PAR (MAYERS; LAWN; BYTH, 1991ab). Muchow (1985) relata que para os primeiros 42 dias do subperíodo vegetativo, a eficiência de conversão de PAR em fitomassa de duas cultivares de soja foi de 1,2 e $1,32 \text{ g MJ}^{-1}$. A quantidade de fitomassa da parte aérea acumulada da emergência até o início da floração e durante a floração da soja, obtida no estudo de Mayers, Lawn e Byth (1991a), na Austrália, durante a estação seca do ano, foi significativamente linear com o acúmulo da f_{IPAR} , para as dez cultivares de soja estudadas, e que em média a eficiência de conversão foi de $1,15 \text{ g MJ}^{-1}$; porém, a dispersão dos dados à linearidade foi grande durante a fase de floração.

Embora a maioria dos modelos de crescimento da soja utilizem um valor constante de K_c (média fixa) ao longo do ciclo da cultura e para o dossel completo, a ocorrência de um estágio fenológico específico pode variar em diferentes locais e anos devido a fatores como época de semeadura, umidade do solo, temperatura do ar e práticas de manejo (SAKAMOTO et al., 2010), bem como pelas condições estruturais, idade das folhas e características fotossintéticas e respiratórias das plantas (COSTA; MORISON; DENNETT, 1996). Desse modo, a observação in loco de datas de ocorrência e valores dessas variáveis limitam o uso de muitos modelos agrícolas, já que as observações requerem tempo e recursos para serem realizadas.

OBJETIVOS

O trabalho fundamentou-se na determinação do Kc da radiação PAR para uma cultivar de soja nas condições ambientais de Vilhena-RO; na estimativa do IAF da soja durante o seu ciclo de desenvolvimento a partir do Kc da radiação PAR e da fração da radiação PAR interceptada pelo dossel; e em comparar estatisticamente os resultados de IAF estimados via Kc e simulados pelo modelo mecanicista CROPGRO-Soybean.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da Área Experimental

O experimento foi conduzido nas dependências da Faculdade Marechal Rondon (FARON), no município de Vilhena-RO, durante a safra 2018/2019, cujas coordenadas geográficas são 60°05' O e 12°46' S, 600 m de altitude (FIGURA 1), na mesorregião conhecida como Cone Sul de Rondônia (CSRO), onde a soja é semeada no sistema de plantio direto como uma cultura de sucessão com o milho (NÓIA JÚNIOR; SENTELHAS, 2019). O solo predominante da região é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, caracterizado por um relevo plano (CZARNOBAY et al., 2022). O clima é do tipo Am definido como tropical chuvoso com uma estação seca bem definida (ALVARES et al., 2013). As precipitações e as temperaturas médias anuais são de 2.200 mm e 24,6° C, respectivamente.

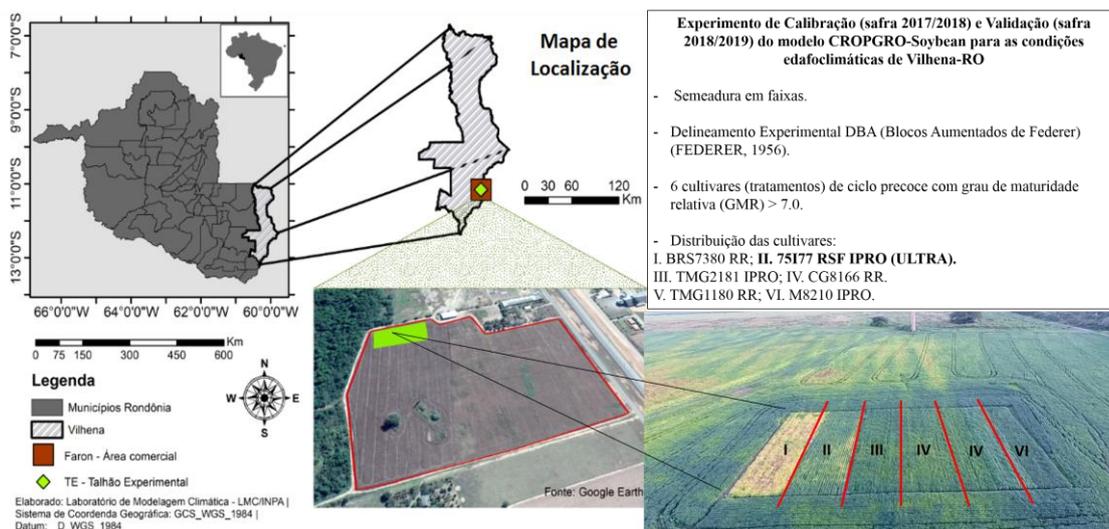


Figura 1: Mapa de localização da área experimental da FARON, Vilhena-RO (2018).

Figura 1: Mapa de localização da área experimental da FARON, Vilhena-RO (2018).

Determinação do IAF

- IAF Obtido Mediante Processo Destrutivo

O IAF foi obtido quinzenalmente na safra 2017/2018 e semanalmente na safra 2018/2019 por meio do software DDA (Determinador Digital de Áreas) versão 2.0 (FERREIRA; ROSSI; ANDRIGHETTO, 2008). Para tal, a partir do 35° DAS (dias após a semeadura), realizaram-se coletas aleatórias de três plantas da parcela de soja até a maturação plena. As folhas de cada uma das plantas coletadas em campo foram separadas e dispostas em um scanner de mesa acoplado a um microcomputador. A digitalização das folhas procedeu-se em escala monocromática, gerando um arquivo de imagens únicas ou vários arquivos, do tipo BITMAP (.bmp), de imagens com as áreas a serem medidas. Posteriormente, os arquivos foram processados no DDA e permitiram a obtenção direta do IAF, com os resultados dos escaneamentos das folhas das três plantas compondo uma média. De forma a reduzir o erro experimental durante as coletas, desconsideraram-se as plantas das linhas laterais de bordadura e as plantas presentes no 0,5 m inicial e final da parcela.

