Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Atributos de interceptação luminosa de um híbrido moderno de milho sob diferentes arranjos espaciais

Everton Servilho Teixeira Barbosa

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2020

Everton Servilho Teixeira Barbosa
Engenheiro Agrônomo

Atributos de interceptação luminosa de um híbrido moderno de milho sob diferentes arranjos espaciais

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **KLAUS REICHARDT**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2020

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

Barbosa, Everton Servilho Teixeira

Atributos de interceptação luminosa de um híbrido moderno de milho sob diferentes arranjos espaciais / Everton Servilho Teixeira Barbosa. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

73 p.

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

1. Radiação solar 2. Coeficiente de extinção de luz 3. Eficiência do uso da radiação 4. Produtividade 5. Espaçamento 6. População de plantas 7. *Zea mays* L. I. Título

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe, Odete Regina Teixeira, pelo amor, educação e valores que me foram concedidos e por sempre me apoiar, acreditar e me incentivar aos estudos. Por ser meu exemplo de bondade, humildade, honestidade e ética.

Aos meus irmãos, Leonardo Servilho Teixeira Barbosa e Alan Augusto Teixeira e à Larissa Joana Vitorino e Eloisa Helena Vitorino, pelo companheirismo, carinho e suporte durante toda a minha vida.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), pela oportunidade de graduação e de mestrado e por sua infraestrutura, professores e funcionários que me proporcionaram o conhecimento e assistência necessária para a condução deste projeto.

Ao meu orientador, Dr. Klaus Reichardt e ao professor Dr. Durval Dourado Neto, pela orientação, amizade, ensinamentos e por me confiarem a responsabilidade desta dissertação.

Aos professores, Felipe Gustavo Pilau, Fabio Ricardo Marin, Paulo Cesar Sentelhas, Sônia Maria de Stefano Piedade e Pedro Jacob Christofoletti, pelas excelentes disciplinas de pós-graduação lecionadas que me proporcionaram uma formação ainda mais completa.

Novamente ao professor Felipe Pilau e seu orientado Daniel Grubert, pelos equipamentos concedidos e pela grande ajuda prestada no processamento dos dados.

Aos professores, pós-graduandos, estagiários e funcionários do Laboratório Multiusuário em Produção Vegetal, especialmente a Jackellyne Bruna, Leandro Zambon e Renan Umburanas pela grande amizade, ajuda e envolvimento direto com o meu trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (FEALQ), pela concessão de bolsas de estudo para a realização deste projeto.

À equipe de Field Solutions da Bayer S. A. de São Paulo/SP, à qual tive a oportunidade de trabalhar, criar grandes amizades e me desenvolver profissionalmente, principalmente à Geovana Reis, Pedro Duarte e Patricia Marini.

À Gloriosa República Gato Preto, por todos os ensinamentos, experiências e momentos vividos durante os anos de minha graduação e pós-graduação, pelos grandes amigos e por ser minha base sempre que necessário.

À Jorge Martins Gonzaga Junior (in memorian), por ter sido um dos meus melhores amigos, sempre me apoiando, compartilhando experiências e me fazendo seguir em frente. Saudades eternas!

À Douglas Custódio, pela companhia, descontração, viagens, paciência e compreensão ao longo deste período e à todos meus amigos, pela amizade, conselhos, auxílios, tolerância e por colaborarem de alguma forma com meu bem-estar, em especial à Ailton Akiba, Rafael Lima, João Chrispim, Gabriel Rizzo, Bruno Carmo, Ednaldo Borgato e Jenifer Severo.

À todos, que me ajudaram, orientaram e me acompanharam direta ou indiretamente,

Muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO.....7
ABSTRACT.....8
LISTA DE FIGURAS.....9
LISTA DE TABELAS.....12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....13
LISTA DE SÍMBOLOS.....14
1. INTRODUÇÃO.....15
2. OBJETIVO.....17
2.1. GERAL.....17
2.2. ESPECÍFICOS.....17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....19
3.1. PANORAMA DA CULTURA DO MILHO.....19
3.2. CARACTERÍSTICAS FITOTÉCNICAS DO MILHO.....20
3.3. CRESCIMENTO POPULACIONAL E EFICIÊNCIA DO USO DE RECURSOS.....22
3.4. RADIAÇÃO SOLAR E SUA INTERAÇÃO COM O AMBIENTE.....23
3.5. COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ.....25
3.6. EFICIÊNCIA DE USO DA RADIAÇÃO.....26
3.7. K E EUR EM MODELOS DE SIMULAÇÃO DE CRESCIMENTO.....27
4. MATERIAL E MÉTODOS.....29
4.1. LOCAL E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....29
4.2. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....30
4.3. COLETA DE DADOS DE BIOMASSA SECA E ÁREA FOLIAR.....31
4.4. COLETA DE DADOS METEOROLÓGICOS.....32
4.4.1. Coeficiente de extinção de luz.....34
4.4.2. Eficiência do uso da radiação.....35
4.5. COLHEITA E PRODUTIVIDADE DA CULTURA.....36
4.6. MODELAGEM DE DADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....36
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....37
5.1. CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA.....37
5.2. IAF E BIOMASSA SECA.....39

5.3. COEFICIENTE DE EXTINÇÃO DE LUZ 46
5.4. EFICIÊNCIA DO USO DA RADIAÇÃO 57
5.5. PRODUTIVIDADE DA CULTURA 60
6. CONCLUSÕES 65
REFERÊNCIAS 67

RESUMO

Atributos de interceptação luminosa de um híbrido moderno de milho sob diferentes arranjos espaciais

A busca pelo uso eficiente de recursos naturais, como água e radiação solar, é uma preocupação agrícola mundial, porém o uso eficiente da radiação ainda tem sido pouco explorado. Além disso, o surgimento de novos híbridos de milho demanda novas pesquisas sobre a interação da radiação com a cultura. As variações do coeficiente de extinção de luz (k) e da eficiência de uso da radiação (EUR) precisam ser mais estudadas com o objetivo de possibilitar maiores produtividades. Dessa forma, o objetivo geral deste estudo foi determinar o coeficiente de extinção de luz e a eficiência do uso da radiação de um híbrido de milho sob diferentes arranjos espaciais durante a segunda safra de 2019 em sistema irrigado, em Piracicaba, SP, Brasil. Os tratamentos consistiram em dois espaçamentos entre linhas (0,45 e 0,90 m) em duas densidades de semeadura (6,5 e 8,5 pl m^{-2}). A cada 14 dias foram coletadas amostras de plantas inteiras para determinar a partição de biomassa seca e o índice de área foliar (IAF). Quantificou-se a radiação fotossinteticamente ativa total, refletida e transmitida durante todo o ciclo da cultura. O coeficiente de extinção de luz foi determinado pela correlação semi-logarítimica da eficiência de interceptação luminosa (εint) e o IAF, enquanto que a eficiência do uso da radiação foi obtida por meio da correlação entre biomassa seca e radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumulada. O coeficiente de extinção de luz e a eficiência do uso da radiação também foram determinados em função de fases de desenvolvimento da cultura. Ao final do ciclo, foi determinada a produtividade e o índice de colheita da cultura (ICG). Os índices de área foliar médios da cultura foram de 3,50, 4,48, 3,39 e 4,01, sendo que o aumento da densidade de semeadura proporcionou maiores valores de IAF. Todos os tratamentos obtiveram o comportamento sigmoidal de crescimento da biomassa seca e o aumento da densidade de semeadura proporcionou maiores valores por área. O coeficiente de extinção de luz foi de 0,55 para o tratamento 1 (0,45 m x 6,5 pl m^{-2}), 0,48 para o tratamento 2 (0,45 m x 8,5 pl m^{-2}), 0,57 para o tratamento 3 (0,90 m x 6,5 pl m^{-2}) e de 0,50 para o tratamento 4 (0,90 m x 8,5 pl m^{-2}). O aumento da densidade de semeadura diminuiu o valor de k. As eficiências do uso da radiação dos tratamentos 1 ao 4 foram respectivamente de 3,43, 3,42, 3,69 e 3,85 g MJ^{-1}. O aumento do espaçamento entre linhas proporcinou aumento da EUR. Os valores de k e EUR médios de todo o ciclo de cultivo podem ser adotados em modelos de simulação de crescimento, assim como seus valores em função de fases de desenvolvimento da cultura. A produtividade dos tratamentos foram de 12,58, 11,16, 12,16 e 11,42 t ha^{-1}, sendo que com o aumento da densidade de semeadura houve uma redução da produtividade. Os ICGs foram de 0,56, 0,39, 0,42 e 0,36, respectivamente. O aumento da densidade de semeadura e do espaçamento entre linhas reduziram o ICG.

Palavras-chave: Radiação solar, Coeficiente de extinção de luz, Eficiência do uso da radiação, Produtividade, Espaçamento, População de plantas, *Zea mays* L.

ABSTRACT

Light interception attributes of a modern maize hybrid under different planting patterns

The search for efficient use of resources, such as water and solar radiation, is a worldwide agricultural concern, but the efficient use of solar radiation has not been much explored. In addition, the emergence of new maize hybrids requires further research on the interaction of radiation with the crop. The variations of the light extinction coefficient (k) and the radiation use efficiency (RUE) needs to be further studied in order to grant higher yields. Thus, the general objective of this study was to determine the light extinction coefficient and the radiation use efficiency of a maize hybrid under different spatial arrangements during the second crop season of 2019 in an irrigated system, in Piracicaba, SP, Brazil. The treatments consisted of two row spacings (0.45 and 0.90 m) in two sowing densities (6.5 and 8.5 plants m^{-2}). Samples of whole plants were collected every 14 days to determine the dry biomass partition and the leaf area index (LAI). Total photosynthetically active radiation, reflected and transmitted were quantified throughout the crop cycle. The light extinction coefficient was determined by the semi-logaritimic correlation between the light interception efficiency (εint) and LAI, while the radiation use efficiency (RUE) was obtained through the correlation between dry biomass and the accumulated photosynthetically active absorved radiation. The light extinction coefficient and the radiation use efficiency were also determined as a function of crop development phases. At the end of the cycle, the crop yield and the harvest index were determined. The average leaf area indexes of the crop were 3.50, 4.48, 3.39 and 4.01, and the increase in sowing density provided higher LAI values. All treatments obtained the sigmoidal growth behavior of dry biomass and the increase in sowing density provided higher values per area. The light extinction coefficient was 0.55 for the treatment 1 (0.45 m x 6.5 pl m^{-2}), 0.48 for the treatment 2 (0.45 m x 8.5 pl m^{-2}), 0.57 for the treatment 3 (0.90 m x 6.5 pl m^{-2}) and 0.50 for the treatment 4 (0.90 mx 8.5 pl m^{-2}). The increase in sowing density decreased the value of k. The solar radiation use efficiencies from treatments 1 to 4 were respectively 3.43, 3.42, 3.69 and 3.85 g MJ^{-1}. The increase of row spacing increased the RUE. The average values k and RUE of the whole crop cycle can be adopted in growth simulation models, as well as their values in function of crop development phases. The yield of the treatments were 12.58, 11.16, 12.16 and 11.42 t ha^{-1}, and with the increase in the sowing density there was a reduction in the crop yield. The harvest indexes were 0.56, 0.39, 0.42 and 0.36, respectively. The increase in sowing density and row spacing reduced the harvest indexes.

Keywords: Solar radiation, Light extinction coefficient, Radiation use efficiency, Yield, Row spacing, Plant population, *Zea mays* L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Número de artigos publicados encontrados na busca do portal de periódicos CAPES/MEC no período de 2014 a 2019 em função da palavra-chave. . 23

Figura 2. Porcentagem de radiação fotossinteticamente ativa absorvida, refletida e transmitida em função do comprimento de onda. 24

Figura 3. Localização da área experimental no campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, Brasil. 29

Figura 4. Croqui do experimento realizado com diferentes arranjos espaciais da cultura do milho na segunda safra de 2019 no campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, Brasil. 31

Figura 5. Dimensões das parcelas do experimento com a cultura do milho na segunda safra de 2019 no campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, Brasil. 31

Figura 6. Posicionamento dos radiômetros em relação as plantas de milho em experimento realizado durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 33

Figura 7. Estação meteorológica e radiômetros instalados em campo durante o experimento realizado na segunda safra da cultura do milho em 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 33

Figura 8. Temperatura máxima, média e mínima do ar no período da semeadura até a colheita do experimento na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 37

Figura 9. Precipitação, irrigação e radiação solar global no período da semeadura até a colheita do experimento na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 38

Figura 10. Balanço hídrico sequencial pelo método de Thornthwaite & Matter (1955) ao longo dos decêndios do período experimental na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 38

Figura 11. Área de solo ocupada por plantas de milho sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 39

Figura 12. Correlação entre os dados do índice de área foliar das plantas de milho observados em campo e os valores estimados por modelos obtidos em experimento com diferentes arranjos espaciais durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 40

Figura 13. Índice de área foliar (IAF) das plantas de milho sob diferentes arranjos espaciais em função dos dias após a emergência da cultura (DAE) na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 41

Figura 14. Partição da biomassa seca das plantas de milho em função do desenvolvimento relativo da cultura sob diferentes arranjos espaciais na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 43

Figura 15. Biomassa seca por órgão da planta de milho em função do desenvolvimento relativo da cultura sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 44

Figura 16. Biomassa seca de órgãos de plantas de milho sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 46

Figura 17. Correlação entre radiação fotossinteticamente ativa refletida (RFAr) e radiação fotossinteticamente ativa (RFA) em plantas de milho submetidas a diferentes espaçamentos e densidades na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 47

Figura 18. Correlação entre o índice de área foliar estimado (IAF) e a função semi-lorarítmica da eficiência de interceptação luminosa (εint) de um híbrido de milho sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 48

Figura 19. Coeficiente de extinção de luz de plantas de milho sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 50

Figura 20. Variação sazonal do coeficiente de extinção de luz da cultura do milho sob diferentes arranjos espaciais em relação ao ângulo zenital em Piracicaba, SP, Brasil, durante a segunda safra de 2019. 52

Figura 21. Correlação entre o índice de área foliar (IAF) e a eficiência de interceptação luminosa (εint) de um híbrido de milho sob diferentes arranjos espaciais na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 53

Figura 22. Máxima eficiência de interceptação luminosa (εint) de plantas de milho sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 54

Figura 23. Radiação fotossinteticamente ativa (RFA), radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAa), radiação fotossinteticamente ativa transmitida (RFAt) e radiação fotossinteticamente ativa refletida (RFAr) em função do dia após a emergência da cultura do milho, sob diferentes arranjos espaciais na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 54

Figura 24. Radiação fotossinteticamente ativa relativa particionada em radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAa), radiação fotossinteticamente ativa transmitida (RFAt) e radiação fotossinteticamente ativa refletida (RFAr) em função do dia após a emergência da cultura do milho durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 55

Figura 25. Correlação entre biomassa seca e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumula (Σ RFAa) na cultura do milho sob diferentes espaçamentos e densidade de semeadura durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 57

Figura 26. Eficiência do uso da radiação solar por plantas de milho sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 59

Figura 27. Produtividade da cultura do milho irrigado cultivado sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.. 61

Figura 28. Comparação das espigas de milho sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura cultivado na segunda safra de 2019 sob irrigação. Piracicaba, SP, Brasil. 62

Figura 29. Índice de colheita de grãos de plantas de milho irrigado sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil..... 63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Fases e estádios fenológicos da cultura do milho..... 22

Tabela 2. Análise físico-química do solo da área experimental no campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, Brasil. 30

Tabela 3. Equipamentos da estação meteorológica utilizados no experimento durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil..... 32

Tabela 4. Índice de área foliar médio e máximo observados e ajustados por modelo da cultura do milho sob diferentes arranjos espaciais durante a segunda safra de 2019 na região de Piracicaba, SP, Brasil..... 42

Tabela 5. Biomassa seca média final das plantas de milho em função do órgão da planta e do arranjo espacial obtidos em experimento realizado na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 45

Tabela 6. Análise de variância e teste de Tukey à 5% de significância do coeficiente de extinção de luz (k) considerando todo o ciclo da cultura do milho sob diferentes arranjos espaciais cultivado na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 49

Tabela 7. Médias do coeficiente de extinção de luz por fases de desenvolvimento da cultura do milho, sob diferentes arranjos espaciais na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 51

Tabela 8. Radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAa), radiação fotossinteticamente ativa transmitida (RFAt) e radiação fotossinteticamente ativa refletida (RFAr) acumuladas e em porcentagem relativa na cultura do milho, sob diferentes arranjos espaciais durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil..... 56

Tabela 9. Análise de variância e teste de Tukey à 5% de significância da eficiência de uso da radiação (EUR) da cultura do milho sob diferentes arranjos espaciais cultivado na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil..... 58

Tabela 10. Médias da eficiência do uso da radiação (EUR) por fases de desenvolvimento da cultura do milho, sob diferentes arranjos espaciais na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. 60

Tabela 11. Análise de variância e teste de Tukey à 5% de significância da produtividade da cultura do milho irrigado sob diferentes arranjos espaciais cultivado na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil..... 61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EUR	Eficiência do Uso da Radiação
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
IAF	Índice de área foliar
ICG	Índice de colheita de grãos
IGC	International Grains Council
MEC	Ministério da Educação
ONU	Organização das Nações Unidas
PAR	Photosynthetically Active Radiation
RFA	Radiação Fotossinteticamente Ativa total
RFAa	Radiação Fotossinteticamente Ativa absorvida
RFAint	Radiação Fotossinteticamente Ativa interceptada
RFAr	Radiação Fotossinteticamente Ativa refletida
RFAt	Radiação Fotossinteticamente Ativa transmitida
RUE	Radiation Use Efficiency

LISTA DE SÍMBOLOS

ºC	Graus Celsios
Σ RFAa	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumulada
εint	Eficiência de interceptação
µm	Micrômetro
µmol m^{-2} $15min^{-1}$	Micromol por metro quadrado por 15 minutos
Al	Alumínio
$CaCl_2$	Cloreto de cálcio
Cfa	Clima subtropical úmido
cm	Centímetro
$cmol_c$ dm^{-3}	Centimol de carga por decímetro cúbico
CTC	Capacidade de troca catiônica
g g^{-1}	Gramas de grãos por gramas de biomassa seca total
g kg^{-1}	Gramas por quilograma
g m^{-2}	Gramas por metro quadrado
g MJ^{-1}	Gramas por megajoule
H+Al	Acidez potencial
k	Coeficiente de extinção de luz
K	Potássio
m	Metro
m%	Saturação por alumínio
m m^{-2}	Metro quadrado de área foliar por metro quadrado de área de solo
m^2	Metro quadrado
Mg	Magnésio
mg dm^{-3}	Miligrama por decímetro cúbico
MJ m^{-2}	Megajoules por metro quadrado
MJ m^{-2} d^{-1}	Megajoules por metro quadrado por dia
mm	Milímetro
MO	Matéria orgânica
OR	Órgãos reprodutores (pendão e espiga)
P	Fósforo
pl m^{-2}	Plantas por metro quadrado
Qg	Radiação solar global
Qo	Radiação solar extraterrestre
SB	Soma de bases
SO_4	Sulfato
t ha^{-1}	Toneladas por hectare
V%	Saturação de bases

1. INTRODUÇÃO

A cultura do milho é considerada a terceira espécie de cereal mais importante no mundo (O'KEEFFE, 2009). Mundialmente são produzidas 1,13 bilhões de toneladas, sendo os Estados Unidos, China e Brasil os maiores produtores representando 32,7, 22,8 e 8,6% do total mundial (FAOSTAT, 2017). No Brasil, na safra 2018/19 foram produzidas 241,9 milhões de toneladas de milho, sendo os estados do Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul e Goiás os maiores produtores, com aproximadamente 28, 15, 15 e 10% da produção nacional (CONAB, 2019).