- IAF Estimado a partir do Coeficiente de Extinção da Radiação PAR

Com o intuito de se determinar o K_c da radiação PAR sobre o dossel da cultivar semeada no presente estudo, e assim obter medidas de IAF para o ciclo completo de desenvolvimento da mesma, efetuaram-se medidas de radiação PAR incidente (PAR_{in}) e PAR interceptada (PAR_{int}), nas duas safras, empregando-se o sensor barra PAR Apogee® SQ-316-S (FIGURA 2).



Figura 2: Sensor barra PAR Apogee® SQ-316-S instalado na linha de cultivo da cultivar 75I77 RSF IPRO (ULTRA), na área experimental da FARON, em Vilhena-RO (2018).

Figura 2: Sensor barra PAR Apogee® SQ-316-S instalado na linha de cultivo da cultivar 75I77 RSF IPRO (ULTRA), na área experimental da FARON, em Vilhena-RO (2018).

Para a obtenção da fração de radiação PAR interceptada (f_{IPAR} ; adimensional) pelo dossel foram utilizadas as Equações 1 e 2. A média sazonal do K_c da radiação PAR foi determinada através das medidas destrutivas de IAF (realizadas em intervalos de 7 dias ao longo da safra 2018/2019, a partir de 35 DAS) e f_{IPAR} (iniciadas 4 DAS durante a safra 2018/2019), empregando-se a Equação 3. Os valores de IAF, f_{IPAR} e K_c estimados são apresentados na Tabela 1.

$$PAR_{int} = PAR_{in} * [1 - \exp(-IAF * K_c)] \quad (1)$$

$$f_{IPAR} = \frac{PAR_{int}}{PAR_{in}} = 1 - \exp(-IAF * K_c) \quad (2)$$

$$K_c = \frac{-\ln(1 - f_{IPAR})}{IAF} \therefore IAF_{estimado} = \frac{-\ln(1 - f_{IPAR})}{K_c} \quad (3)$$

Sendo, PAR_{in} a radiação fotossinteticamente ativa incidente ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); PAR_{int} a radiação fotossinteticamente ativa interceptada ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); IAF é o índice de área foliar (adimensional); K_c é o coeficiente de extinção da radiação PAR (adimensional); f_{IPAR} é a fração da radiação PAR interceptada pelo dossel (adimensional). Para fins de comparação, os dados foram transformados em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, utilizando-se o valor de conversão desenvolvido por Thimijan e Heins (1983), pela Equação 4:

$$\sum_{\text{diário}} \frac{PAR(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}) * \frac{t(s)}{4,57}}{10^6}$$

, em que t é o tempo entre as coletas (300 s), e 4,57 é o fator de conversão. Todos os valores foram integrados para o período de 24 h.

Tabela 1: Índice de área foliar estimado (IAF_{estimado}), fração de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (f_{IPAR}) e coeficiente de extinção da radiação PAR (Kc_{estimado}).

Cultivar	Ano	DAS	Dia	Mês	IAF_{estimado}	$-\ln(1 - f_{IPAR})$	Kc_{estimado}
75I77 RSF IPRO (ULTRA)	2018	31	1	Dez	1,5	0,838	0,555
	2018	38	8	Dez	2,1	1,296	0,617
	2018	46	16	Dez	3,4	1,847	0,546
	2018	52	22	Dez	3,6	2,710	0,753
	2018	59	29	Dez	4,2	3,225	0,770
	2019	66	5	Jan	3,6	3,151	0,868
	2019	73	12	Jan	3,3	2,186	0,843
	2019	80	19	Jan	3,0	2,079	0,702
	2019	87	26	Jan	2,3	1,215	0,528
							Média

Tabela 1: Índice de área foliar estimado (IAF_{estimado}), fração de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (f_{IPAR}) e coeficiente de extinção da radiação PAR (Kc_{estimado}).

- IAF Simulado pelo Modelo Agrícola Cropgro-Soybean

O modelo agrícola CROPGRO-Soybean (BOOTE; JONES; PICKERING, 1996) na versão 4.7.5 do DSSAT (dssat.net) foi utilizado para simular o IAF ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultivar 75I77 RSF IPRO (ULTRA). Trata-se de um modelo mecanístico que considera todos os processos de desenvolvimento da soja, desde a fotossíntese até a partição de fotoassimilados, passando pelo crescimento de folhas, caules e raízes, extração de água do solo e transpiração, em resposta às variações meteorológicas (HOOGENBOOM et al., 2012). Sendo capaz de simular os componentes de desempenho (umidade do solo e evapotranspiração; biomassa seca - folhas, legumes, caule e pecíolo; expansão foliar através do IAF; e produtividade), quantificando e traçando o crescimento diário da cultura até os estádios de maturidade fisiológica e colheita (CONFALONE et al., 2016).