A produção de milho é destinada principalmente à alimentação humana e animal, à manufatura de fármacos e à produção industrial (O'KEEFFE, 2009). Por possuir um alto valor energético e nutricional é muito desejável à alimentação humana e animal (principalmente aves e suínos), além de ser um alimento de baixo custo e possuir produção viável em pequena ou grande escala (GALVÃO et al., 2014). O milho ainda é utilizado na produção de adoçantes, óleo, amido, álcool, produtos biodegradáveis, elementos espessantes e colantes, antibióticos, entre outros (DUARTE et al., 2015).

Dado o elevado ritmo de crescimento populacional atual, as projeções indicam que até 2050 haverá acréscimo de aproximadamente 26% da população mundial (ONU, 2019). Desta forma, será necessáro aumentar a produção agrícola em até 70% para suprir a demanda mundial por alimentos (WORLD BANK, 2013). Neste contexto, há necessidade do uso mais eficiente dos recursos naturais e do aumento da produtividade das lavouras.

A radiação solar é um recurso que influencia diretamente na produtividade das culturas (TAIZ et al., 2017). Entender como a radiação solar interage com o cultivo é fundamental para melhorar a eficiência de seu uso. Apenas uma fração da radiação solar pode ser absorvida pelas plantas e convertida em carboidratos pelo processo da fotossíntese. Esta fração é denominada radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e compreende os comprimentos de onda de 0,4 a 0,7 µm (PENNING DE VRIES, 1989).

O manejo do arranjo espacial da cultura, como a densidade de semeadura e o espaçamento entre linhas afetam a interceptação luminosa pelas plantas (FONTANA et al., 2012). Dessa forma, determinar o arranjo espacial ideal para a cultura é essencial para um melhor aproveitamento da radiação solar. Para isto, o coeficiente de

extinção de luz (k) e a eficiência de uso da radiação (EUR) são variáveis calculadas que indicam o aproveitamento da radiação solar pela planta. Estas variáveis são comumente empregadas em modelos de simulação de crescimento e produção das culturas (ROMANO, 2005). Estes coeficientes variam em função das condições meteorológicas e das características morfofisiológicas das plantas e, devido ao surgimento de novos híbridos comerciais e a realização de plantios em novos ambientes e novas datas de semeadura, estes valores precisam ser atualizados para a realidade atual (TEIXEIRA et al., 2013; FONTANA et al., 2012).

2. OBJETIVO

2.1. Geral

Analisar o efeito de diferentes arranjos espaciais no coeficiente de extinção luminosa e na eficiência do uso da radiação solar em um híbrido de milho irrigado em ambiente de produção tropical.

2.2. Específicos

(i) Determinar o índice de área foliar ao longo do ciclo da cultura do milho em função do espaçamento e densidade de semeadura;

(ii) Caracterizar o crescimento, produção e partição de biomassa da planta de milho submetidos a diferentes arranjos espaciais;

(iii) Caracterizar as variações da radiação fotossinteticamente ativa absorvida, transmitida e refletida ao longo do desenvolvimento da cultura do milho;

(iv) Determinar o coeficiente de extinção de luz e a eficiência do uso da radiação da cultura do milho em função do espaçamento e densidade de semeadura e em função de fases de desenvolvimento da cultura;

(v) Determinar a produtividade e o índice de colheita de grãos de milho em função de diferentes arranjos espaciais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Panorama da cultura do milho

O Conselho Internacional de Grãos (IGC) estima uma produção mundial de 2,089 bilhões de toneladas de grãos na safra 2018/19. Dentre os graõs, a cultura do milho se destaca devido à sua grande produção e demanda. A produção mundial de milho em 2017 foi de 1,13 bilhões de toneladas, em uma área de 197,1 milhões de hectares (FAOSTAT, 2017). Os principais países produtores são os Estados Unidos que produziram 370 milhões de toneladas em 33,4 milhões de hectares, seguido da China, com a produção de 260 milhões de toneladas em 42,4 milhões de hectares em 2017 (FAOSTAT, 2017).

A produção brasileira de grãos foi de 241,9 milhões de toneladas na safra 2018/19, o que representa um ganho de 6,2% em relação a safra anterior. Os pricipais estados produtores de grãos são o Mato Grosso (27,8%), Paraná (15,0%), Rio Grande do Sul (14,6%) e Goiás (10,1%) (CONAB, 2019). A área de grãos cultivada, principalmente nas culturas de milho em segunda safra, algodão e soja, cresceu em aproximadamente 2,42%, totalizando 63,2 milhões de hectares (CONAB, 2019). O estado de São Paulo produziu cerca de 8,57 milhões de toneladas (3,5% do total nacional) em uma área de 2,17 milhões de hectares.

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, abranjendo 17,49 milhões de hectares, sendo 4,1 na primeira safra e 12,87 na segunda (milho safrinha). Na safra 2018/19, a produção foi de 100,04 milhões de toneladas, dividindo-se em 25,64 na primeira safra e o recorde de produção de 73,17 milhões de toneladas na segunda safra. A produtividade do milho safrinha foi de 5,68 toneladas por hectare enquanto que a de milho safra foi de 6,24 t ha^{-1}. Desde a safra 2011/12, o milho safrinha apresenta uma produção maior que o milho safra, destacando-se como uma safra de importância para o país. Os maiores estados produtores são Mato Grosso, Paraná, Goiás e Mato Grosso do Sul, com respectivamente 31,2, 16,6, 11,4 e 9,5% da produção (CONAB, 2019).

O milho é a terceira espécie de cereal mais importante do mundo (atrás do trigo e do arroz). A cultura possui multiplos usos, incluindo alimentação humana e animal, manufatura de fármacos e produtos industriais. Como alimento, é considerado o mais importante na dieta de muitos países. O milho é altamente empregado na ração

animal devido ao alto valor energético e alimentar do grão, folhas e colmo. A importância para o setor industrial e farmacêutico tem aumentado a cada ano, sendo utilizado para produção de amido, etanol, plásticos e como base de antibióticos (O'KEEFFE, 2009).

3.2. Características fitotécnicas do milho

O milho (*Zea mays* L.) pertence à família Poaceae que teve como origem a América Central ou o México e estimasse que seja uma espécie cultivada há 8 mil anos (PATERNIANI et al., 2000). Com o processo de seleção natural e de domesticação, atualmente é uma planta anual, robusta e ereta, com um a quatro metros de altura, altamente eficiente na capacidade de acúmulo de fotoassimilados e, consequentemente, na produção de grãos (MAGALHÃES et al., 2002).

É uma monocotiledônea classificado como uma planta C_4 que possui elevado potencial produtivo e acentuada habilidade fisiológica na conversão de carbono mineral em compostos orgânicos (O'KEEFFE, 2009). Estes compostos são translocados das folhas e de outros tecidos fotossinteticamente ativos (fonte) para locais onde serão estocados ou metabolizados (dreno), como grãos. As relações entre fonte e dreno podem ser alteradas dependendo das condições do solo, do clima, do estádio fisiológico e do nível de estresse da planta (TAIZ et al., 2017).

O rendimento dos grãos pode ser expresso pela seguinte expressão (ANDRADE et al., [1991], modificada por FANCELLI [2013]):

$$\mathrm{y} = Ri.eI.eC.p \qquad (1)$$

em que: y = rendimento de grãos; Ri = radiação incidente; eI = eficiência da interceptação da radiação incidente; eC = eficiência de conversão da radiação interceptada em biomassa vegetal; p = partição de fotoassimilados em partes de interesse comercial.

A radiação incidente está em função da localização geográfica da área de produção e período do ano. A eficiência de interceptação varia conforme a idade da planta, a arquitetura foliar, o arranjo espacial e a população empregada. A eficiência de conversão depende, principalmente, da temperatura do ar, do estado nutricional e

do equilíbrio hídrico das plantas. Por sua vez, a partição dos fotoassimilados se dá em função do genótipo, das fases fenológicas, do nível de estresse das plantas e das relações entre fonte e dreno estabelecidas (FANCELLI, 2013).

Dessa forma, a interceptação da radiação fotossinteticamente ativa pelo dossel exerce grande influência sobre a produtividade da cultura do milho quando os outros fatores ambientais são favoráveis. Adequando-se o arranjo de plantas é possível aumentar a interceptação de radiação solar e, consequentemente, o rendimento de grãos. O arranjo de plantas pode ser manipulado através de alterações na densidade de semeadura e no espaçamento entre linhas. A escolha do arranjo espacial é de extrema importância, pois a escolha inadequada pode inibindir a plena expressão do potencial produtivo dos híbridos de arquitetura moderna (BRACHTVOGEL, 2010).

O ciclo de crescimento do milho pode variar de 100 a 300 dias a depender da interação do genótipo com as condições meteorológicas. Nos genótipos comerciais utilizados no Brasil, o ciclo varia entre 110 e 160 dias. O uso de uma escala fenológica baseada nas mudanças morfológicas da planta e nos eventos fisiológicos que ocorrem no ciclo de vida do milho é imprescindível para oferecer maior segurança e precisão nas ações de manejo e pesquisa (FANCELLI, 2015).

O ciclo da cultura pode ser dividido em períodos de desenvolvimento distintos. Nesta escala, os estádios de crescimento e desenvolvimento anteriores ao aparecimento dos pendões (fase vegetativa) são identificados mediante a avaliação do número de folhas plenamente expandidas ou desdobradas. Para os estádios posteriores ao florescimento (fase reprodutiva), a identificação é efetuada com base na presença de estruturas reprodutivas e no desenvolvimento e consistência dos grãos (KINIRY; BONHOMME, 1991). De acordo com Fancelli (2013), as fases de desenvolvimento também podem ser interpretadas como: (i) crescimento e desenvolvimento radicular (período entre os estádios V0 e V7), (ii) definição do potencial produtivo (período entre os estádios V4 e V6), (iii) definição do número de fileiras na espiga (período entre os estádios V7 e V9), (iv) definição do número e tamanho da espiga (período entre os estádios V12 e V14) e (v) enchimento efetivo de grãos (período entre os estádios R1 e R2) (Tabela 1).

Tabela 1. Fases e estádios fenológicos da cultura do milho.

Fase	Estádio	Descrição
Vegetativo	V_0	Germinação/Emergência
	V_4	4ª Folha completamente desenvolvida
	V_8	8ª Folha completamente desenvolvida
	V_{12}	12ª Folha completamente desenvolvida
	V_T	Aparecimento do pendão
Reprodutivo	R_1	Florescimento e polinização
	R_2	Grãos leitosos
	R_3	Grãos pastosos
	R_4	Grãos farináceos/Início da formação de “dentes”
	R_5	Grãos “farináceos duros”
	R_6	Maturidade fisiológica

Adaptado de FANCELLI (2013).

3.3. Crescimento populacional e eficiência do uso de recursos

As projeções de crescimento da população mundial indicam um crescimento acelerado e contínuo nas próximas décadas, atingindo uma população superior a 8,5 bilhões de pessoas em 2030 e superior a 9,7 bilhões em 2050, um acréscimo de até aproximadamente 26% (ONU, 2019). Consequentemente, a demanda por alimentos irá aumentar e para supri-la a produção agrícola terá que aumentar em até 70% (WORLD BANK, 2013). As estimativas de aumento do consumo per capita, de expansão das cidades e de restrições no uso da terra, também suportam este cenário e evidenciam a problemática da incapacidade de atender à demanda por alimentos (SAATH; FACHINELLO, 2018).

Além disso, as preocupações com a sustentabilidade dos recursos utilizados na produção agrícola geram uma necessidade de maior eficiência. Diversas pesquisas buscam aumentar a eficiência do uso destes recursos, como da água, do solo, de nutrientes e de defensivos agrícolas a fim de obterem maiores produtividades utilizando cada vez menos insumos. A radiação solar é outro recurso que deve ser estudado, pois é uma fonte primária de energia para as plantas que atua diretamente no processo de fotossíntese (TAIZ et al., 2017). Devido a esta relação, o melhor aproveitamento da luz também pode tornar os sistemas mais eficientes e produtivos.

Um levantamento realizado no portal de periódicos da CAPES/MEC com palavras-chave relevantes compara o número de artigos publicados nos últimos cinco anos sobre a eficiência de uso da água e da radiação na cultura do milho (Figura 1). O

número de artigos publicados sobre a eficiência do uso da água é muito maior do que a eficiência do uso da radiação solar e, dessa forma, torna-se evidente que estudos sobre a eficiência do uso da radiação devem ser melhor explorados.

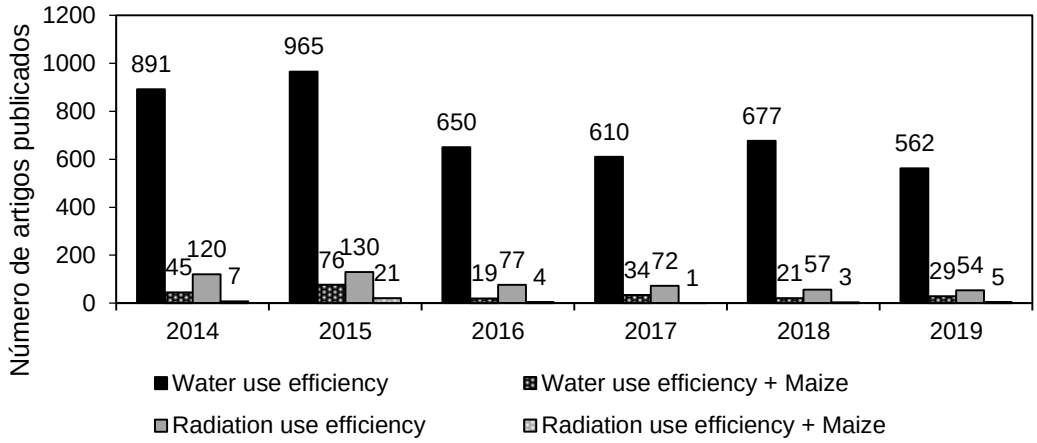

Figura 1. Número de artigos publicados encontrados na busca do portal de periódicos CAPES/MEC no período de 2014 a 2019 em função da palavra-chave.

3.4. Radiação solar e sua interação com o ambiente

A energia da radiação solar é responsável pelos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na atmosfera, compreendendo os comprimentos de onda de 0,2 a 20 µm (REICHARDT; TIMM, 2019). A radiação que atinge uma superfície perpendicular aos raios solares no topo da atmosfera terrestre é chamada de radiação solar extraterrestre (Qo). A intensidade desta radiação em cada local na Terra é determinada pelo ângulo entre a direção dos raios solares e o plano do horizonte. Devido aos movimentos de translação, rotação e ao ângulo de inclinação da Terra, a radiação muda ao longo do dia e torna-se diferente em cada latitude e em cada dia do ano (ALLEN et al., 1998).

Após a entrada da radiação solar na atmosfera, parte desta é dispersada, refletida ou absorvida pelos gases atmosféricos, nuvens, partículas e poeira. A quantidade de radiação solar que fica disponível na superficie da Terra é denominada radiação solar global (Qg). Em dias de céu claro, a radiação solar global é aproximadamente 75% da radiação solar extraterrestre. Em dias nublados, devido a grande quantidade de nuvens, há uma maior dispersão e reflexão da radiação na

atmosfera, entretanto, aproximadamente 25% da radiação extraterrestre ainda pode atingir a superfície da Terra (ALLEN et al., 1998).

A radiação fotossinteticamente ativa (RFA, ou PAR – do inglês “Photosynthetically Active Radiation”) é uma fração do espectro da radiação solar global que compreende os comprimentos de onda de 0,4 a 0,7 µm (FINCH et al., 2004). Apenas esta fração da radiação pode ser absorvida pelas plantas e convertida em carboidratos pelo processo da fotossíntese (PENNING DE VRIES, 1989). Uma porcentagem desta radiação inicialmente absorvida é perdida pelo metabolismo e uma quantidade menor é perdida como calor. Além disso, uma pequena porção da RFA é transmitida através das plantas e parte é refletida a partir de sua superfície. Como a clorofila absorve fortemente nas faixas do espectro azul e do vermelho, os comprimentos de onda na faixa do verde são dominantes na luz transmitida e refletida (TAIZ et al., 2017) (Figura 2).