Calibração e Validação do Modelo Agrícola Cropgro-Soybean

O modelo CROPGRO-Soybean foi calibrado para as condições experimentais da safra 2017/2018 e validado na safra 2018/2019, seguindo recomendações de Hoogenboom et al. (2003) e Jones et al. (2003), através do método de ajustes sensíveis e minimização do erro das variáveis (FENSTERSEIFER et al., 2017). Primeiramente, foram estabelecidos os conjuntos de informações fenológicas: data de semeadura, emergência, floração e maturação fisiológica, peso de mil grãos (PMG) e produtividade das cultivares ($kg\ ha^{-1}$) em condições de campo. Em seguida procedeu-se ao ajuste dos parâmetros genéticos-específicos da cultivar 75I77 RSF IPRO (ULTRA), tomando por base os dados de crescimento (área foliar máxima, taxa fotossintética máxima e área foliar específica), desenvolvimento (número de nós e data de emergência e dos estádios reprodutivos R1 - início da floração, R3 - início da formação de legumes, R5 - início do enchimento de grãos e R7 - início da maturação) e componentes de produtividade (número de grãos por m^2 e peso médio de um grão) (CERA et al., 2017), coletados no campo experimental da FARON durante as duas safras. O desenvolvimento fenológico das cultivares foi acompanhado de acordo com escala de Fehr e Caviness (1977) e a contagem dos dados em dias seguiu o calendário juliano, iniciando na data de emergência.

Análise Estatística

Para avaliar comparativamente o desempenho do IAF estimado a partir do Kc da radiação PAR e pelo modelo agrícola CROPGRO-Soybean, foram empregados os seguintes índices estatísticos: coeficiente de determinação (r^2) (EQUAÇÃO 5), desvio percentual (P_d) (EQUAÇÃO 6), raiz do erro quadrático médio (RMSE) (EQUAÇÃO 7), e o índice de concordância (d-value) de Willmott (1982) (EQUAÇÃO 8).

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i) * (P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2}} \right)^2 \quad (5)$$

$$P_d = \left[\frac{P_i - O_i}{O_i} \right] * 100 \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \right], 0 \leq d \leq 1 \quad (8)$$

Em que, n é o número de observações; P_i são os valores simulados; \bar{P} é a média dos valores simulados; O_i são os valores observados; e \bar{O} é a média dos valores observados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tomando por base os estudos já mencionados acerca da interceptação da radiação PAR para outras regiões, optou-se, durante a safra 2018/2019, por analisar o comportamento da cultivar 75I77 RSF IPRO (ULTRA) frente a essa perspectiva, comparando os resultados de IAF estimados via Kc e simulados pelo modelo CROPGRO-Soybean. Percebeu-se que no início do desenvolvimento da cultivar, até aproximadamente 48 DAS, a cultura não conseguiu utilizar com maior eficiência a radiação global que atingiu o dossel. As medidas observadas indicaram que a máxima radiação PAR interceptada foi de $4,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (60 DAS), quando a fração de cobertura de folhas do dossel projetada sobre a área de 1 m^2 de solo atingiu 98,3%, no estádio R5, enquanto a radiação PAR interceptada simulada alcançou o ápice de $8,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (55 DAS), no momento em que a fração de cobertura de folhas chegou a 97,3%, também durante o estádio R5. O declínio da interceptação da radiação PAR, tanto observada quanto estimada, teve início com a senescência foliar em R6, com o primeiro para as condições de campo acontecendo por volta de 72 DAS e o segundo, simulação do CROPGRO-Soybean, 65 DAS, respectivamente. A queda antecipada da interceptação simulada deveu-se às superestimativas do IAF no início do ciclo dessa cultivar, quando o modelo adiantou a emissão de folhas favorecendo o máximo crescimento ($4,6 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$) sete dias antes da maior expansão foliar observada.

Na Figura 3 são apresentadas as f_{IPAR} observadas e simuladas ao longo do ciclo da cultivar 75I77 RSF IPRO (ULTRA). Para as condições de campo essa cultivar atingiu interceptação de 96% de radiação PAR, entre 60 e 70 DAS e, aproximadamente 95%, entre 50 a 63 dias, na simulada pelo CROPGRO-Soybean. Resultados que acompanham os obtidos por Confalone e Dujmovich (1999) para o edafoclima da região centro-leste da província de Buenos Aires, Argentina, onde registrou-se na safra de 1998/1999 o nível de 95% de interceptação da radiação 78 dias após a emergência, quando a cultivar de crescimento indeterminado Asgrow 4656 apresentou um IAF máximo de 5,3 em R4; Souza et al. (2009) durante experimentos de campo realizados no município de Paragominas-PA, encontraram para a cultivar BRS Tracajá (ciclo indeterminado) 99% de interceptação da radiação PAR acontecendo entre 70 e 96 DAS (R4 e R5), quando os Kc's e os IAF's máximos foram 0,717/4,1 e 0,715/6,5 nas safras 2007/2008 e 2008/2009, respectivamente; assim como os resultados obtidos por Costa et al. (1999), os quais encontraram valores de máxima interceptação de radiação (99%) ocorrendo entre 70 e 96 DAS, para soja cultivada sob diferentes condições de irrigação, durante todo o ciclo, na região Sudeste do Brasil.

75I77 RSF IPRO (ULTRA) – Safra 2018/2019

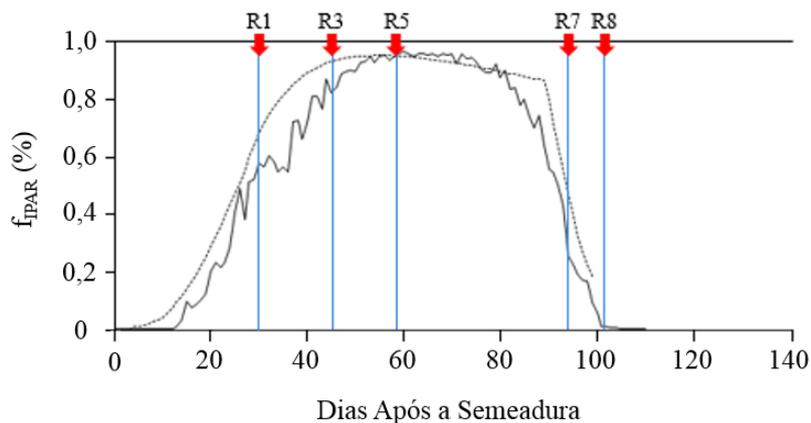


Figura 3: Fração de radiação PAR interceptada (f_{IPAR}) observada em campo (-) a partir do sensor barra PAR Apogee® SQ-316-S e simulada pelo modelo CROPGRO-Soybean (...) ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultivar 75I77 RSF IPRO (ULTRA) durante a safra 2018/2019.