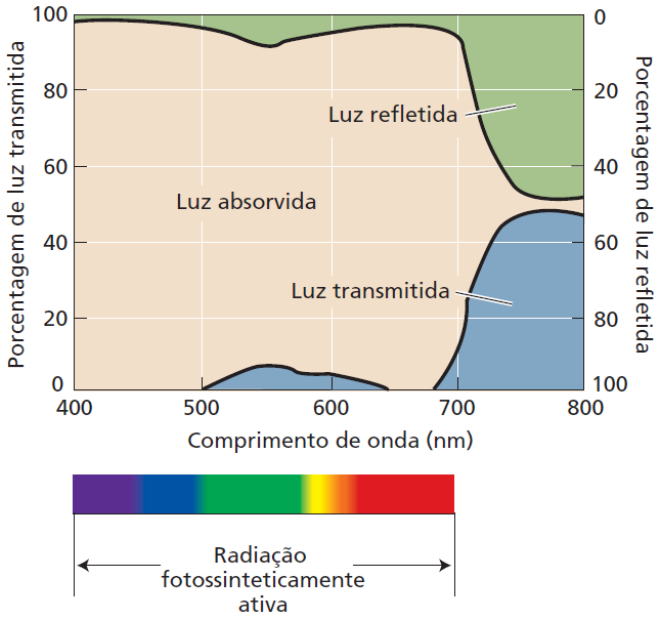

Figura 2. Porcentagem de radiação fotossinteticamente ativa absorvida, refletida e transmitida em função do comprimento de onda. Fonte: TAIZ et al., 2017, p. 247.

Conforme a radiação fotossinteticamente ativa interage com a atmosfera, ela sofre diferentes processos. Quando incide sobre uma superficie, como uma folha, parte dela é refletida de volta à atmosfera (RFAr), parte é absorvida/interceptada (RFAa ou RFAint), podendo ser utilizada nos processos físicos, químicos e biológicos e parte é transmitida (RFAt) através da folha para uma superfície mais abaixo (REICHARDT; TIMM, 2019).

3.5. Coeficiente de extinção de luz

A radiação que atravessa a superfície e é transmitida depende das propriedades da superfície e segue a lei de Lambert-Beer (REICHARDT; TIMM, 2019). A quantidade de energia luminosa ao longo de um dossel é uma função exponencial negativa do produto do índice de área foliar (IAF) pelo coeficiente de extinção luminosa (k), ou seja, a quantidade de luz num determinado nível do dossel é reduzida exponencialmente com o aumento do IAF governado pelo k (MONSI; SAEKI, 1953; SCHÖFFEL; VOLPE, 2001), ou seja:

$$RFAa = RFA\,.\,[1 - e^{-(k\,.\,IAF)}] \qquad (2)$$

em que: RFAa = Radiação fotossinteticamente ativa absorvida; RFA = Radiação fotossinteticamente ativa total; k = Coeficiente de extinção luminosa; IAF = Índice de área foliar.

Isolando a variável k, pode-se dizer que este é função da fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa e do índice de área foliar:

$$k = \frac{-\ln\,(RFAa/RFA)}{IAF} \qquad (3)$$

O coeficiente de extinção de luz é um parâmetro adimensional que varia entre as espécies e indica a diminuição do fluxo de radiação dentro de um dossel por absorção e espalhamento (TEIXEIRA et al., 2013), fornecendo uma indicação da eficiência das plantas em interceptar a radiação. Para cada cultura, este coeficiente é determinado pelas características estruturais da planta, ou seja, o grau de atenuação da luz ao atravessar o dossel varia conforme a composição morfológica da planta, hábito de crescimento, estrutura, ângulo de inserção foliar e disposição das folhas no dossel (FAGUNDES et al., 2001). A densidade populacional e espaçamento entre linhas também afetam o aproveitamento da radiação pelas plantas (STEWART et al., 2003). A distribuição adequada de plantas na linha e o espaçamento entre linhas possibilitam um melhor aproveitamento de luz, água e nutrientes, levando a um maior produtividade da cultura (ARGENTA et al., 2001).

Menores valores do coeficiente de extinção luminosa (próximos a 0,4) indicam uma cultura com folhas mais eretas e, consequentemente, uma maior penetração da luz no dossel, enquanto que culturas de folhas mais horizontais apresentam maiores valores e próximos a 1,0 (NOBEL et al., 1993). Altos valores do coeficiente de extinção de luz indicam uma distribuição mais uniforme da área foliar e uma arquitetura mais plana do dossel (YUNUSA et al., 1993).

A área foliar, interceptação de luz, fotossíntese e ambiente luminoso, dentre outras variáveis, são muito importantes para o processo de crescimento e produção das plantas, uma vez que 90% do peso da massa seca das plantas são devidos à assimilação fotossintética de carbono (PEDREIRA et al., 1998). A diferença na morfologia das plantas interfere na extinção da luz no seu dossel e, consequentemente, na quantidade de RFA absorvida pelas folhas, o que altera a eficiência de conversão da energia solar em energia química e provoca efeito direto na produção de biomassa das plantas (FAGUNDES et al., 2001).

3.6. Eficiência de uso da radiação

A eficiência de uso da radiação (EUR), ou do inglês “Radiation Use Efficiency” (RUE), demonstra a relação entre a produção de biomassa e a radiação interceptada (TEIXEIRA et al., 2013). Ela pode ser determinada pela correlação entre a biomassa seca produzida pela planta e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumulada ao longo do ciclo (MONTEITH; MOSS, 1977).

Devido às diferenças entre características fisiológicas e morfológicas, a EUR é variável entre cada cultivares e espécies. O manejo cultural, como a densidade de semeadura, também afeta o aproveitamento da radiação fotossinteticamente ativa pelas plantas (FONTANA et al., 2012).

Densidades de semeadura elevadas interceptam grande parte da RFA, porém há uma baixa qualidade da distribuição ao longo do dossel, enquanto que menores densidades apresentam baixa interceptação e menor eficiência. Portanto, determinar a densidade de semeadura adequada melhora a eficiência no aproveitamento da RFA (PETTER et al., 2016).

3.7. K e EUR em modelos de simulação de crescimento

Os modelos de simulação são utilizados como ferramentas que permitem conhecer respostas das plantas ao ambiente e estudar o desempenho das culturas em diferentes áreas, situações e manejos (TOJO SOLER, 2004). Também podem ser definidos como um conjunto de equações para estimar o crescimento, desenvolvimento e produção de uma cultura a partir de uma série de coeficientes fitogenéticos e variáveis ambientais (MONTEITH, 1996).

Conforme analisado por Romano (2005), o coeficiente de extinção de luz e a eficiência de uso da radiação são variáveis utilizadas em diversos modelos de simulação de culturas. O coeficiente de extinção de luz pode ser utilizado para estimar a quantidade de radiação solar absorvida pelo dossel das plantas (GALLAGHER; BISCOE, 1978) e o emprego da EUR se baseia na relação linear encontrada por Monteith (1977) entre a RFA absorvida e a produção de massa seca das culturas.

Diversos autores destacam a importância destes coeficientes para o manejo das culturas, entretanto, grande parte destas pesquisas com crescimento e ecofisiologia foi realizada apenas para regiões temperadas e com genótipos antigos (ROCHA et al., 1993). Uma vez que as características morfofisiológicas da planta alteram estes coeficientes utilizados em modelagem, o surgimento de novos híbridos de milho com seu cultivo em novos ambientes e datas de semeadura demanda novos estudos para compreender os processos que afetam o crescimento e desenvolvimento da planta e que influenciam a produtividade da cultura.

Conhecer as características ecofisiológicas de uma planta em cada fase de seu desenvolvimento permite otimizar o uso dos recursos e incrementar a produção (TEIXEIRA et al., 2013). Romano (2005) observou que cada híbrido de milho e em cada fase de desenvolvimento apresenta um valor de coeficiente de extinção de luz distinto. Modelos que não levam em consideração a variação da dinâmica da radiação ao longo do ciclo da cultura são menos sensíveis às variações climáticas e fisiológicas da planta, sendo assim menos precisos (YANG et al., 2004).

O estudo da dinâmica da RFA geram informações que proporcionam o melhor aproveitamento da luz e, consequentemente, maior produtividade. Devido a importância da segunda safra de milho na produção nacional de grãos, a carência de estudos e a prática de adensamento, é necessário compreender o comportamento da luz nesse sistema de produção.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Local e caracterização da área

A pesquisa foi conduzida no município de Piracicaba/SP, na área experimental do Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), sob coordenadas geográficas 22° 41’ 30” S, 47° 38’ 30” O e 546 m de altitude. O clima da região, segundo a classificação de Köppen (1948) é Cfa (subtropical úmido com clima oceânico, com ausência de estação seca com verão quente) (ALVARES et al., 2013). A média anual da temperatura é de 22,3 ºC, a precipitação pluvial é de 1347 mm e a radiação solar global é de 16,4 MJ m^{-2} d^{-1}. O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho distrófico argiloso b nítico (HEIFFIG, 2002). A irrigação foi realizada durante todo o ciclo da cultura por meio de um sistema de pivô central, sendo as lâminas de água aplicadas de acordo com a necessidade baseada no balanço hídrico climatológico sequêncial de um gramado (THORNTHWAITE; MATTER, 1955).

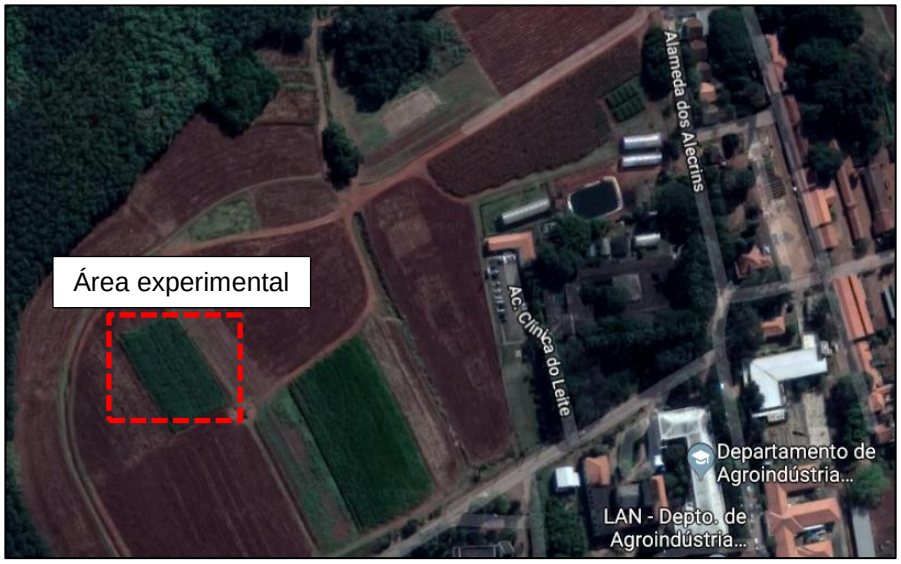

Figura 3. Localização da área experimental no campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, Brasil.

Foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0-20 cm e 20-40 cm (Tabela 2) para caracterização físico-química e para gerar recomendações de manejo do solo. O preparo do solo foi efetuado por meio de uma gradagem e uma

subsolagem. A adubação de base constitiu em 70 kg P_2O_5 ha^{-1}, 40 kg K_2O ha^{-1} e 20 kg N ha^{-1}, enquanto que na adubação de cobertura foi utilizado 100 kg N ha^{-1} no estádio V4 e 100 kg N ha^{-1} no estádio R1, seguindo as recomendações do Boletim 100 IAC (RAIJ et al., 1997). O controle fitossanitário foi realizado de forma adequada.

Tabela 2. Análise físico-química do solo da área experimental no campus da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, Brasil.

Profundidade	pH	P	SO_4	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	MO	V	m
cm	$CaCl_2$	--- mg dm^{-3} ---		---------- $cmol_c$ dm^{-3} ----------							------- % -------		
0 - 20	5,7	30	7	0,53	3,6	1,7	2,8	0	5,8	8,6	0,9	68	0
20 - 40	5,5	11	25	0,32	3,3	1,3	2,8	0	4,9	7,7	0,7	64	0

Profundidade (cm)	Argila (g kg^{-1})	Silte (g kg^{-1})	Areia (g kg^{-1})
0 - 20	514	146	340

4.2. Delineamento experimental

O híbrido de milho BM 812 PRO2 foi semeado na segunda safra em 04 de abril de 2019 de forma mecanizada, sendo caracterizado por ser altamente produtivo, de ciclo precoce, arquitetura foliar semiereta, altura de 2,25 a 2,65 m, tolerante a lepidópteros e ao glifosato. A população recomendada para a safra é de 6,0 a 6,5 plantas m^{-2} e na segunda safra, em ausência de irrigação, uma população de 5,0 a 5,5 plantas m^{-2}. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 2, com quatro tratamentos e 5 repetições. Os tratamentos consistiram de variações no espaçamento e na densidade de semeadura da cultura, sendo: Tratamento 1 (T1), 0,45 m de espaçamento com 6,5 plantas m^{-2}; Tratamento 2 (T2), 0,45 m de espaçamento com 8,5 plantas m^{-2}; Tratamento 3 (T3), 0,90 m de espaçamento com 6,5 plantas m^{-2}; Tratamento 4 (T4), 0,90 m de espaçamento com 8,5 plantas m^{-2} (Figura 4).

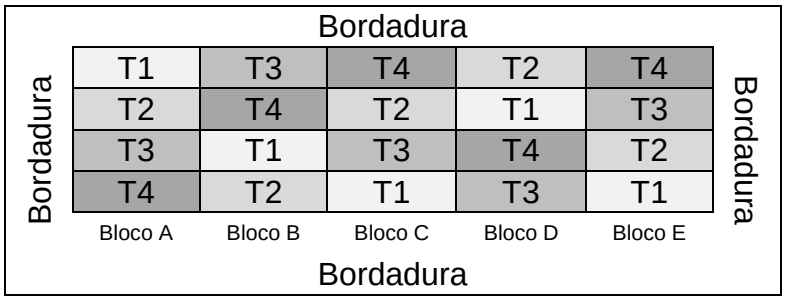

Figura 4. Croqui do experimento realizado com diferentes arranjos espaciais da cultura do milho na segunda safra de 2019 no campus da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, Brasil.

As parcelas consistiram de 6,75 m de largura por 10 m de comprimento, totalizando 67,5 m², sendo 14 linhas de milho nas parcelas dos tratamentos um e dois e 7 linhas nas parcelas dos tratamentos três e quatro. Para a coleta de dados, desconsiderou-se as linhas laterais de cada parcela, sendo a área útil da parcela delimitada pela linha tracejada da Figura 5.

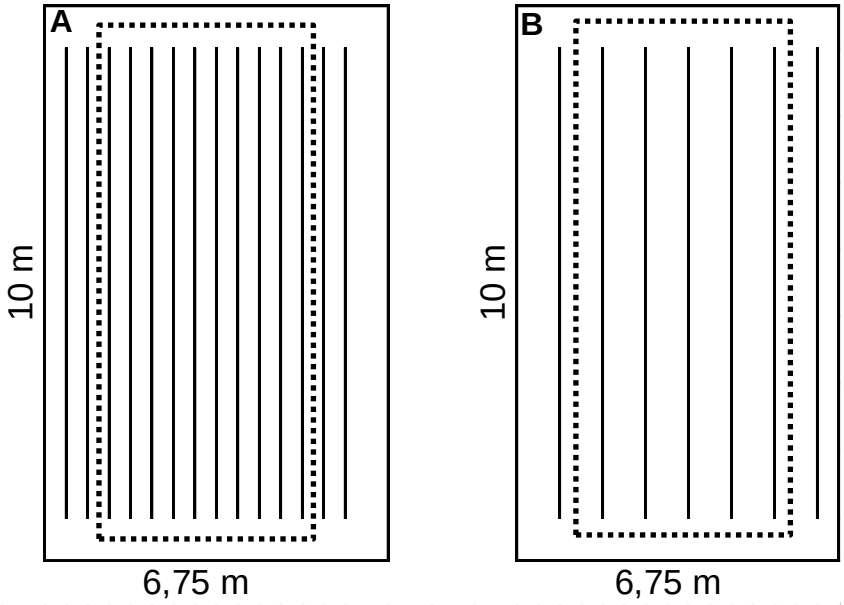

Figura 5. Dimensões das parcelas do experimento com a cultura do milho na segunda safra de 2019 no campus da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, Brasil. A: Tratamentos 1 e 2; B: Tratamentos 3 e 4.

4.3. Coleta de dados de biomassa seca e área foliar

Após a germinação do milho e no estádio R1, foi realizada uma contagem de plantas por metro linear nas parcelas para verificar a área de solo de uma planta de cada tratamento e para garantir a população esperada. As avaliações de índice de

área foliar e biomassa foram realizadas a cada 14 dias, totalizando dez avaliações ao longo do ciclo. Em cada avaliação era coletada uma planta inteira de cada repetição dos tratamentos. A raiz coletada correspondeu a um volume de solo de 0,027 m³.

As plantas coletadas foram particionadas em seus diferentes órgãos, sendo eles: raízes, colmo, folhas e órgãos reprodutores (pendão e espiga) (OR). A área foliar foi mensurada pelo equipamento LI-COR® (modelo Li-3100C) e calculado o índice de área foliar (IAF) através da divisão da área foliar pela área de solo que cada planta ocupava. Todos os órgãos das plantas foram secos à 65 ºC em estufa de circulação forçada até a obtenção de peso constante.