Figura 3: Fração de radiação PAR interceptada (f_{IPAR}) observada em campo (-) a partir do sensor barra PAR Apogee® SQ-316-S e simulada pelo modelo CROPGRO-Soybean (...) ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultivar 75I77 RSF IPRO (ULTRA) durante a safra 2018/2019.

Segundo Souza et al. (2009), o aumento da eficiência no uso da radiação PAR encontrado durante a fase reprodutiva da soja está de acordo com a maioria dos resultados encontrados para essa cultura (CONFALONE; DUJMOVICH, 1999; SCHÖFFEL; VOLPE, 2001; SANTOS et al., 2003; ADEBOYE et al., 2016). Os mesmos autores evidenciam que este aumento se deve à acumulação de biomassa e é significativo apenas a partir do estágio vegetativo V5, permanecendo alto até o início do estágio R5, quando a translocação assimilada aos grãos começa.

De acordo com a Figura 4, o modelo CROPGRO-Soybean quando calibrado simulou valores mais acurados e robustos para os IAF's no período de validação, prova disso foram os aumentos do r^2 (0,738) e do d-value (0,815), bem como a diminuição do RMSE ($0,7 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$) e da amplitude da P_d (19,9%), em comparação com a safra 2017/2018 e também com o modelo mantendo os parâmetros originais durante a safra 2018/2019. Todavia, quando se comparam os IAF's simulados pelo modelo CROPGRO-Soybean com os estimados por meio do K_c médio calculado diariamente para as condições de campo, verifica-se um ajustamento ainda melhor em relação aos IAF's observados, já que percebem-se aumentos no r^2 (0,882) e no d-value (0,952), assim como redução da amplitude da P_d (13,3%).

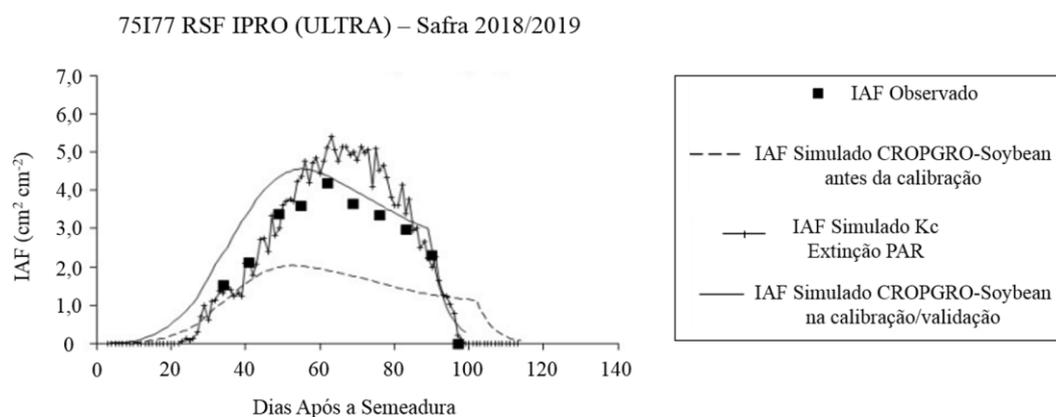
As estimativas de IAF's obtidas a partir do K_c mostram resultados semelhantes aos que ocorreram em condições de campo durante a maior parte do ciclo de desenvolvimento da cultivar 75I77 RSF IPRO (ULTRA), principalmente nas fases iniciais (até 50 DAS) e finais (90 DAS até o estágio R8) (FIGURA 4). Entre 55 e 83 DAS os IAF's estimados através do K_c foram, em média, 28,6% superiores aos observados, com novo crescimento do RMSE ($1,3 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$), e diferenças mais marcantes durante a senescência (R6), em que os novos valores de IAF foram cerca de 1,4 e $1,2 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ maiores do que os observados, respectivamente, 69 e 76 DAS. Isso ocorreu, muito provavelmente, pelas diferenças de densidade de plantas nos pontos amostrados.

Junto ao sensor barra PAR Apogee® SQ-316-S empregado na determinação da f_{IPAR} e do K_c havia uma população de plantas por metro quadrado relativamente superior aos três pontos amostrados semanalmente, os quais eram escolhidos aleatoriamente, para a determinação média do IAF da cultivar. Além disso, destaca-se que a área cultivada no raio de ação do sensor barra PAR não sofreu, como outras partes da parcela, com danos causados por doenças provocadas por fungos entre os

estádios R5 e R7, fato que também contribuiu para maiores valores de IAF estimados pela metodologia do Kc em comparação com as medidas de IAF obtidas pelo processo de digitalização das folhas, as quais dependiam das amostragens aleatórias. Neste contexto, Yokoyama et al. (2018) destacam a importância da manutenção do IAF entre a metade do período de enchimento de grãos até a maturação fisiológica, já que impacta positivamente na produtividade. Os autores ainda ressaltam que cuidados especiais devem ser tomados para que não ocorra perda de IAF nessa fase, sendo indispensável o manejo adequado de doenças e insetos-praga, como discutido por Moreira et al. (2015).

À medida que ocorreu o desenvolvimento da cultivar aconteceu o auto-sombreamento em função da elevada sobreposição das folhas provenientes da alta densidade de plantas no ponto de localização do sensor, resultando aos 60 DAS, em valores muito próximos de incidência da radiação PAR, o que proporcionou interceptação acima de 96%. Observação também realizada por Petter et al. (2016), os quais demonstraram que o aumento do número de plantas por área traz como um dos principais benefícios a elevação do IAF, influenciando no aproveitamento da luz pela cultura (aproveitamento acima de 90%). O que de acordo com Cox e Cherney (2011), configura-se em um relevante mecanismo de plasticidade fenotípica da soja (elevada plasticidade de crescimento das folhas).

O IAF estimado pelo Kc foi afetado significativamente de forma linear crescente pela população de plantas até o estágio R4, com o pico máximo ocorrendo no 63 DAS (5,4) (FIGURA 4). Para o período compreendido entre 55 e 83 DAS o IAF médio estabeleceu-se em $4,5 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$. Segundo Tagliapietra et al. (2018), esses valores são recomendados, entre os estádios R3 e R5, para cultivares de crescimento indeterminado na obtenção de rendimentos máximos (otimização do acúmulo de matéria seca pelas plantas). O que equivale a valores de IAF (3,5-4,5) superiores ao normalmente citado como próximo do ideal para a cultura da soja, o qual não considera o hábito de crescimento, o grau de maturidade relativa (GMR) e as entradas de água na área cultivada (campo irrigado e de sequeiro). Nota-se, ainda, que até por volta de 30 DAS o acúmulo de matéria seca da soja foi lento, rápido após esse período até 60 DAS e, posteriormente, houve ligeira queda a partir de 75 DAS proporcionada principalmente pela senescência das folhas próximas ao baixeiro (solo) e à redistribuição de fotoassimilados e nutrientes das folhas para os grãos em formação, assim como o observado nos trabalhos de Petter et al. (2016) e Srinivasan, Kumar e Lang (2017).



Estatística das Simulações	r^2	P_d (%)	RMSE ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-2}$)	d-value
Antes da calibração do modelo CROPGRO-Soybean	0,661	45,7	1,5	0,517
Validação do modelo CROPGRO-Soybean	0,738	19,9	0,7	0,815
Estimado pelo Kc – extinção PAR	0,882	13,3	1,3	0,952

Figura 4: Variação temporal do IAF observado (?), simulado com os parâmetros originais do CROPGRO-Soybean (----), simulado na validação (-) e a partir do coeficiente de extinção da radiação PAR (Kc) (?-?-?) ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultivar 75I77 RSF IPRO (ULTRA)

durante a safra 2018/2019. Estatística aplicada ao IAF: coeficiente de determinação (r^2); desvio percentual (Pd); raiz do erro quadrático médio (RMSE); e índice de concordância de Willmott (d-value).

Figura 4: Variação temporal do IAF observado (?), simulado com os parâmetros originais do CROPGRO-Soybean (----), simulado na validação (-) e a partir do coeficiente de extinção da radiação PAR (K_c) (+++) ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultivar 75I77 RSF IPRO (ULTRA) durante a safra 2018/2019. Estatística aplicada ao IAF: coeficiente de determinação (r^2); desvio percentual (Pd); raiz do erro quadrático médio (RMSE); e índice de concordância de Willmott (d-value).

As mudanças temporais na biomassa de matéria seca do dossel da cultivar e sua distribuição em legumes e grãos, juntamente com os valores simulados, são apresentados na Figura 5. O modelo de cultivo agrícola consegue simular com certa precisão as mudanças de peso seco das componentes das plantas (legumes, caules, folhas e grãos). Assim como descrito por Boote et al. (1997), os quais identificaram para diferentes localidades dos EUA, que o CROPGRO-Soybean consegue prever as mudanças temporais no IAF e na biomassa razoavelmente bem. Porém, por causa da antecipação do IAF máximo e do excesso de área foliar simulada, observa-se uma tendência do modelo em superestimar a biomassa de legumes, o que interfere de forma direta na matéria seca de grãos (produtividade), pois tem-se uma maior demanda e particionamento de fotoassimilados durante os estádios R4 e R5.3 (BORRÁS; SLAFER; OTEGUI, 2004), período em que os grãos se encontram entre 26% e 50% formados (FEHR; CAVINESS, 1977), para o desenvolvimento de legumes e grãos (FIGURA 5). Situação também constatada por Mota (2019) para a cultivar TMG2181 IPRO, de ciclo um pouco mais tardio, porém com menor impacto, tendo em vista que as superestimativas do modelo quanto ao IAF no início de desenvolvimento deste material genético foram menores.

Outro detalhe que merece destaque durante a validação, tem relação com o manejo mínimo do solo. Segundo Mota (2019), os aumentos de IAF's simulados podem também estar atrelados ao incremento da reserva de nitrogênio, nutriente essencial no enchimento dos grãos e pré-requisito fundamental para altos rendimentos e qualidade dos mesmos (SALVAGIOTTI et al., 2008), sobretudo nas cultivares com hábito de crescimento indeterminado, pela incorporação da palhada do milho no solo. O que indica que o CROPGRO-Soybean responde de forma diferente (erro sistemático) a essa condição nas cultivares de ciclo mais curto, caso da 75I77 RSF IPRO (ULTRA). Com o aparecimento das folhas mais cedo nas simulações do CROPGRO-Soybean, o período de enchimento de legumes coincide com o IAF máximo, da mesma forma que a redistribuição de nutrientes minerais, carboidratos e compostos de nitrogênio nos grãos, nos caules, na "galhada" e nas folhas senescentes durante essa fase (MUNDSTOCK e THOMAS, 2005).