4.4. Coleta de dados meteorológicos

Uma estação meteorológica foi instalada próxima à área experimental para registrar os dados meteorológicos constantemente. Os equipamentos da estação meteorológica estão descritos na tabela abaixo:

Tabela 3. Equipamentos da estação meteorológica utilizados no experimento durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Equipamento	Modelo	Marca
Radiômetro com sensor de RFA	SQ-326-SS	Apogee instruments
Sensor umidade relativa e temperatura do ar	HMP155	Vaisala
Sensor temperatura do solo	Fio de cobre constantan, modelo Termopar tipo T	Inbrac Vitória s/a
Sensor umidade do solo	Sensor de potencial mátrico do solo modelo 257	Campbell Scientific
Armazenamento de dados	Datalogger modelo CR1000	Campbell Scientific

Os radiômetros foram instalados dentro da área experimental conforme a figura abaixo. Cada radiômetro possuía seis sensores de RFA espaçados à 5 cm. Um radiômetro foi instalado no topo de uma barra de ferro (acima do dossel da cultura) com os sensores voltados para cima a fim de quantificar a radiação fotossinteticamente ativa total (RFA) que atinge a cultura. Outro radiômetro foi instalado na mesma barra, porém voltado para baixo, a fim de quantificar a radiação fotossinteticamente ativa refletida pela cultura e pelo solo (RFAr). Por último, um sensor foi instalado no nível da superfície do solo voltado para cima para quantificar a radiação fotossinteticamente ativa transmitida através do dossel das plantas (RFAt). A altura da barra de ferro foi ajustada conforme o crescimento das plantas,

sempre permanecendo aproximadamente 30 cm acima do nível do dossel da cultura. Devido a disponibilidade de apenas quatro radiômetros, estes foram rotacionados semanalmente entre as parcelas dos tratamentos, sendo assim, a cada semana era feita a leitura dos dados de RFA, RFAr de um tratamento e de RFAt de dois tratamentos.

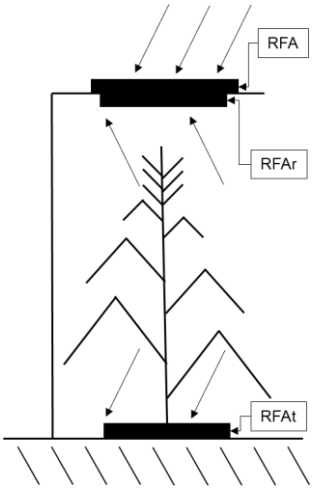

Figura 6. Posicionamento dos radiômetros em relação as plantas de milho em experimento realizado durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

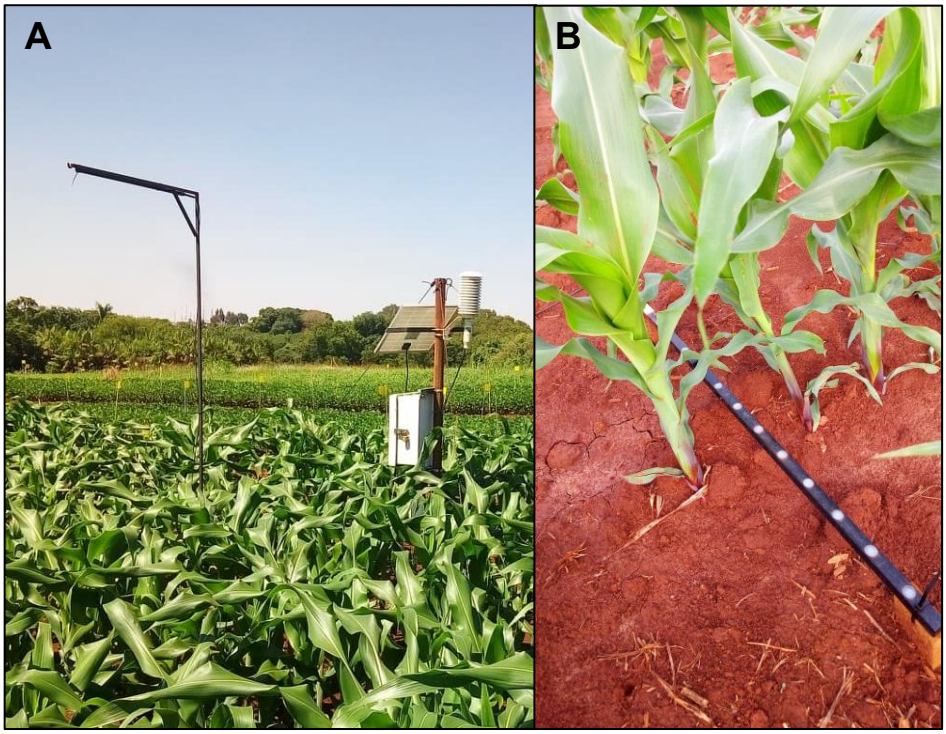

Figura 7. Estação meteorológica e radiômetros instalados em campo durante o experimento realizado na segunda safra da cultura do milho em 2019. Piracicaba, SP, Brasil. A: Radiômetros instalados na barra para quantificar RFA e RFAr. B: Radiômetro instalado para quantificar RFAt.

Os dados foram armazenados no *datalogger* com uma programação de armazenamento de médias a cada 15 minutos, durante todo o ciclo da cultura. Foi calculada a média diária da temperatura e umidade relativa e para os dados de radiação solar, os valores em μmol m^{-2} $15min^{-1}$ foram convertidos e integrados para MJ m^{-2} dia^{-1}. Os dados de precipitação foram obtidos do Posto Meteorológico "Professor Jesus Marden dos Santos" da ESALQ/USP.

4.4.1. Coeficiente de extinção de luz

A rotação semanal dos radiômetros gerou a falta de dados de RFAr e RFAt em todos os tratamentos. Devido a baixa variação dos dados de RFAr ao longo do ciclo da cultura, os dados faltantes foram estimados por meio de uma regressão linear simples entre a RFA total e os dados observados de RFAr, utilizando o Microsoft Excel 2013.

Com os dados de RFAr ajustados para todos os dias do ciclo da cultura, foi calculada a eficiência de interceptação (εint) nos dias em que haviam os dados de RFAt, através da equação:

$$\varepsilon\text{int} = \frac{RFA - RFAr - RFAt}{RFA} \quad (4)$$

Com valores de εint e IAF de cada tratamento estimou-se o coeficiente de extinção de luz a partir da teoria de Monsi & Saeki (1953), com base na lei de Lambert-Beer:

$$\ln(1 - \varepsilon\text{int}) = -k.IAF \quad (5)$$

em que: εint = eficiência de interceptação; k = coeficiente de extinção de luz; IAF = índice de área foliar.

A linha de tendência da correlação entre IAF (eixo x) e ln (1-εint) (eixo y) foi forçada a passar pela origem (β0 = 0), sendo o coeficiente de extinção de luz (-k) o valor do coeficiente angular da reta.

Com o objetivo de verificar a variação do coeficiente de extinção de luz ao longo do ciclo de cultivo da cultura do milho, realizou-se o mesmo procedimento de

cálculo de k, porém dividindo o ciclo da cultura por fases de desenvolvimento de aproximadamente 42 dias cada, seguindo a escala fenológica, em que: Fase 1 = entre V2 e V10; Fase 2 = entre V10 e R3; Fase 3 = entre R3 e R6. Após a determinação do k em cada fase, foi calculada a média aritimética das três fases a fim de uma comparação com a média de k que levou em consideração todo o ciclo da cultura.

O valor do coeficiente de extinção de luz foi utilizado para estimar o valor de RFAa conforme a equação de Monsi & Saeki (1953):

$$RFAa = RFA.[1 - e^{-(k.IAF)}] \quad (6)$$

A RFAt foi estimada pela equação (VARLET-GRANCHER et al., 1989):

$$RFAt = RFA - RFAr - RFAa \quad (7)$$

4.4.2. Eficiência do uso da radiação

Foi calculada a RFAa acumulada ao longo de todo o ciclo (Σ RFAa). Em plantas saudáveis, com água e nutrição adequada, a produção de biomassa seca é uma função da RFAa e pode ser representada pela equação (MONTEITH; MOSS, 1977):

$$MS = \mathrm{EUR}.RFAa \quad (8)$$

em que: MS = Produção de biomassa seca (g m^{-2}); EUR = eficiência do uso da radiação (g MJ^{-1}); RFAa = Radiação fotossinteticamente ativa absorvida (MJ m^{-2}).

A eficiência do uso da radiação foi determinada pela correlação entre a biomassa seca e a Σ RFAa. A linha de tendência foi forçada a passar pela origem (β0 = 0) e o coeficiente angular da reta corresponde à EUR (MONTEITH, 1994).

Devido a variação da EUR ao longo do desenvolvimento da planta, esta também foi calculada para três fases de desenvolvimento da cultura, sendo Fase 1 = entre V2 e V10; Fase 2 = entre V10 e R3; Fase 3 = entre R3 e R6. Também foi

calculada a média aritimética das três fases a fim de comparar com a média de EUR que levou em consideração todo o ciclo da cultura.

4.5. Colheita e produtividade da cultura

No dia 14 de agosto de 2019, após a cultura atingir o ponto de maturidade fisiológica (Estádio R_6) e os grãos atingirem aproximadamente 13% de umidade, foram colhidas 10 espigas de forma aleatória e manual de cada parcela. A produtividade foi calculada dividindo-se o peso dos grãos da espiga pela área que a planta ocupa (g m^{-2}) e transformada para t ha^{-1}. Calculou-se o índice de colheita de grãos (ICG) pela divisão do peso dos grãos de cada espiga (g m^{-2}) pelo peso total da planta (g m^{-2}).

4.6. Modelagem de dados e análise estatística

Utilizou-se o programa TableCurve 2D (Versão 5.01) para o ajuste dos dados de IAF, selecionando o modelo de maior significância estatística e sentido prático. Com os dados de coeficiente de extinção de luz e eficiência do uso da radiação, foi feita uma análise de variância ao nível de 5% de probabilidade e, quando significativa, foi realizado um teste de Tukey utilizando o software estatístico Sisvar (Versão 5.7).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização meteorológica

Durante o ciclo da cultura, a temperatura média variou de 12,5 ºC à 25,4 ºC se mantendo na faixa ideal de crescimento e desenvolvimento do milho (entre 10 e 30 ºC) (WARRINGTON; KANEMASU, 1983). A temperatura máxima observada foi de 32,7 ºC e a mínima de 2,4 ºC. Do início do ciclo até meados de julho a temperatura apresentou tendência de queda e após este período houve um leve aumento das temperaturas até o fim do ciclo (Figura 8).

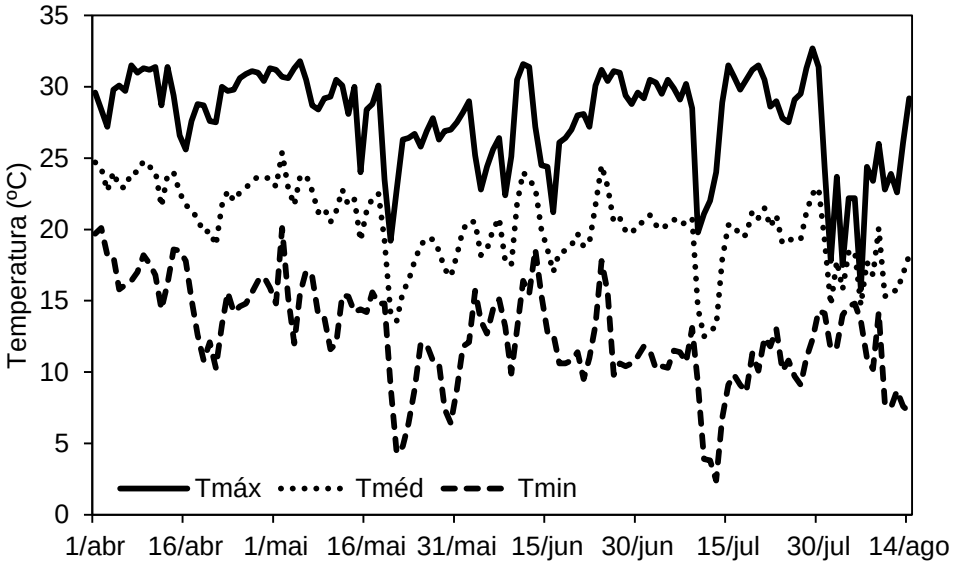

Figura 8. Temperatura máxima, média e mínima do ar no período da semeadura até a colheita do experimento na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Houveram poucas chuvas ao longo do período experimental (aproximadamente 120 mm), caracterizando um tempo seco e de extrema necessidade de irrigação. Para a cultura desenvolver-se e produzir é recomendado no mínimo 350 mm dependendo das condições meteorológicas locais (FANCELLI; DOURADO, 2004). As principais chuvas ocorreram na fase de estabelecimento da cultura, no estádio V6, R1 e próximo a colheita (Figura 9). Lâminas de irrigação de 7 mm foram aplicadas sempre que necessário, seguindo o balanço hídrico sequencial de Thornthwaite & Matter (1955), totalizando 48 irrigações. Não foi verificado nenhum déficit hídrico ao longo do ciclo, com excessão do último decêncio de cultivo da cultura, quando não eram mais realizadas irrigações (Figura 10).

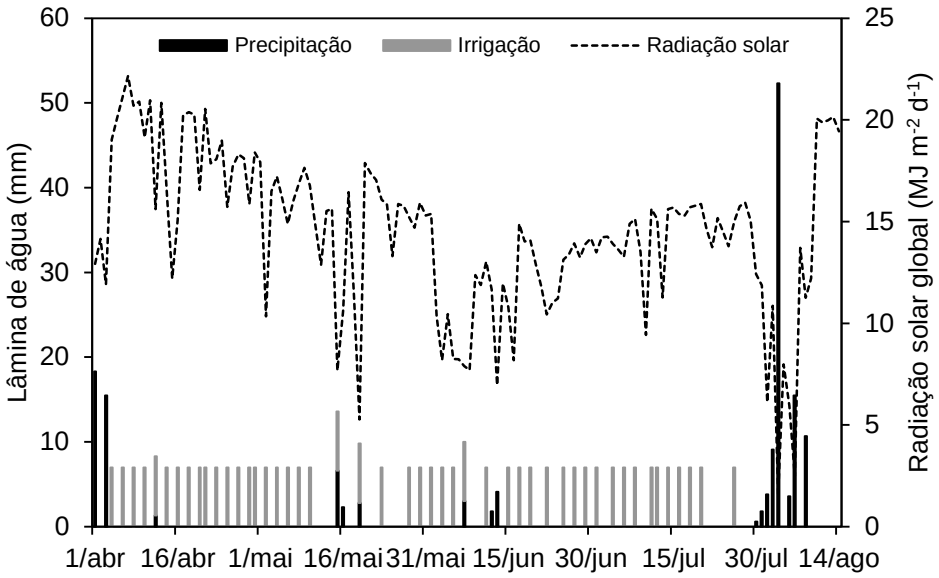

Figura 9. Precipitação, irrigação e radiação solar global no período da semeadura até a colheita do experimento na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

A variação da radiação solar global ao longo do período experimental foi similar ao da temperatura, tendo uma redução da disponibilidade de energia solar com o avanço do tempo e voltando a aumentar ao final do ciclo da cultura, obtendo uma média de 14,5 MJ m^{-2} d^{-1} (Figura 9).

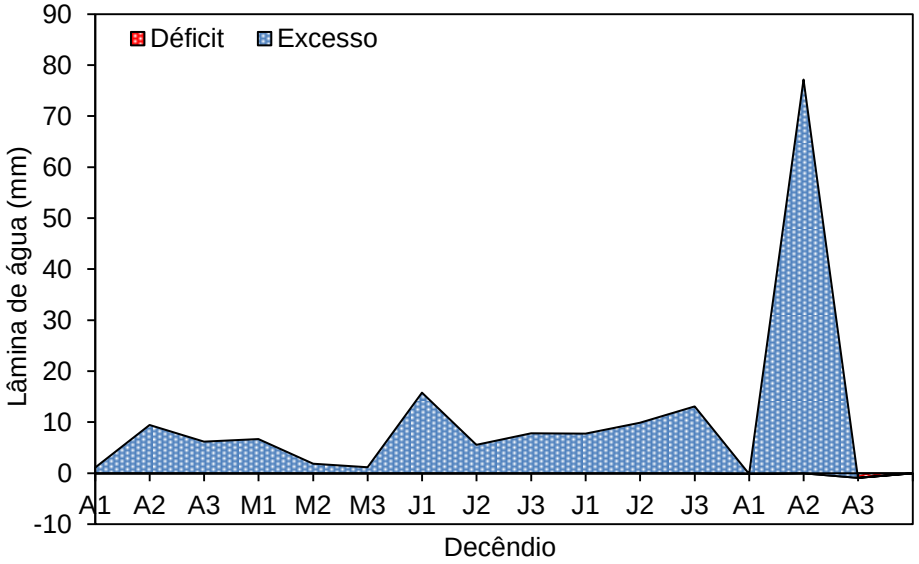

Figura 10. Balanço hídrico sequencial pelo método de Thornthwaite & Matter (1955) ao longo dos decêndios do período experimental na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

5.2. IAF e biomassa seca

Após o estabelecimento da cultura foi realizada uma contagem do número de plantas por metro. O valor da área de solo ocupada por uma planta de cada tratamento que foi utilizado no cálculo de IAF foi aproximadamente de: T1 (0,45 m x 6,5 pl m^{-2}) = 0,16 m²; T2 (0,45 m x 8,5 pl m^{-2}) = 0,12; T3 (0,90 m x 6,5 pl m^{-2}) = 0,17; T4 (0,90 m x 8,5 pl m^{-2}) = 0,16 m². Em decorrência do maior número de plantas na parcela, os tratamentos mais adensados (T2 e T4) apresentaram menor área de solo. Com o aumento do espaçamento, independente da densidade de semeadura, há um aumento da área por planta (Figura 11). O valor da área de solo influencia diretamente no índice de área foliar calculado.

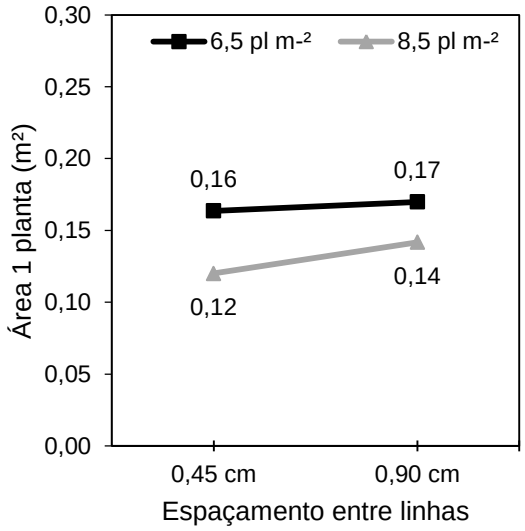

Figura 11. Área de solo ocupada por plantas de milho sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

O modelo de melhor ajuste e sentido prático dos dados de IAF utilizado pelo software TableCurve 2D foi a equação: $IAF = e^{a+bc+{}^{c}/_{x^2}}$, em que a, b e c são parâmetros da equação estimados pelo software para cada tratamento e x é o dia após a emergência da cultura. Para todos os tratamentos este modelo apresentou uma pequena subestimação, porém uma boa correlação com os dados reais amostrados (R^2>0,92), justificando assim o seu uso para estimativa dos dados de IAF em todos os dias do ciclo da cultura (Figura 12).