Com esta premissa, os resultados de matéria seca aérea evidenciaram, durante a safra 2018/2019, que o modelo apresenta limitações na representação da expansão foliar e na senescência. Logo, entende-se ser necessário a realização de ajustes mais finos nos parâmetros ligados à parametrização do IAF no modelo CROPGRO-Soybean, que aplica três funções nesse processo: inicialmente, o estágio de crescimento é caracterizado por uma função exponencial logística (modelo sigmóide) da emergência até o IAF máximo; em seguida, tem-se uma fase de linearização (GOUDRIAAN; MONTEITH, 1990) à medida que o auto-sombreamento aumenta e as plantas investem mais na produção de legumes e grãos, e outras estruturas não foliares; e, por fim, a fase que se estende da senescência das folhas até maturidade fisiológica (TAIZ; ZEIGER, 2004) é encerrada por uma função exponencial. Então, visando minimizar os efeitos dessas superestimativas de IAF na produção de biomassa pelo modelo CROPGRO-Soybean, sugere-se a adoção da metodologia proposta por Moreira et al. (2018), os quais desenvolveram para o modelo de agroecossistema Agro-IBIS uma equação com expoente dinâmico para reduzir o IAF simulado, particularmente entre os estádios R5 e R7, já que Kucharik e Twine (2007) e Webler et al. (2012) identificaram neste modelo, problemas semelhantes ao CROPGRO-Soybean para as simulações de IAF.

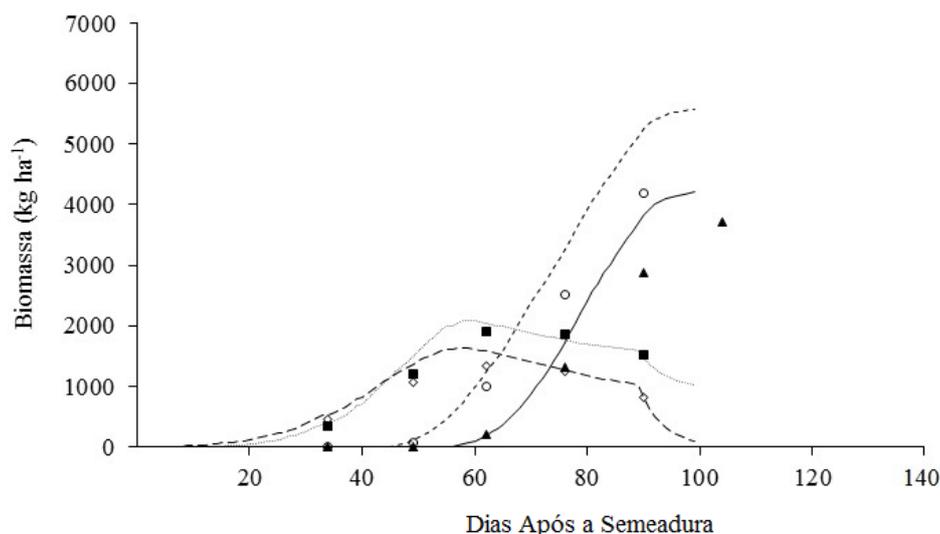


Figura 5: Biomassas secas medidas (○ legumes, □ caules, △ folhas e ▽ grãos) e simuladas pelo modelo CROPGRO-Soybean (---- legumes, -- caules, - - - folhas e -- grãos) ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultivar 75I77 RSF IPRO (ULTRA) durante a safra 2018/2019.

Figura 5: Biomassas secas medidas (○ legumes, □ caules, △ folhas e ▽ grãos) e simuladas pelo modelo CROPGRO-Soybean (---- legumes, -- caules, - - - folhas e -- grãos) ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultivar 75I77 RSF IPRO (ULTRA) durante a safra 2018/2019.

CONCLUSÃO

Com a obtenção do K_c médio estimado (0,687), foi possível mensurar diariamente o IAF da cultivar 75I77 RSF IPRO (ULTRA) durante todo o seu ciclo de desenvolvimento. Configurando-se em uma alternativa interessante e viável na determinação do IAF quando não se dispõe de medidas diretas e frequentes obtidas em campo, além de poder ser empregado em estudos quantitativos da relação entre radiação interceptada e biomassa produzida. Ressalta-se que o K_c médio estimado ficou muito próximo ao K_c médio utilizado pelo modelo CROPGRO-Soybean (KCAN - canopy light extinction coefficient for daily PAR), presente no arquivo SBGRO.047.ESP, cujo valor é uma média fixa (0,67) empregada na extinção da radiação PAR em todos os estádios de desenvolvimento da cultura.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) / Código de Financiamento 001, pela disponibilização de uma bolsa de doutorado para o Marcelo Crestani Mota, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) e a Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento (FAPED-EMBRAPA) pela assistência durante a realização do trabalho de campo desenvolvido em Vilhena-RO. Os autores estendem seus agradecimentos a Universidade do Estado do Amazonas (UEA), a Faculdade Marechal Rondon (FARON) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA Agricultura Digital (CNPTIA) por fornecerem as estruturas e os materiais para as atividades dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