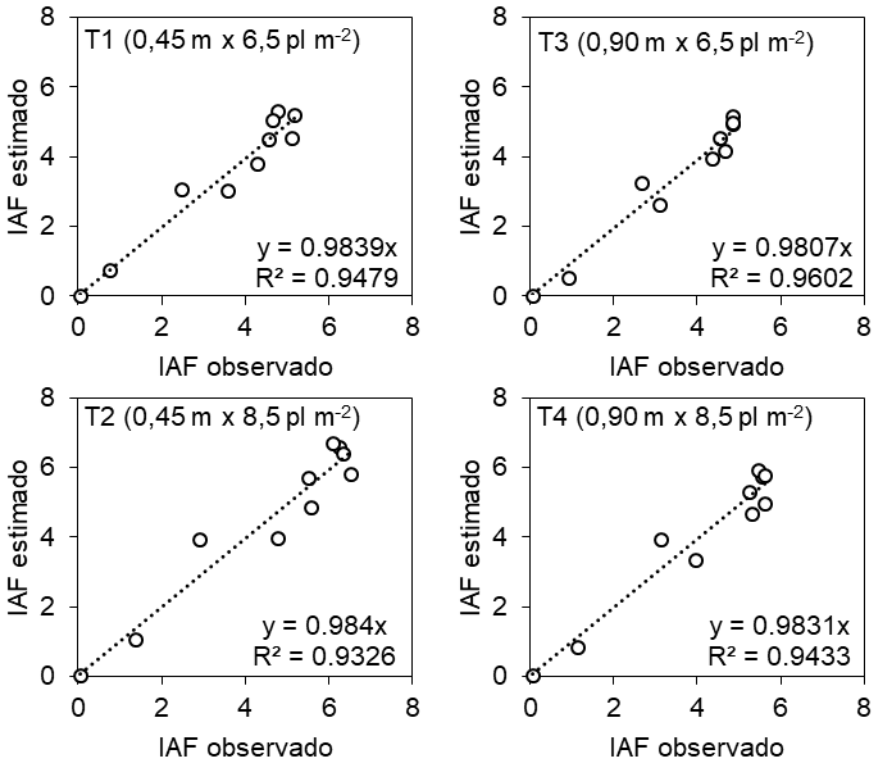

Figura 12. Correlação entre os dados do índice de área foliar das plantas de milho observados em campo e os valores estimados por modelos obtidos em experimento com diferentes arranjos espaciais durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Os pontos da Figura 13 representam as médias observadas do índice de área foliar de cada tratamento durante o desenvolvimento da cultura, enquanto que as linhas são os valores ajustados pelo modelo de estimativa criado com o TableCurve 2D.

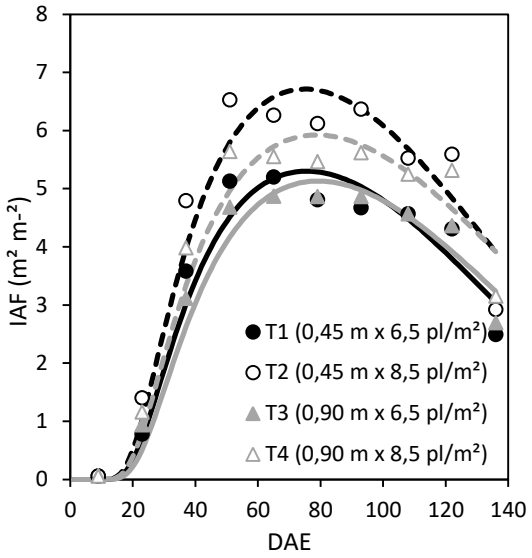

Figura 13. Índice de área foliar (IAF) das plantas de milho sob diferentes arranjos espaciais em função dos dias após a emergência da cultura (DAE) na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. Os pontos representam os valores observados e as linhas representam os valores ajustados pelo modelo.

O IAF de todos os tratamentos seguiu o padrão característico de culturas anuais, ou seja, mostrou-se crescente à medida que as plantas se desenvolviam e emitiam novas folhas até atingir o ponto de máxima e decrescer em função da senescência das folhas. Outros autores como Borrás et al, (2003), Kunz et al. (2007) e Silva et al. (2008) também observaram o mesmo comportamento.

Os valores de IAF médio e máximo observados e os ajustados de cada tratamento foram muito semelhantes (Tabela 4). O IAF máximo ocorreu por volta dos 65 dias após a emergência da cultura, resultado semelhante aos encontrados por Ferreira Junior et al. (2014) e Tohidi et al. (2012). Kunz et al. (2007) no Estado do Rio Grande do Sul, utilizando uma população de 7,0 pl m^{-2} do híbrido precoce Pioneer 32R21 na safra de 2004 observaram um valor de IAF máximo de 5,2 para o espaçamento de 0,80 m e de 4,9 em espaçamento de 0,40 m, relatando que em altas densidades houve uma maior senescência das folhas em espaçamentos reduzidos. Detomini et al. (2008) encontraram para o híbrido semiprecoce DKB 390 com espaçamento de 0,90 m e 6,6 pl m^{-2} na região de Piracicaba, SP, um valor de IAF máximo de 5,7.

Tabela 4. Índice de área foliar médio e máximo observados e ajustados por modelo da cultura do milho sob diferentes arranjos espaciais durante a segunda safra de 2019 na região de Piracicaba, SP, Brasil.

IAF				
Tratamento	Valores observados		Valores ajustados	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo
T1 (0,45 m x 6,5 pl m^{-2})	3,50	5,30	3,51	5,29
T2 (0,45 m x 8,5 pl m^{-2})	4,48	6,71	4,49	6,70
T3 (0,90 m x 6,5 pl m^{-2})	3,39	5,13	3,40	5,13
T4 (0,90 m x 8,5 pl m^{-2})	4,01	5,92	4,04	5,92

Os maiores valores de IAF foram alcançados pelos tratamentos com menor área de solo por planta e maiores densidades de semeadura (T2 e T4). Independente da densidade de semeadura, a redução do espaçamento promoveu um acréscimo de IAF, principalmente devido a menor área de solo.

Os tratamentos com mesma densidade de semeadura apresentaram desempenho parecidos, ou seja, os tratamentos 1 e 3 com 6,5 pl m^{-2} obtiveram valores de IAF mais próximos, assim como os tratamentos 2 e 4 com 8,5 pl m^{-2}. O valor do índice de área foliar pode influenciar na produção de biomassa e produtividade, pois as plantas permanecem por mais tempo com folhas verdes que aproveitam a energia solar no processo fotossintético, como também observado nos estudos de Ferreira Junior et al. (2014).

A biomassa seca acumulada de cada tratamento particionada por órgão da planta encontra-se na Figura 14.

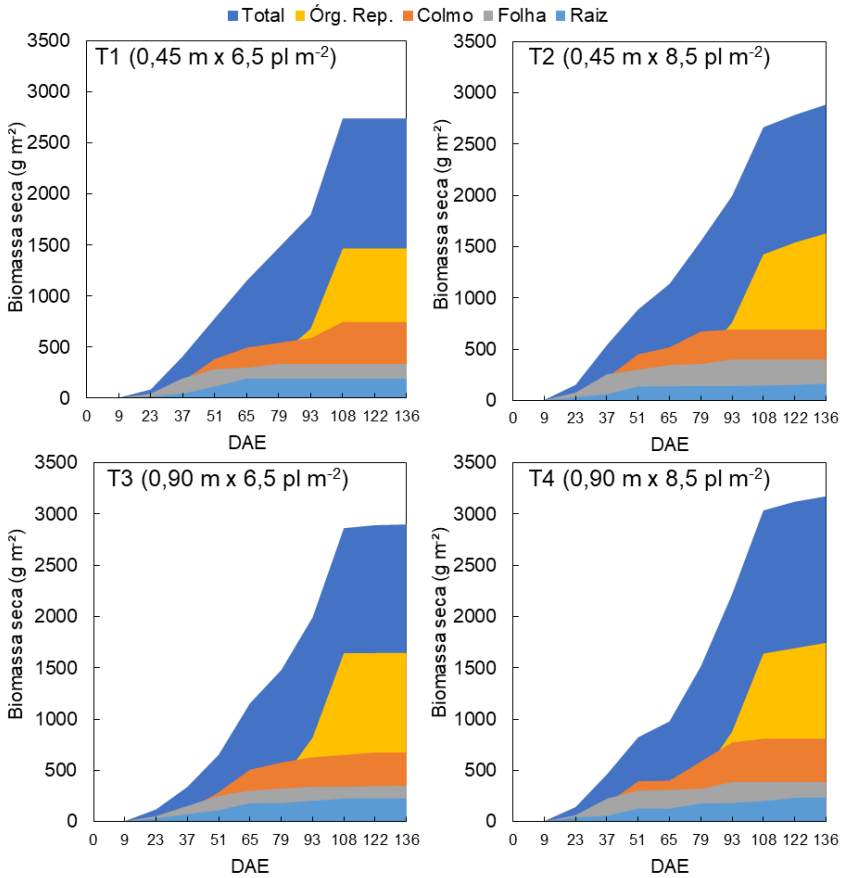

Figura 14. Partição da biomassa seca das plantas de milho em função do desenvolvimento relativo da cultura sob diferentes arranjos espaciais na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Todos os tratamentos obtiveram o comportamento sigmoidal de crescimento, em que apresentam um crescimento inicial lento que aumenta gradativamente até atingir uma estabilização, como também observado por Guiscem et al. (2002).

O ganho de massa de cada órgão da planta durante todo o período experimental pode ser verificado na Figura 15.

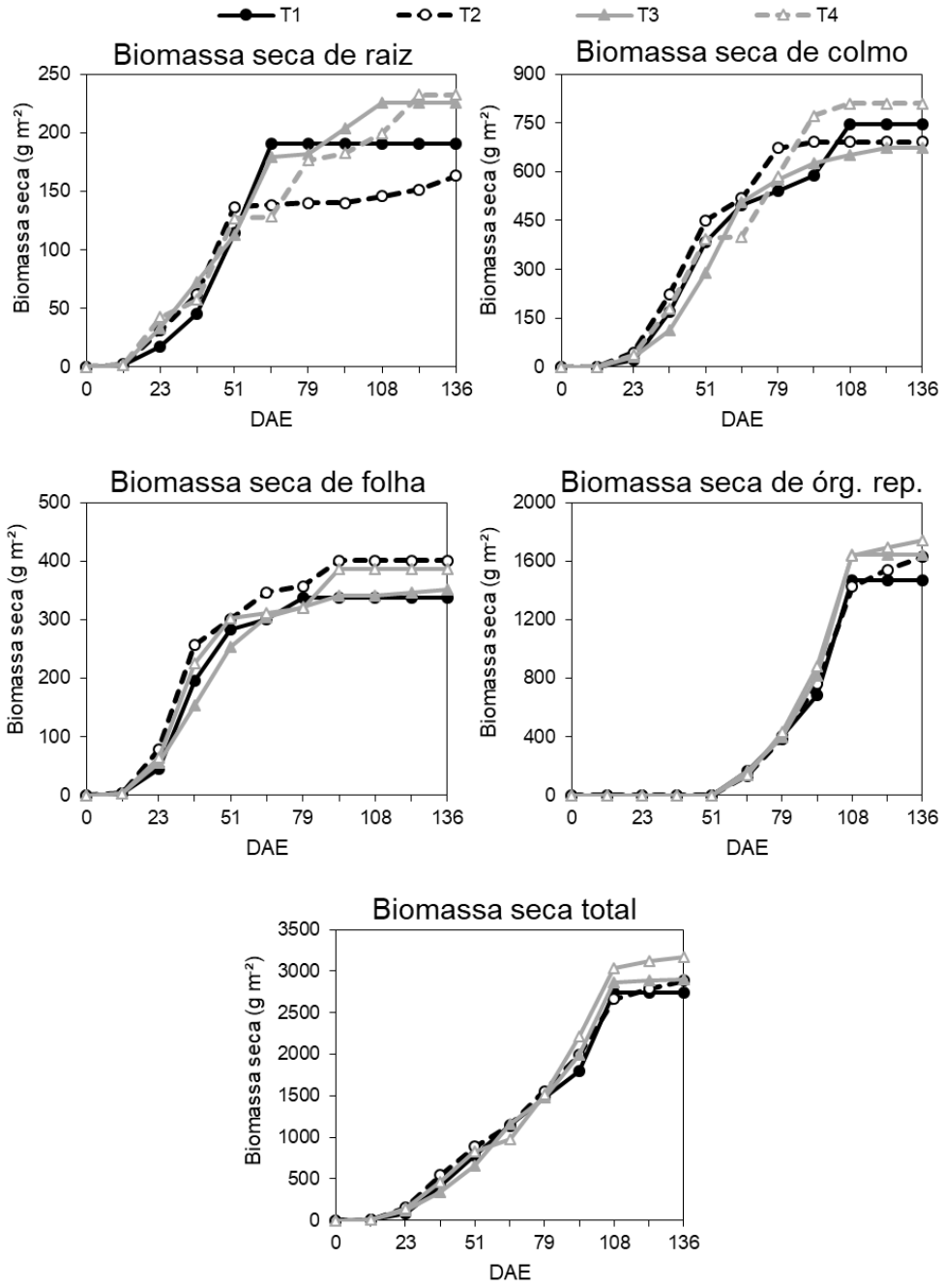

Figura 15. Biomassa seca por órgão da planta de milho em função do desenvolvimento relativo da cultura sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

A Tabela 5 apresenta os pesos médios de biomassa seca de cada órgão da planta na última coleta de amostras.

Tabela 5. Biomassa seca média final das plantas de milho em função do órgão da planta e do arranjo espacial obtidos em experimento realizado na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Tratamento	Biomassa seca (g m^{-2}) e porcentagem relativa ao total (%)								
	Raiz		Colmo		Folha		Órg. rep.		Total
T1 (0,45 m x 6,5 pl m^{-2})	191	(7,0)	747	(27,3)	336	(12,3)	1466	(53,5)	2740
T2 (0,45 m x 8,5 pl m^{-2})	163	(5,7)	692	(24,0)	401	(13,9)	1629	(56,5)	2885
T3 (0,90 m x 6,5 pl m^{-2})	225	(7,8)	674	(23,3)	352	(12,1)	1647	(56,8)	2898
T4 (0,90 m x 8,5 pl m^{-2})	232	(7,3)	809	(25,5)	387	(12,2)	1743	(55,0)	3172

Analisando cada órgão separadamente é possível verificar como o espaçamento e a densidade de semeadura influenciaram no acúmulo de biomassa da planta (Figura 16).

Para as raízes, o aumento no espaçamento entre linhas promoveu uma maior produção de raiz, independente da densidade de semeadura (Figura 16A).

Na produção de colmo, na menor densidade de semeadura o aumento do espaçamento entre linhas proporcionou uma redução de biomassa de colmo, enquanto que na maior densidade o efeito foi o contrário (Figura 16B).

Independente do espaçamento utilizado, um aumento da densidade de semeadura ocasiona um aumento da biomassa de folhas. Na maior densidade, o aumento do espaçamento entre linhas promoveu queda na produção de folhas, enquanto que na menor densidade o aumento do espaçamento proporcionou um ganho de biomassa seca de folhas (Figura 16C).

Na produção de órgãos reprodutores (pendão e espiga), o aumento do espaçamento e da densidade de semeadura incrementaram o peso da biomassa seca destes órgãos (Figura 16D).

Por fim, a produção total de biomassa da planta seguiu o mesmo comportamento que a produção dos órgãos reprodutores, uma vez que estes representaram mais da metade do peso final total da planta (>53%). De forma geral, o aumento do espaçamento e da densidade de semeadura proporcionaram um ganho de biomassa (Figura 16E). O maior número de plantas por área promove o maior acúmulo de biomassa seca e não necessariamente está relacionado com a produção de fotoassimilados oriundos da interceptação de radiação solar, como observado por Petter et al. (2016) na cultura da soja.

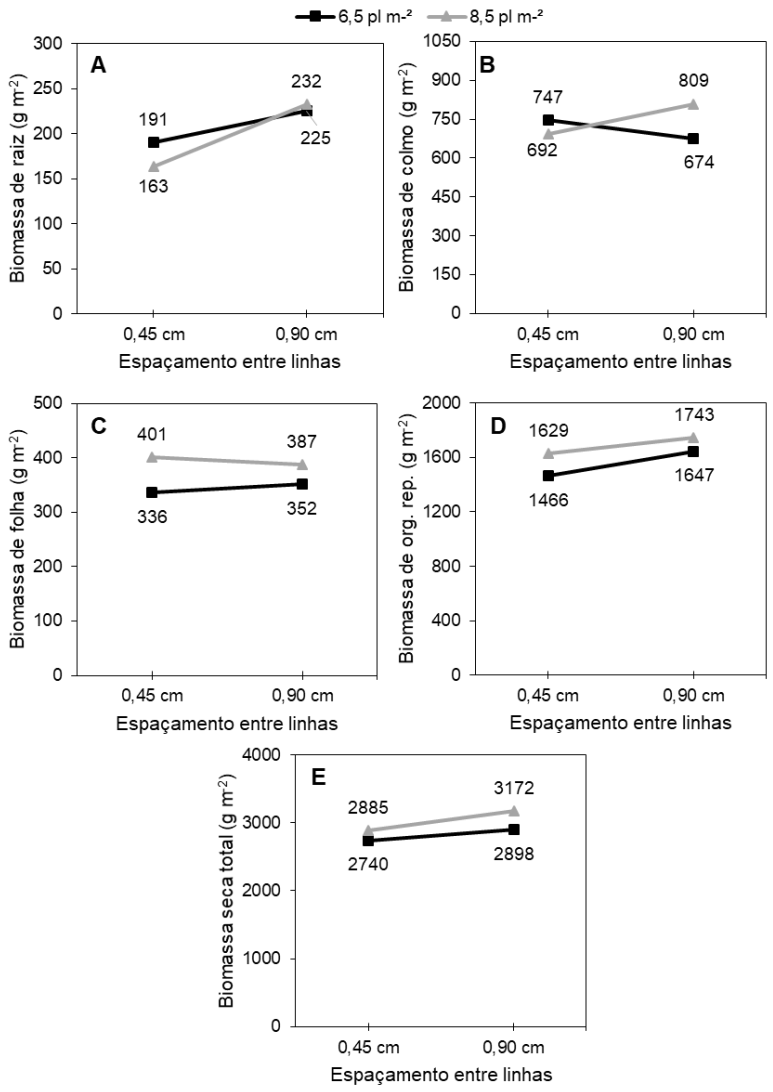

Figura 16. Biomassa seca de órgãos de plantas de milho sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. A: Raiz; B: Colmo; C: Folha; D: Órgãos reprodutores; E: Total.

5.3. Coeficiente de extinção de luz

A correlação entre a RFA refletida e a RFA total (em µmol m^{-2} $15min^{-1}$) foi feita para cada tratamento a fim de gerar um modelo de ajuste dos dados faltantes de RFAr ao longo do ciclo da cultura.

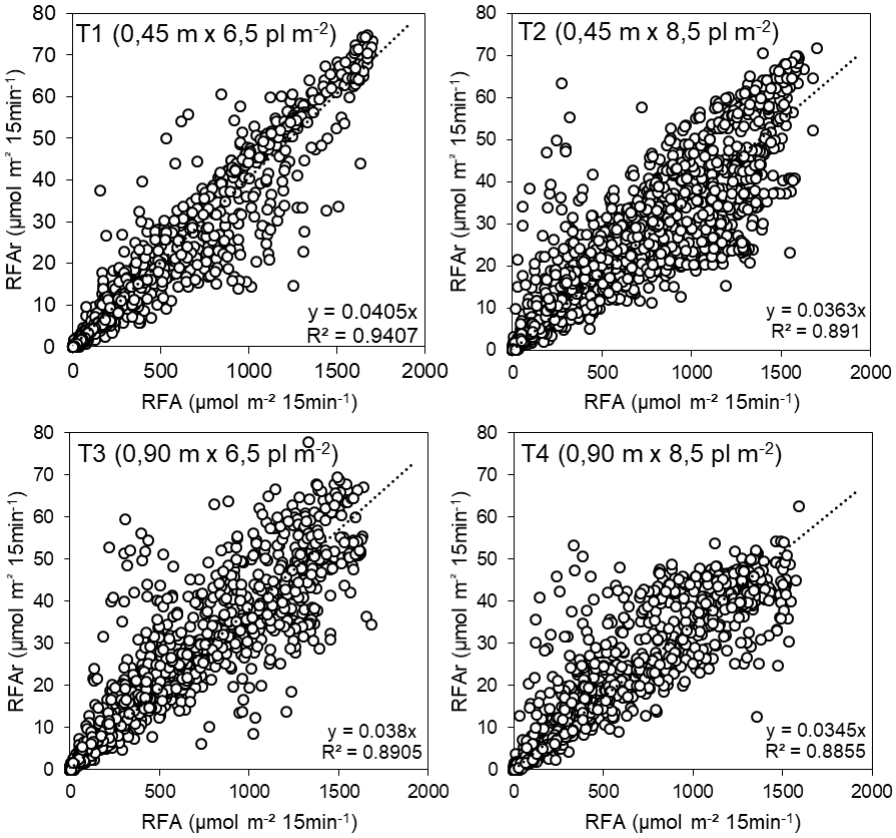

Figura 17. Correlação entre radiação fotossinteticamente ativa refletida (RFAr) e radiação fotossinteticamente ativa (RFA) em plantas de milho submetidas a diferentes espaçamentos e densidades na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

A RFAr é muito dependente da RFA que chega da atmosfera, dado a alta correlação existente entre as duas. Os modelos apresentaram um alto coeficiente de determinação R^2 e foram aplicados para estimar os dados de RFAr em todos os dias do ciclo da cultura.

Com a equação 4, calculou-se a eficiência de interceptação luminosa (εint) para os dias em que haviam leituras de RFAt para cada tratamento. Em seguida, aplicou-se a fórmula $\ln(1 - \varepsilon int)$ e correlacionou-se com o IAF estimado (Figura 18).

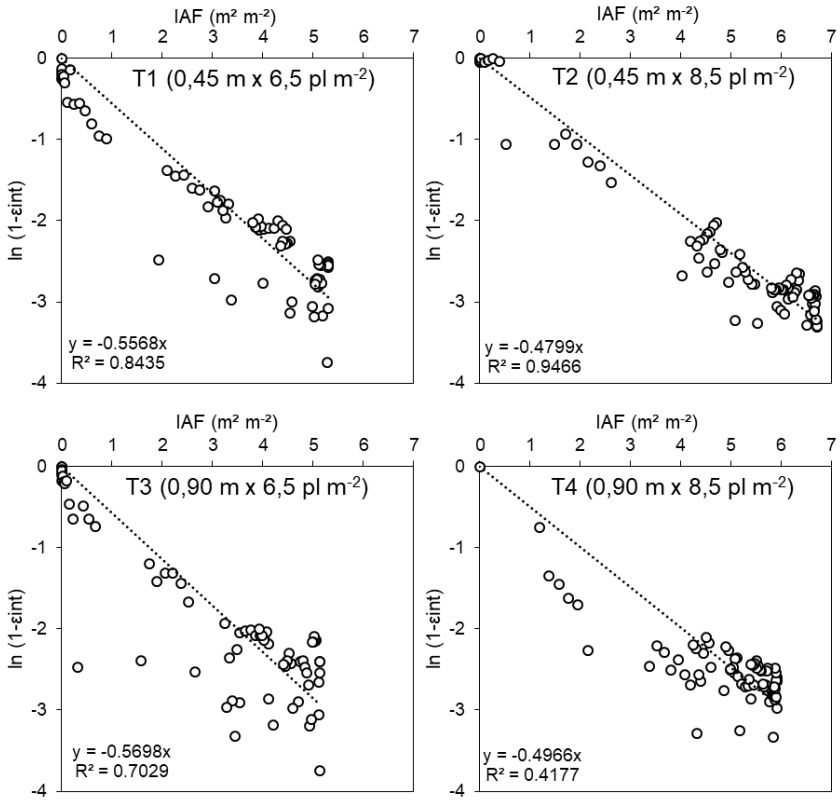

Figura 18. Correlação entre o índice de área foliar estimado (IAF) e a função semi-lorarítmica da eficiência de interceptação luminosa (εint) de um híbrido de milho sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

De acordo com a teoria de Monsi & Saeki (1953), o coeficiente de extinção de luz pôde ser determinado pelo coeficiente angular da reta da correlação entre $\ln(1-\varepsilon\mathrm{int})$ e o IAF. Sendo assim, considerando uma média de todo o ciclo da cultura, o k de cada tratamento quantificado foi de 0,5568 para o tratamento 1 (0,45 m x 6,5 pl m^{-2}), 0,4599 para o tratamento 2 (0,45 m x 8,5 pl m^{-2}), 0,5698 para o tratamento 3 (0,90 m x 6,5 pl m^{-2}) e de 0,4966 para o tratamento 4 (0,90 m x 8,5 pl m^{-2}).

Os valores encontrados neste trabalho estão dentro da faixa encontrada por outros autores. Ferreira Junior et al., (2014) adotaram um valor de k de 0,628 para o híbrido BR 106 à 0,80 m de espaçamento e 6,25 pl m^{-2} no estado de Alagoas. Maddoni & Otegui (1996) determinaram um valor de k variando de 0,46 a 0,64 em espaçamento de 0,70 m e população de 7,0 pl m^{-2} em função de diferentes híbridos. Tohidi et al. (2012) encontraram valores de k variando de 0,52 a 0,69 para diferentes híbridos semeando 8,0 plantas m^{-2} em espaçamento de 0,75 m. O programa de modelagem APSIM 5.2 utiliza o valor fixo de k para a cultura do milho de 0,45

(HOLZWORTH, 2014). Silva et al. (2008) sob espaçamento de 0,70 m e uma população de aproximadamente 5,7 pl m^{-2} utilizaram um k de 0,65. Detomini et al. (2008) recomendaram para o híbrido DKB 390 espaçado a 0,90 m e população de 6,6 pl m^{-2} o valor de k de 0,43. A variação entre os autores pode ser dada devido aos espaçamentos e populações utilizadas, região de cultivo, híbrido adotado, condições hídricas, nutricionais e sanitárias, além da metodologia de coleta dos dados de radiação solar.

Uma análise de variância à 5% significância foi realizada a fim de verificar a existência de diferenças estatísticas entre os tratamentos e, quando significativa, foi aplicado o teste de Tukey para identificá-las.

Tabela 6. Análise de variância e teste de Tukey à 5% de significância do coeficiente de extinção de luz (k) considerando todo o ciclo da cultura do milho sob diferentes arranjos espaciais cultivado na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Causas de Variação	Graus de Liberdade	*p* > F
Espaçamento entre linhas	1	0,1090
Densidade de semeadura	1	**0,0008***
Espaçamento x Densidade	1	0,5745
CV (%)	6,02	
Densidade de semeadura (pl m^{-2})	Média	
8,5	0,484 b	
6,5	0,546 a	
DMS	0,0302	

***** significante à 5% de probabilidade; CV (%) = Coeficiente de variação; DMS = Diferença mínima significativa. Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Apenas o fator densidade de semeadura apresentou diferença estatística significativa. Analisando este fator pelo teste de Tukey, identifica-se que os tratamentos com menor densidade de semeadura (T1 e T3) apresentaram um valor de k mais elevado e diferiram significativamente dos tratamentos mais adensados (T2 e T4).

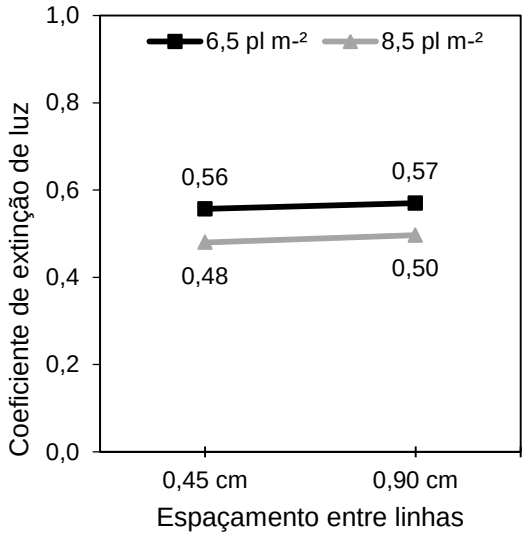

Figura 19. Coeficiente de extinção de luz de plantas de milho sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Quanto mais próximo a 1,0 for o coeficiente k, mais horizontais estão dispostas as folhas e mais uniforme é a distribuição da radiação no dossel (NOBEL et al., 1993; YUNUSA et al., 1993). A menor densidade de semeadura permitiu aos tratamentos T1 e T3 mais espaço para suas folhas crescerem, e consequentemente um maior k, indicando uma distribuição de luz mais homogênea no dossel. Nos tratamentos adensados T2 e T4 as folhas estavam mais apertadas e obtiveram um coeficiente k significativamente menor, indicando uma baixa incidência de luz na parte inferior do dossel, sendo o mesmo observado por Petter et al. (2016) na cultura da soja. Maddonni et al., (2001) relataram que em altas densidades de semeadura de diferentes híbridos de milho o ângulo vertical das folhas é maior, sendo assim mais eretas e obtendo menores valores de k.

O coeficiente de extinção de luz é um parâmetro importante para a avaliação da qualidade da luz no dossel. Em espaçamento menores, a disposição mais equidistante entre as plantas favorece a absorção de luz na faixa do vermelho e reflexão da faixa do vermelho extremo. Em espaçamentos maiores, as plantas recebem mais a faixa do vermelho extremo, o que pode modificar o desenvolvimento da planta, provocando maior elongação do colmo, folhas mais compridas e finas e até perda de raízes (KASPERBAUER; KARLEN, 1994).

Após a determinação do k, realizou-se o mesmo procedimento de cálculo, porém dividindo o ciclo da cultura por fases de desenvolvimento seguindo a escala

fenológica, em que: Fase 1 = entre V2 e V10; Fase 2 = entre V10 e R3; Fase 3 = entre R3 e R6 e também foi calculada a média aritimética das três fases (Tabela 7). Ferreira Junior et al. (2014) realizaram a divisão do ciclo do milho em quatro fases, porém utilizou apenas um valor de k para todas estas, enquanto Petter et al. (2016) dividiram o ciclo da cultura da soja em fase pré e pós florescimento e verificaram o aumento do k após o florescimento da cultura.

Uma análise de variância à 5% significância foi realizada em cada fase a fim de verificar a existência de diferenças estatísticas entre os tratamentos e, quando significativa, foi aplicado o teste de Tukey para identificá-las.

Tabela 7. Médias do coeficiente de extinção de luz por fases de desenvolvimento da cultura do milho, sob diferentes arranjos espaciais na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Tratamento	Coeficiente de extinção de luz (k)				
	Média ciclo	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Média das fases
T1 (0,45 m x 6,5 pl m^{-2})	0,56 a	0,57 a	0,54 a	0,57 a	0,56
T2 (0,45 m x 8,5 pl m^{-2})	0,48 b	0,57 a	0,46 b	0,48 b	0,51
T3 (0,90 m x 6,5 pl m^{-2})	0,57 a	0,61 a	0,53 a	0,61 a	0,58
T4 (0,90 m x 8,5 pl m^{-2})	0,50 b	0,69 a	0,47 b	0,49 b	0,55

Fase 1 = cultura entre V2 a V10; Fase 2 = cultura entre V10 e R3; Fase 3 = cultura entre R3 e R6; Média das fases = média aritimética das fases 1, 2 e 3; Média ciclo = média única para todo o ciclo de cultivo. Médias seguidas de letras diferentes na mesma coluna diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Durante a fase 1 (V2 a V10), não houve diferença estatística entre os tratamentos pelo teste realizado. Na fase 2 (V10 a R3), o aumento da densidade de semeadura reduziu significativamente o valor de k, assim como ocorreu para o valor de k médio do ciclo todo. Por fim, na fase 3 (R3 a R6), assim como ocorreu na fase 2, a redução da densidade de semeadura provocou um acréscimo significativo do valor de k.

Meinke (1996) verificou que os valores de k na cultura do trigo são maiores na fase inicial de cultivo, tendendo a ficarem constantes após este período. Porém, em condições de suprimento adequado das necessidades da planta, é possível adotar um valor médio de k para todo o ciclo, uma vez que a área foliar das fases mais avançadas do cultivo compensam a produção de biomassa e o rendimento final de grãos. Lindquist et al. (2005) calcularam para a cultura do milho à uma população de 8,9 pl m^{-2} em Nebraska, EUA, um k médio de 0,49 entre as fases de emergência e a antese e o valor de 0,67 durante a fase de enchimento de grãos.

A variação temporal do coeficiente k também pode ser explicada com a variação do ângulo zenital, sendo que quanto maior for o ângulo zenital, menor será o valor do coeficiente de extinção de luz (WANG et al., 2004) (Figura 20).

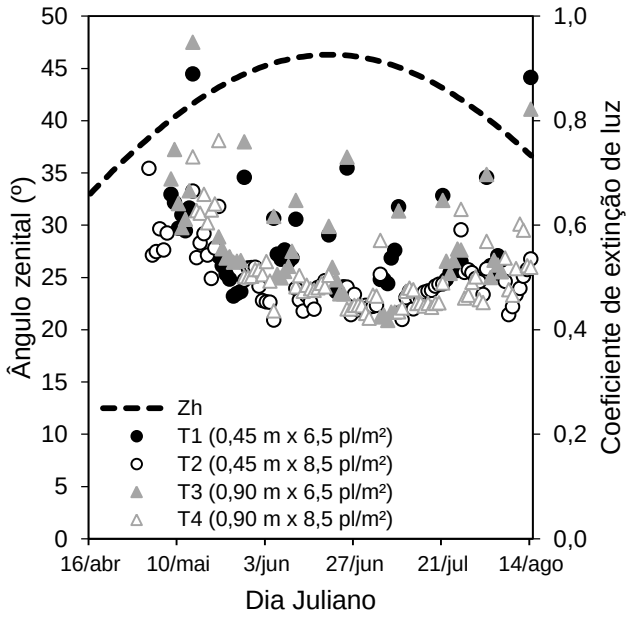

Figura 20. Variação sazonal do coeficiente de extinção de luz da cultura do milho sob diferentes arranjos espaciais em relação ao ângulo zenital em Piracicaba, SP, Brasil, durante a segunda safra de 2019.

Os valores das médias de k das fases 1, 2 e 3 foram numericamente próximos aos do k que considerou o ciclo inteiro da cultura, desta forma, assim como mencionado por outros autores, podemos adotar o valor de k do ciclo inteiro (DETOMINI et al., 2008; LINDQUIST et al., 2005), ou então fragmentá-lo em suas fases caso seja necessário na aplicação de modelos de simulação de crescimento e absorção de luz.

De forma geral, os tratamentos com mesma densidade de semeadura obtiveram resultados similares quanto ao valor de k ao longo do ciclo da cultura, sendo que os tratamentos menos adensados (T1 e T3) possuíram um valor de k significativamente maior.

A correlação entre IAF e a eficiência de interceptação gera uma linha que representa o coeficiente de extinção de luz (Figura 21).