ADEBOYE, O. B. et al. Impact of water stress on radiation interception and radiation use efficiency of Soybeans (*Glycine max* L. Merr.) in Nigeria. **Brazilian Journal of Science and Technology**, v. 3, n. 15, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40552-016-0028-1>

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. **Irrigation Science**, Berlin, v. 28, n. 01, p. 17-34, 2009. DOI: 10.1007/s00271-009-0182-z
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- BOOTE, K. J. et al. Evaluation of the CROPGRO-Soybean model over a wide range of experiments. In: KROPFF M. J. et al. (eds). **Applications of systems approaches at the field level**. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development, v.6. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1997. p. 113-133.
- BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; PICKERING, N. B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 5, p. 704-716, 1996. DOI: 10.2134/agronj1996.00021962008800050005x
- BORRÁS, L.; SLAFER, G. A.; OTEGUI, M. E. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. **Field Crops Research**, v. 86, n. 2-3, p. 131-146, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.08.002>
- BRÉDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, n. 392, p. 2403-2417, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erg263>
- CERA, J. C. et al. Soybean yield in future climate scenarios for the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 6, p. 380-392, 2017. DOI: 10.1590/S0100-204X2017000600002
- CHECHI, L. et al. Estimativa do índice de área foliar e da fração de cobertura do solo nas culturas de milho e soja usando NDVI. **Irriga**, Botucatu, v. 26, n. 3, p. 620-637, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2021v26n3p620-637>
- CONFALONE, A. et al. Parametrización del modelo CROPGRO-soybean su uso como herramienta para evaluar el impacto del cambio climático sobre el cultivo de soja. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias Uncuyo**, v. 48, n. 1, p.49-64, 2016.
- CONFALONE, A.; DJUMOVICH, M. N. Influência do déficit hídrico sobre a eficiência da radiação solar em soja. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 5, n. 3, p. 195-198, 1999.
- COSTA, L. C.; CONFALONE, A.; PEREIRA, C. R. Effect of water stress on the efficiency of capture of water and radiation by soybean. **Tropical Science**, v. 39, p. 91-97, 1999.
- COSTA, L.C., MORISON, J., DENNETT, M. Carbon balance of growing faba bean and its effect on crop growth: experimental and modelling approaches. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 2, p. 11-17, 1996.
- COX, W. J.; CHERNEY, J. H. Growth and yield responses of soybean to row spacing and seeding rate. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 1, p. 123-128, 2011. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0316>
- CUADRA, S. V. et al. Energy balance in the DSSAT-CSM-CROPGRO model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 297, 108241, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108241>

- CZARNOBAY, F. C.; MOTA, M. C.; SOUZA, K. G.; MOREIRA, A. G.; ALVES, S. M.; BONADEU, F.; GODINHO, V. P. C. Application of coated urea at different phenological stages on second crop corn. **Revista Agrária Acadêmica**, v. 5, n. 3, p. 136-148, 2022. DOI: 10.32406/v5n3/2022/136-148/agrariacad
- FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 11 p. (Special Report, 80).
- FENSTERSEIFER, C. A. et al. On the number of experiments required to calibrate a cultivar in a crop model: the case of CROPGRO-Soybean. **Field Crop Research**, v. 204, p. 146-152, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.007>
- FERREIRA, O. G. L.; ROSSI, F. D.; ANDRIGHETTO, C. **DDA - Determinador Digital de Áreas**: software para determinação de área foliar, índice de área foliar e área de olho de lombo. Versão 2.0. Santo Augusto: IFFarroupilha. 2008.
- FONTANA, D. C. et al. Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela cultura da soja através de dados do sensor Modis. **Bragantia**, v. 71, n. 4, p. 563-571, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052012000400015>
- FOSTER, T. et al. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 181, p. 18-22, 2017. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.11.015
- GOUDRIAAN, J.; MONTEITH, J. L. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. **Annals of Botany**, v. 66, p. 695-701, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a088084>
- HOOGENBOOM, G. et al. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) version 4.5**. Honolulu: University of Hawaii, 2012. CD-ROM.
- JONES, H. G. **Plants and microclimate - A quantitative approach to environmental plant physiology**. 2.ed. Mebourne: Cambridge University Press, 1992. 428p.
- KUCHARIK, C. J.; TWINE, T. E. Residue, respiration, and residuals: Evaluation of a dynamic agroecosystem model using eddy flux measurements and biometric data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 146, n. 3-4, p. 134-158, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.05.011>
- LI, Y. et al. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 118, n. 3, p. 221-227, 2010. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.05.011
- MAYERS, J. D.; LAWN, R. J.; BYTH, D. E. Agronomic studies on soybean (*Glycine max* L. Merrill) in the dry seasons of the tropics. I. Limits to yield imposed by phenology. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 42, n. 7, p. 1075-1092, 1991a. DOI: <https://doi.org/10.1071/AR9911075>
- MAYERS, J. D.; LAWN, R. J.; BYTH, D. E. Agronomic studies on soybean (*Glycine max* L. Merrill) in the dry seasons of the tropics. II. Interaction of sowing date and sowing density. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 42, n. 7, p. 1093-1107, 1991b. DOI: <https://doi.org/10.1071/AR9911093>
- MONSI, M.; SAEKI, T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. **Japanese Journal of Botany**, v. 14, p. 22-52, 1953.