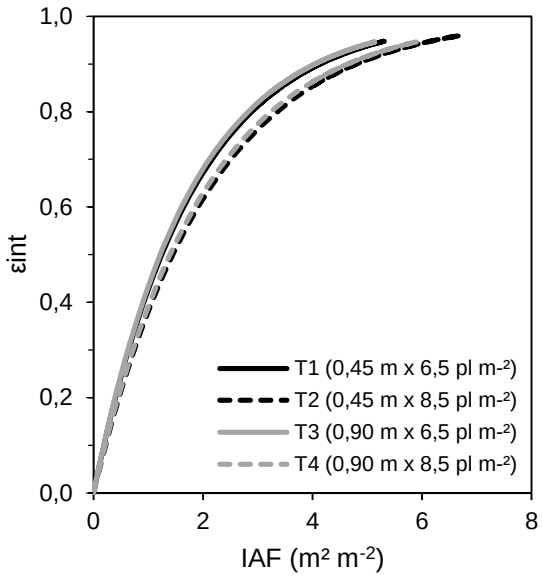

Figura 21. Correlação entre o índice de área foliar (IAF) e a eficiência de interceptação luminosa (εint) de um híbrido de milho sob diferentes arranjos espaciais na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Quanto maior for o valor de k (como nos tratamentos 1 e 3), mais rápido a cultura atingirá a máxima eficiência de interceptação e em menor IAF. O aumento da eficiência de interceptação luminosa acompanha o aumento do IAF até estabilizar num limite máximo, como também observado na cultura do milho por Kunz et al. (2007), Lindquist et al. (2005) e Bergamaschi et al. (2004). Neste caso, a cultura atingiu o platô de interceptação luminosa entre os valores 3 e 4 de IAF. Dessa forma, os tratamentos mais adensados (T2 e T4) que atingiram maiores valores de IAF são menos eficientes, pois gastam energia na produção de folhas quando já se atingiu o limite de interceptação solar.

Embora os tratamentos mais adensados precisaram alcançar maiores valores de IAF para a aumentarem sua eficiência de interceptação, estes obtiveram maiores valores de eficiência de interceptação máxima. Independente da densidade de semeadura, a redução do espaçamento para 0,45 m aumentou a eficiência de interceptação luminosa pela cultura (Figura 22). Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Kunz et al. (2007) que avaliaram dois espaçamentos para a cultura do milho e atribuíram este efeito à distribuição mais equidistante entre as plantas, que por sua vez possibilita a ocupação mais rápida do espaço entre linhas. Johnson et al. (1998) relataram que menores espaçamentos proporcionam uma arquitetura foliar que permite maior interceptação luminosa e tendem a reduzir a competição por água e nutrientes.

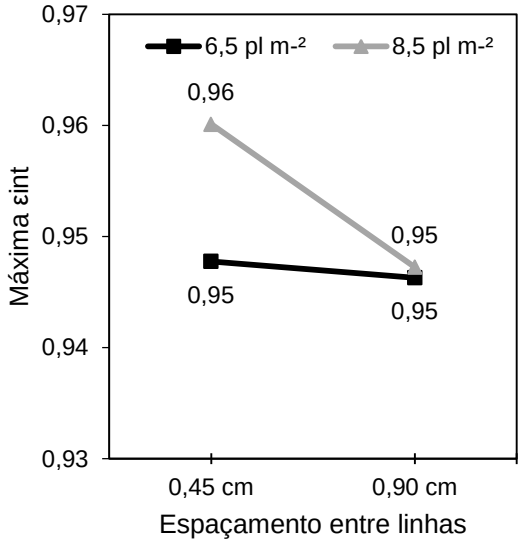

Figura 22. Máxima eficiência de interceptação luminosa (εint) de plantas de milho sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Após a definição do valor do coeficiente de extinção de luz para cada tratamento, calculou-se a RFAa pela equação 6 e a RFAt pela equação 7 para todos os dias do ciclo da cultura (Figura 23).

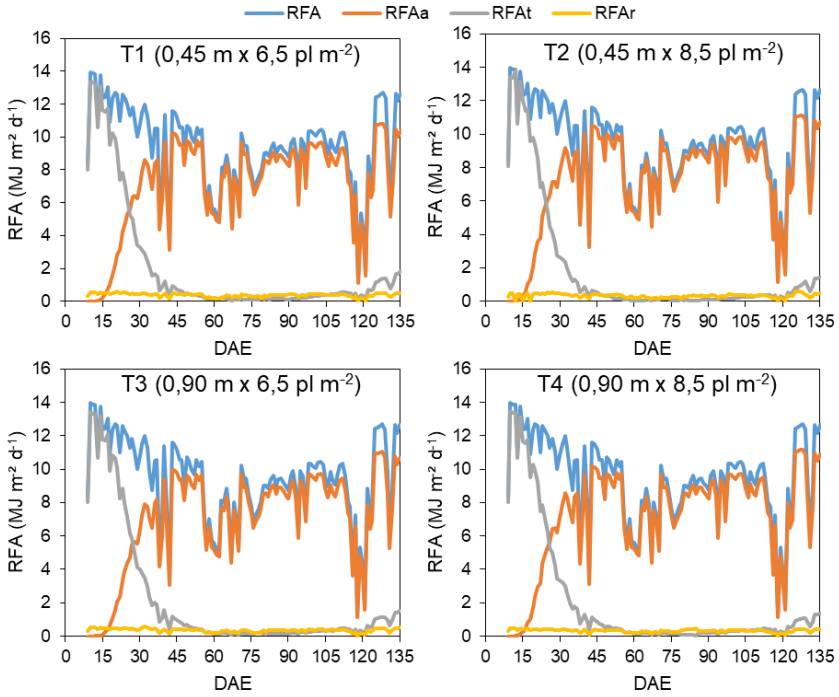

Figura 23. Radiação fotossinteticamente ativa (RFA), radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAa), radiação fotossinteticamente ativa transmitida (RFAt) e radiação fotossinteticamente ativa refletida (RFAr) em função do dia após a

emergência da cultura do milho, sob diferentes arranjos espaciais na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Visualmente não é possível distinguir grandes diferenças entre os tratamentos e em termos relativos, a RFA de todos os tratamentos também foram similares e seguiram o mesmo padrão da Figura 24. A RFA total foi a mesma para todos os tratamentos. A RFAr sofreu poucas variações ao longo do ciclo da cultura, indo de aproximadamente 2 a 5% do total. No início do ciclo, quase toda a RFA era transmitida, mas com o desenvolvimento da cultura a RFAt diminuiu em função do aumento do IAF e voltou a crescer no final do ciclo devido a queda das folhas basais. A RFAa tem o resultado oposto ao da RFAt, ou seja, no início do ciclo pouca radiação solar era absorvida devido ao tamanho e quantidade de folhas, porém com o aumento do IAF, as plantas passaram a absorver a maior parte da radiação solar.

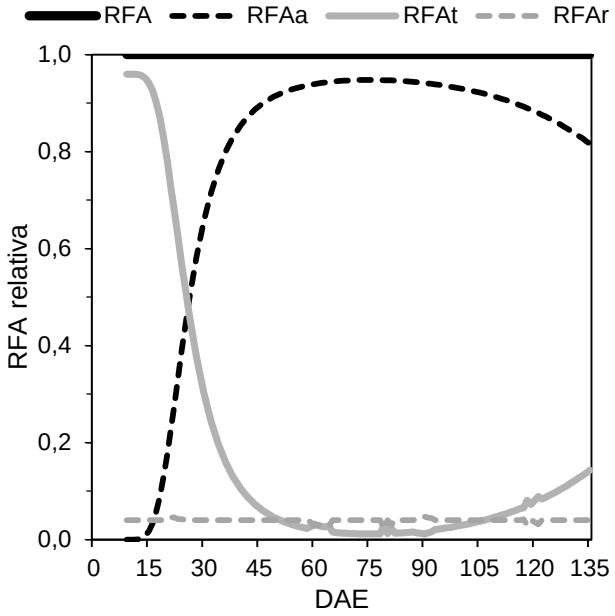

Figura 24. Radiação fotossinteticamente ativa relativa particionada em radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAa), radiação fotossinteticamente ativa transmitida (RFAt) e radiação fotossinteticamente ativa refletida (RFAr) em função do dia após a emergência da cultura do milho durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Foi calculado o acúmulo de RFAa, RFAt e RFAr de cada tratamento a fim de verificar possíveis diferenças (Tabela 8).

Tabela 8. Radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAa), radiação fotossinteticamente ativa transmitida (RFAt) e radiação fotossinteticamente ativa refletida (RFAr) acumuladas e em porcentagem relativa na cultura do milho, sob diferentes arranjos espaciais durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Tratamento	RFA acumulada (MJ m^{-2}) e porcentagem relativa ao total (%)						
	RFAa		RFAt		RFAr		Total
T1 (0,45 m x 6,5 pl m^{-2})	894	(74,9)	252	(21,1)	48	(4,0)	1194
T2 (0,45 m x 8,5 pl m^{-2})	923	(77,3)	229	(19,2)	42	(3,5)	1194
T3 (0,90 m x 6,5 pl m^{-2})	881	(73,7)	268	(22,4)	46	(3,8)	1194
T4 (0,90 m x 8,5 pl m^{-2})	901	(75,4)	252	(21,1)	42	(3,5)	1194

Numericamente, os tratamentos com densidade de semeadura de 8,5 pl m^{-2} (T2 e T4) acumularam mais radiação absorvida em relação aos menos adensados (T1 e T3). Independente da densidade de semeadura, o aumento do espaço entre linhas diminuiu a RFAa acumulada. O adensamento provocou um maior índice de área foliar aos tratamentos 2 e 4 que, por sua vez, proporcionou maior absorção de radiação solar por metro quadrado.

Para a RFAt, os tratamentos menos adensados (T1 e T3) acumularam mais RFAt e independente da densidade de semeadura, o maior espaçamento proporcionou a maior transmitância de radiação solar. A menor densidade de semeadura e maior espaçamento dispõem as plantas de forma mais espaçada e tenham um índice de área foliar menor e, dessa forma, uma maior quantidade de radiação solar não é interceptada e atinge o solo.

Por fim, os tratamentos com densidade de semeadura de 6,5 pl m^{-2} refletiram mais radiação. A RFAr está em função do albedo das plantas e do solo e quanto maior o albedo da superfície, mais esta reflete. De forma geral, o albedo de culturas é maior do que o do solo, ou seja, as plantas possuem maior capacidade de reflexão que o solo cultivado (REICHARDT; TIMM, 2019). Dessa forma, os tratamentos menos adensados e com espaçamento mais equidistante das plantas (T1 e T3) cobrem a área de solo mais rapidamente e assim uma maior quantidade da RFA é refletida pelas folhas. Independente da densidade de semeadura, o aumento do espaçamento provocou redução do RFAr, pois aumentou a área de solo exposto principalmente nas fases iniciais de desenvolvimento vegetativo.

5.4. Eficiência do uso da radiação

Com os valores de biomassa seca total ao longo do ciclo e a RFAa acumulada, fez-se uma correlação, em que o coeficiente angular da reta é definido com a eficiência de uso da radiação (EUR) (MONTEITH, 1994) (Figura 25).

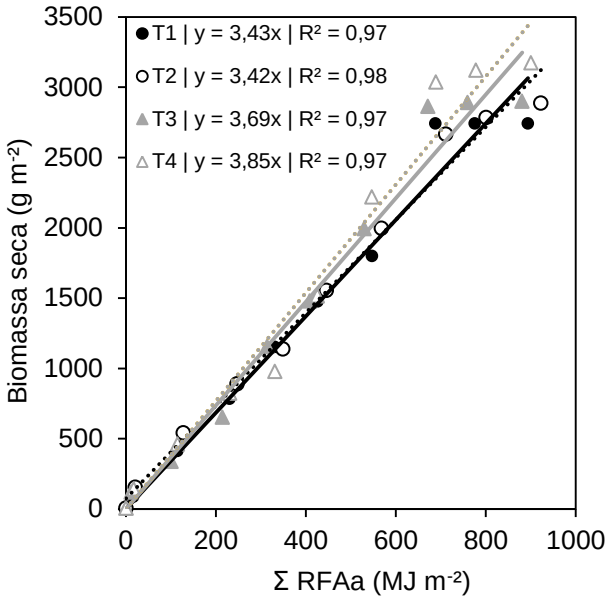

Figura 25. Correlação entre biomassa seca e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumula (Σ RFAa) na cultura do milho sob diferentes espaçamentos e densidade de semeadura durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. T1 = 0,45 m x 6,5 pl m^{-2}; T2 = 0,45 m x 8,5 pl m^{-2}; T3 = 0,90 m x 6,5 pl m^{-2}; T4 = 0,90 m x 8,5 pl m^{-2}.

A eficiência do uso da radiação foi de 3,43 g MJ^{-1} para o tratamento 1 (0,45 m x 6,5 pl m^{-2}), 3,42 g MJ^{-1} para o tratamento 2 (0,45 m x 8,5 pl m^{-2}), 3,69 g MJ^{-1} para o tratamento 3 (0,90 m x 6,5 pl m^{-2}) e 3,85 g MJ^{-1} para o tratamento 4 (0,90 m x 8,5 pl m^{-2}). Estes resultados estão dentro da faixa encontrada por outros autores, sendo que as divergências ocorrem devido à características específicas de cada estudo, como híbrido, espaçamento, densidade de semeadura e manejo utilizado. Kunz et al. (2007) sob população de 7,0 pl m^{-2} encontraram valores de 4,0 g MJ^{-1} em espaçamento de 0,80 m e 3,2 g MJ^{-1} em espaçamento de 0,40 m. Ferreira Junior et al. (2014) cultivaram milho com espaçamento de 0,80 m e população de 6,25 pl m^{-2} e encontraram o valor de 3,31 g MJ^{-1} em solo nu e 3,58 g MJ^{-1} em solo com palha. Kiriny et al. (1989) obtiveram o valor de 3,5 g MJ^{-1}, Cirilo & Andrade (1994) encontraram 3,3 g MJ^{-1} e Lindquist et al. (2005) o valor de 3,8 g MJ^{-1}. Silva et al.

(2008) sob espaçamento de 0,70 m e uma população de 5,7 pl m^{-2} encontraram o valor de 3,31 g MJ^{-1}.

Uma análise de variância à 5% significância foi realizada a fim de verificar a existência de diferenças estatísticas entre os tratamentos e, quando significativa, foi aplicado o teste de Tukey para identificá-las.

Tabela 9. Análise de variância e teste de Tukey à 5% de significância da eficiência de uso da radiação (EUR) da cultura do milho sob diferentes arranjos espaciais cultivado na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Causas de Variação	Graus de Liberdade	*p* > F
Espaçamento entre linhas	1	0,0131*
Densidade de semeadura	1	0,6091
Espaçamento x Densidade	1	0,8226
CV (%)	7,10	
Espaçamento entre linhas (m)	Média	
0,45	3,445 b	
0,90	3,779 a	
DMS	0,25	

***** significante à 5% de probabilidade; CV (%) = Coeficiente de variação; DMS = Diferença mínima significativa. Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Houve diferença significativa apenas para o fator espaçamento entre linhas. Identifica-se que independente da densidade de semeadura, o aumento do espaço entre linhas proporciona valores de EUR significativamente maiores, sendo mais eficientes em converter a energia solar absorvida em biomassa total de planta (Figura 26). O mesmo efeito foi observado por Kunz et al. (2007) em que maiores espaçamentos também obtiveram maiores valores de EUR. Nos tratamentos com menor espaçamento houve menor acúmulo de biomassa seca por área, justificando a menor eficiência do uso da radiação.

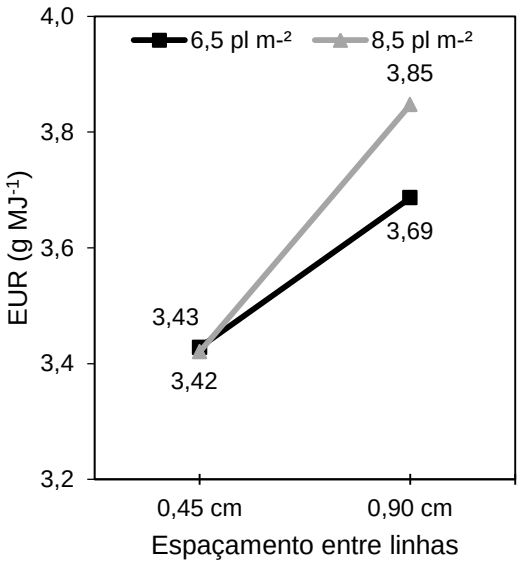

Figura 26. Eficiência do uso da radiação solar por plantas de milho sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

No entanto, o maior acúmulo de biomassa seca nos tratamentos mais adensados é ocasionado pelo maior número de plantas por área e não necessariamente pela maior eficiência de conversão. Dessa forma, o valor de EUR pode mascarar o efeito real de conversão de energia solar em fotoassimilados, ou seja, a maior EUR não implica em maior produtividade da cultura e sim maior biomassa seca de planta em função do maior número de plantas por área (PETTER et al., 2016). Além disto, a maior absorção de RFA nos tratamentos adensados não garante a melhor qualidade da luz, como observado por Kasperbauer & Karlen (1994), em que plantas com maiores IAF perdem qualidade da luz ao longo do dossel. Outro parâmetro que comprova este efeito são os menores valores do coeficiente de extinção luminosa observado nos tratamentos mais adensados, indicando a baixa incidência de luz na parte inferior do dossel.

A eficiência de uso da radiação foi calculada para três fases da cultura, sendo Fase 1 = cultura entre V2 e V10; Fase 2 = entre V10 e R3; Fase 3 = entre R3 e R6 e calculada a média aritimética das três fases (Tabela 10).