- MOREIRA, E. N. et al. Temporal dynamics of soybean rust associated with leaf area index in soybean cultivars of different maturity groups. **Plant Disease**, v. 99, n. 9, p. 1216-1226, 2015. DOI: 10.1094/PDIS-10-14-1029-RE
- MOREIRA, V. S. et al. Impacts of climate change on water fluxes and soybean growth in southern Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 54, e20228398, 2023. DOI: 10.5935/1806-6690.20230014
- MOREIRA, V. S. et al. Influence of soil properties in different management systems: Estimating soybean water changes in the Agro-IBIS model. **Earth Interactions**, v. 22, n. 4, p. 1-19, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1175/EI-D-16-0033.1>
- MOTA, Marcelo Crestani. **Análise de risco edafoclimático para a soja cultivada na região do Cone Sul de Rondônia: diagnóstico atual e em cenários futuros do clima**. 2019. 187 f. Tese (Doutorado em Clima e Ambiente) - Programa Pós-Graduação em Clima e Ambiente, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus, 2019.
- MUCHOW, R. C. An analysis of the effects of water deficits on grains legumes grown in a semi-arid tropical environment in terms of radiation interception and its efficiency of use. **Field Crops Research**, v. 11, n. 4, p. 309-323, 1985. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(85\)90111-X](https://doi.org/10.1016/0378-4290(85)90111-X)
- MÜLLER, A. G.; BERGAMASCHI, H.; SILVA, M. I. G. Eficiências de interceptação, absorção e de uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12. e REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 3., 2001, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2001. p. 565-566.
- MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Departamento de plantas de lavoura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Evangraf, 2005. 31 p.
- NÓIA JÚNIOR, R. S.; SENTELHAS, P. C. Soybean-maize succession in Brazil: Impacts of sowing dates on climate variability, yields and economic profitability. **European Journal of Agronomy**, v. 103, p. 140-151, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.008>
- PAREDES, P. et al. Assessing yield, water productivity and farm economic returns of malt barley as influenced by the sowing dates and supplemental irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 179, n. 1, p. 132-143, 2017. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.05.033
- PENGELLY, B. C.; BLAMEY, F. P. C.; MUCHOW, R. C. Radiation interception and accumulation of biomass and nitrogen by soybean and three tropical annual forage legumes. **Field Crops Research**, v. 63, n. 2, p. 99-112, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00029-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00029-5)
- PETTER, F. A. Elevada densidade de semeadura aumenta a produtividade da soja? Respostas da radiação fotossinteticamente ativa. **Bragantia**, v. 75, n. 2, p. 173-183, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.447>
- PLÉNET, D.; MOLLIÉ, A.; PELLERIN, S. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. II. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and yield components. **Plant and Soil**, v. 224, n. 2, p. 259-272, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1004835621371>
- PURCELL, L. C. et al. Radiation use efficiency and biomass production in soybean at different plant population densities. **Crop Science**, Madison, v. 42, n. 1, p. 172-177, 2002. DOI: 10.2135/cropsci2002

SAKAMOTO, T.; WARDLOW, B. D.; GITELSON, A. A.; VERMA, S. B.; SUYKER, A. E.; ARKEBAUER, T. A. Two-Step Filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 114, n. 10, p. 2146-2159, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.019>

SALVAGIOTTI, F. et al. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. **Field Crops Research**, v. 108, n. 1, p. 1-13, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.03.001>

SANTOS, J. B. et al. Captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 147-153, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052003000100018>

SCHÖFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para a produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 241-249, 2001.

SHIBLES, R. M.; WEBER, C. R. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. **Crop Science**, v. 6, n. 1, p. 55-59, 1966. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183X000600010017x>

SHIBLES, R. M.; WEBER, C. R. Leaf area, solar radiation and dry matter production by soybeans. **Crop Science**, v. 5, n. 6, p. 575-577, 1965. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci1965.0011183X000500060027x>

SOUZA, P. J. O. P. et al. Solar radiation use efficiency by soybean under field conditions in the Amazon region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 10, p. 1211-1218, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001000001>

SRINIVASAN, V.; KUMAR, P.; LONG, S. P. Decreasing, not increasing, leaf area will raise crop yields under global atmospheric change. **Global Change Biology**, v. 23, n. 4, p. 1626-1635, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13526>

STEINMETZ, S.; SIQUEIRA, O. J. W. Eficiência de conversão em biomassa da radiação solar interceptada pela cultura do arroz irrigado submetida a níveis diferenciados de adubação nitrogenada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9., 1995, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1995. p. 96-98.

STEINMETZ, S.; SIQUEIRA, O. J. W. Eficiência de conversão em biomassa da radiação solar interceptada nas distintas fases do ciclo de três tipos de planta de arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12. e REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 3., 2001, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2001, p. 691-692.

TAGLIAPIETRA, E. L. et al. Optimum leaf area index to reach soybean yield potential in subtropical environment. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 2, p. 932-938, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2017.09.0523>Citations: 33

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

THIMIYAN, R. W.; HEINS, R. D. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion. **HortScience**, v. 18, n. 6, p. 818-822, 1983. DOI: [10.21273/HORTSCI.18.6.818](https://doi.org/10.21273/HORTSCI.18.6.818)

WEBLER, G. et al. Evaluation of a dynamic agroecosystem model (Agro-IBIS) for soybean in Southern Brazil. **Earth Interactions**, v. 16, n. 12, p. 1-15, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1175/2012EI000452.1>

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)

YOKOYAMA, A. H. et al. Índice da área foliar e SPAD durante o ciclo da soja em função da densidade de plantas e sua relação com a produtividade de grãos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 4, p. 531-538, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5965/223811711732018531>

ZDZIARSKI, A. D. et al. Key soybean maturity groups to increase grain yield in Brazil. **Crop Science**, v. 58, n. 3, p. 1155-1165, 2018. DOI: [10.2135/cropsci2017.09.0581](https://doi.org/10.2135/cropsci2017.09.0581)