Tabela 10. Médias da eficiência do uso da radiação (EUR) por fases de desenvolvimento da cultura do milho, sob diferentes arranjos espaciais na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

Tratamento	Eficiência do uso da radiação (EUR)				
	Média ciclo	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Média das fases
T1 (0,45 m x 6,5 pl m^{-2})	3,43 b	3,43 b	3,37 b	3,42 b	3,41
T2 (0,45 m x 8,5 pl m^{-2})	3,42 b	3,75 a	3,47 b	3,41 b	3,54
T3 (0,90 m x 6,5 pl m^{-2})	3,69 a	3,12 b	3,65 a	3,71 a	3,49
T4 (0,90 m x 8,5 pl m^{-2})	3,85 a	3,67 a	3,69 a	3,92 a	3,76

Fase 1 = cultura entre V2 a V10; Fase 2 = cultura entre V10 e R3; Fase 3 = cultura entre R3 e R6; Média das fases = média aritimética das fases 1, 2 e 3; Média ciclo = média única para todo o ciclo de cultivo. Médias seguidas de letras diferentes na mesma coluna diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A primeira fase foi a única em que o comportamento diferiu das demais. Nesta, houve diferença estatística entre os adensamentos, sendo que independente do espaçamento, o aumento da densidade de semeadura aumentou a EUR.

Para as demais fases, não houve diferença significativa entre as densidades de semeadura e sim para o aumento do espaçamento, proporcionando um aumento da EUR.

A média das três fases seguiu o comportamento da média do ciclo inteiro, desta forma, assim como sugerido por Romano (2005), podemos adotar um valor de EUR para o ciclo inteiro, ou então fragmentá-lo em suas fases caso seja necessário na aplicação de modelos de simulação de crescimento.

Romano (2005) verificou a EUR nas fases vegetativas e reprodutivas de diferentes híbridos e concluiu que o valor da EUR média para todo o ciclo é adequado, sugerindo o valor de 3,9 g MJ^{-1} sob espaçamento de 0,80 m e população de 6,6 pl m^{-2}.

5.5. Produtividade da cultura

O valor médio da produtividade final de cada tratamento em toneladas por hectare encontra-se na Figura 27.

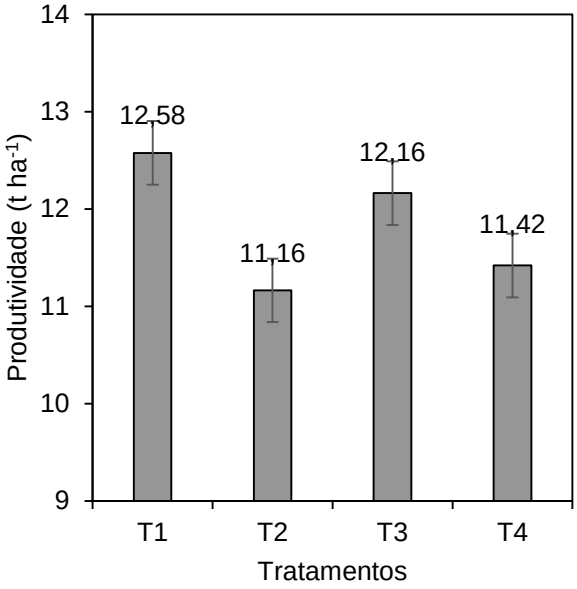

Figura 27. Produtividade da cultura do milho irrigado cultivado sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura durante a segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil. T1 = 0,45 m x 6,5 pl m^{-2}; T2 = 0,45 m x 8,5 pl m^{-2}; T3 = 0,90 m x 6,5 pl m^{-2}; T4 = 0,90 m x 8,5 pl m^{-2}.

Foi realizado uma análise de variância a fim de verificar diferenças significativas entre os tratamentos, e quando significativa, foi aplicado o teste de Tukey para a comparação de médias dos fatores.

Tabela 11. Análise de variância e teste de Tukey à 5% de significância da produtividade da cultura do milho irrigado sob diferentes arranjos espaciais cultivado na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

CV	GL	*p* > F
Espaçamento entre linhas	1	0.8067
Densidade de semeadura	1	0.0056*
Espaçamento x Densidade	1	0.3141
CV (%)	7,10	
Densidade de semeadura (pl m^{-2})	Média	
6,5	12,37 a	
8,5	11,29 b	
DMS	0,69	

***** significante à 5% de probabilidade; CV (%) = Coeficiente de variação; DMS = Diferença mínima significativa. Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Apenas o fator de densidade de semeadura apresentou diferença estatística, sendo que o aumento da densidade de semeadura provocou uma queda de rendimento da cultura.

Diversos fatores resultaram no menor rendimento quando em maior densidade de semeadura. Apesar de terem obtido os maiores de EUR, estes não garantiram aos tratamentos adensados maior produtividade de grãos e sim uma maior produção de biomassa seca por área. Os menores valores de k resultaram numa distribuição de luz menos homogênea e de menor qualidade ao longo do dossel. Além disto, o gasto energético com produção de folhas, quando já se havia o máximo de interceptação luminosa foi ineficiente.

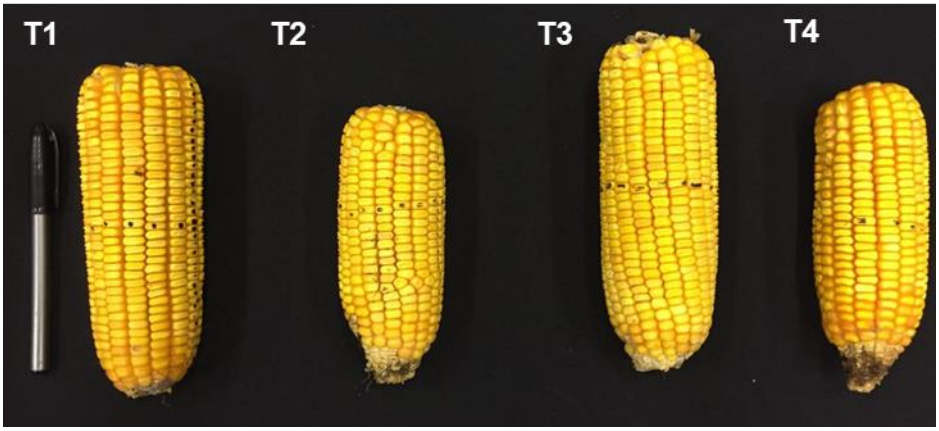

Figura 28. Comparação das espigas de milho sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura cultivado na segunda safra de 2019 sob irrigação. Piracicaba, SP, Brasil. T1: 0,45 m x 6,5 pl m^{-2}; T2: 0,45 m x 8,5 pl m^{-2}; T3: 0,90 m x 6,5 pl m^{-2}; T4: 0,90 m x 8,5 pl m^{-2}.

Argenta et al. (2001) verificaram o efeito da redução do espaçamento e da densidade de semeadura no rendimento de milho. Sob a densidade de semeadura 5,0 pl m^{-2} o rendimento da cultura aumentou linearmente conforme reduziram o espaçamento de 1,0 m para 0,40 m devido a maior eficiência de interceptação luminosa no menor espaçamento. No entanto, em uma densidade de semeadura maior (6,5 pl m^{-2}), este efeito não ocorreu, justificando que embora o menor espaçamento distribua as plantas de forma mais uniforme, ainda ocorre maior competição por luz entre plantas de linhas diferentes, como observado por Tollenaar et al. (1992). Em menor densidade de semeadura todos os componentes de rendimento avaliados por Argenta et al. (2001) foram significativamente melhores do que os em maior densidade.

Charles-Edwards et al. (1986) afirmaram que em maiores densidades de semeadura e maiores IAFs as folhas do inferior do dossel se sombreiam, diminuindo sua atividade metabólica e não contribuem para o crescimento da planta. Kunz et al.

(2007) verificaram que, em ausência de estresse hídrico, menores espaçamentos obtiveram maior produtividade, porém em condições de estresse proporcionado por um maior número de plantas na área, o maior rendimento da cultura foi observado com o aumento do espaçamento entre linhas. Johnson et al. (1998) afirmaram que a redução do espaçamento promove a melhor eficiência na interceptação da radiação, dada a distribuição mais equidistante entre plantas e menor competição por água, luz e nutrientes, possibilitando maiores rendimentos de grãos.

Foi calculado o índice de colheita de grãos (ICG) da cultura para cada tratamento (Figura 29). O ICG expressa a eficiência da cultura em converter biomassa em produção de grãos. O ICG calculado foi de 0,45 para o tratamento 1 (0,45 m x 6,5 pl m^{-2}), 0,42 para o tratamento 2 (0,45 m x 8,5 pl m^{-2}), 0,39 para o tratamento 3 (0,90 m x 6,5 pl m^{-2}) e de 0,36 para o tratamento 4 (0,90 m x 8,5 pl m^{-2}).

Argenta et al. (2001) encontraram valores de ICG variando de 0,42 a 0,52. Durães et al. (2002) encontraram em média um valor de ICG de 0,44 para diferentes híbridos.

É possível observar que o aumento da densidade de semeadura e do espaçamento entre plantas reduziram o índice de colheita (Figura 29).

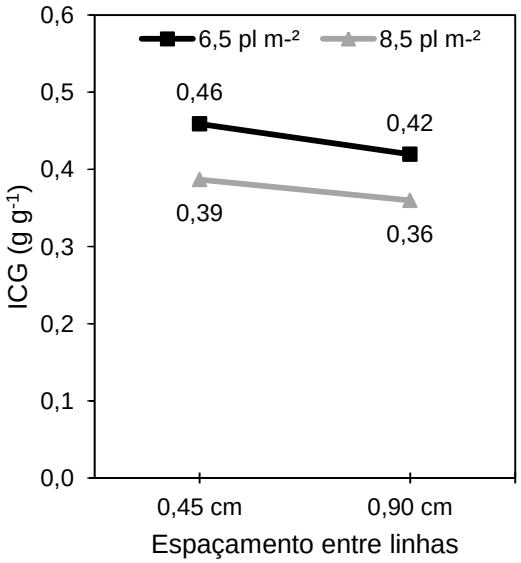

Figura 29. Índice de colheita de grãos de plantas de milho irrigado sob diferentes espaçamentos e densidades de semeadura na segunda safra de 2019. Piracicaba, SP, Brasil.

O maior acúmulo de biomassa seca não resulta em maior produtividade, como observado por Petter et al. (2016) na cultura da soja. Sangoi et al. (2001)

encontraram que a redução do espaçamento aumentou o número de grãos por espiga, a massa dos grãos e, por consequência, a produtividade. A menor competição entre plantas devido a distribuição mais equidistante aumentou a disponibilidade de carboidrato para a planta produzir mais grãos por espiga e mais pesados.

Os híbridos modernos apresentam folhas com angulação mais ereta, que permitem o maior adensamento contanto que seja adequado o suprimento hídrico e nutricional e o controle fitosanitário (ARGENTA et al., 2001; DETOMINI et al., 2008). Na recomendação de redução do espaçamento para obter maiores produtividades também deve ser levado em consideração o custo do adoção deste sistema. Maiores densidades implicam em maiores custos de produção devido ao maior gasto com sementes, fertilizantes e defensivos (SILVA et al., 2015). Muitas alterações são necessárias para o produtor se adequar a um novo arranjo espacial, como maquinário de plantio e colheita, barras de pulverizações, pneus, novo manejo de aplicação de defensivos e fertilizantes, entre outros. Todas estas modificações aumentam o custo de produção a curto-prazo (SANGOI et al., 2001).

Cabe ressaltar que cada híbrido possui características morfo e fisiológicas únicas que devem ser estudadas para a definição do arranjo de plantas mais adequado.

6. CONCLUSÕES

- Os índices de área foliar médio da cultura do milho irrigado e cultivado durante segunda safra foram: T1 (0,45 x 6,5 pl m^{-2}) = 3,50; T2 (0,45 x 8,5 pl m^{-2}) = 4,48; T3 (0,90 x 6,5 pl m^{-2}) = 3,39; T4 (0,90 x 8,5 pl m^{-2}) = 4,01.
- O aumento da densidade de semeadura proporcionou maiores valores de índice de área foliar.
- Todos os tratamentos obtiveram o comportamento sigmoidal de crescimento e o aumento da densidade de semeadura proporcionou maiores valores de biomassa seca acumulada por área.
- A RFAr sofreu poucas variações ao longo do ciclo da cultura (entre 2 e 5% da RFA). No início do ciclo, a maior parte da RFA foi transmitida devido ao baixo IAF. A RFAa obteve maiores valores quando o dossel da cultura estava fechado.
- O coeficiente de extinção de luz da cultura do milho irrigado e cultivado durante segunda safra foram: T1 (0,45 x 6,5 pl m^{-2}) = 0,56; T2 (0,45 x 8,5 pl m^{-2}) = 0,48; T3 (0,90 x 6,5 pl m^{-2}) = 0,57; T4 (0,90 x 8,5 pl m^{-2}) = 0,50.
- O aumento da densidade de semeadura diminuiu significativamente o valor do coeficiente de extinção de luz da cultura do milho.
- A eficiência do uso da radiação da cultura do milho irrigado e cultivado durante segunda safra foram: T1 (0,45 x 6,5 pl m^{-2}) = 3,43 g MJ^{-1}; T2 (0,45 x 8,5 pl m^{-2}) = 3,42 g MJ^{-1}; T3 (0,90 x 6,5 pl m^{-2}) = 0,69 g MJ^{-1}; T4 (0,90 x 8,5 pl m^{-2}) = 3,85 g MJ^{-1}.
- O aumento do espaçamento entre linhas aumentou significativamente o valor da eficiência do uso da radiação solar.
- O valor do coeficiente de extinção de luz e da eficiência do uso da radiação médios do ciclo inteiro da cultura podem ser utilizados em modelos de estimativa de crescimento, assim como seus valores fragmentados por fases de desenvolvimento.
- A produtividade da cultura do milho irrigado e cultivado durante segunda safra foram: T1 (0,45 x 6,5 pl m^{-2}) = 12,58 t ha^{-1}; T2 (0,45 x 8,5 pl m^{-2}) = 11,16 t ha^{-1}; T3 (0,90 x 6,5 pl m^{-2}) = 12,16 t ha^{-1}; T4 (0,90 x 8,5 pl m^{-2}) = 11,42 t ha^{-1}.
- O aumento da densidade de semeadura reduziu significativamente a produtividade da cultura do milho.

- O índice de colheita de grãos da cultura do milho irrigado e cultivado durante segunda safra foram: T1 (0,45 x 6,5 pl m^{-2}) = 0,46; T2 (0,45 x 8,5 pl m^{-2}) = 0,39; T3 (0,90 x 6,5 pl m^{-2}) = 0,42; T4 (0,90 x 8,5 pl m^{-2}) = 0,36.
- O aumento da densidade de semeadura e do espaçamento entre plantas reduziram o índice de colheita da cultura.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranpiration:** Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANDRADE, F. H.; UHART, S.; ARGUISSAIN, G. **Rendimento potencial de maiz en Balcarce**: analisis de los fatores que lo determinan. Balcarce: Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária, 1991. 11 p. (Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária. Boletín Técnico, 101).

ARGENTA, G. et al. Resposta de híbridos simples de milho à redução do espaçamento entre linhas. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 36, n. 1, p. 71–78, 2001.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MULLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 831-839, 2004.

BORRÁS, L.; MADDONNI, G. A.; OTEGUI, M. Leaf senescence in maize hybrids: Plant population, row spacing and kernel set effects. **Field Crops Research**, v. 82, p. 13–26, Mar. 2003.

BRACHTVOGEL, E. L. **População de plantas e uso de piraclostrobina na cultura do milho**: alterações agronômicas e fisiológicas. 2010. 133 p. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2010.

CHARLES-EDWARDS, D. A.; DOLEY, D.; RIMMINGTON, G. M. **Modelling plant growth and development**. Sydney: Academic Press, 1986. 235 p.

CIRILO, A. G.; ANDRADE, F. H. Sowing date maize productivity: crop growth and dry matter partitioning. **Crop Science**, v. 34, p. 1039-1043, 1994.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira,** v. 6, p. 1–50, 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica das safras – Grãos**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso: em: 01 jul. 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica das safras – milho total (1ª, 2ª e 3ª safras)**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 01 jul. 2019.

DETOMINI, E. R. et al. Coeficiente de extinção de luz para o híbrido Dkb 390 em dois níveis de suprimento de nitrogênio. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, n. 2, p. 155–162, 2008.

DUARTE, J. O.; GARCIA, J. C.; MIRANDA, R. A. **Cultivo do milho:** economia da produção. Sistema de produção EMBRAPA Milho e Sorgo, 1, Nov. 2015. Disponível em: <www.spo.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 01 jul. 2019.

DURÃES, F. O. M.; MAGALHÃES, P. C.; OLIVEIRA, A. C. Índice de colheita genético e as possibilidades da genética fisiológica para melhoramento do rendimento de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 1, n. 1, p. 33–40, 2002.

FAGUNDES, J. L. et al. Índice de área foliar, coeficiente de extinção luminosa e acúmulo de forragem em pastagens de *Cynodon spp*. sob lotação contínua. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 36, n. 1, p. 187–195, 2001.

FANCELLI, A. L. Manejo baseado na fenologia aumenta eficiência de insumos e produtividade. **Visão Agrícola**, v. 13, p. 24–29, 2015.

FANCELLI, A. L. **Milho:** estratégias de manejo. Piracicaba: USP/ESALQ/LPV, 2013. 180 p.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho.** 4. ed. Piracicaba: Livro Ceres, 2004. 306 p.

FAOSTAT. **Crops**. 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 01 jul. 2019.

FERREIRA JUNIOR, R. A. et al. Eficiência do uso da radiação em cultivos de milho em Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 322–328, 2014.

FINCH, D. et al. Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 122, p. 229–238, 1 abr. 2004.

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.

GALLAGHER, J. N.; BISCOE, P. V. Radiation absorption, growth and yield of cereals. **The Journal of Agricultural Science**, v. 91, n. 1, p. 47–60, 1978.

GALVAO, J. C. C.; MIRADA, G. V.; TROGELLO, E.; FRITSCHE-NETO, R. Sete décadas de evolução do sistema produtivo da cultura do milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, p. 819-828, dez. 2014. Suplemento.

GUISCEM, J. M. et al. Crescimento e desenvolvimento de cultivares de milho (*Zea mays* L.) no plantio de " safrinha ". In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002.

HEIFFIG, L.C. **Plasticidade da cultura da soja (*Glicyne max* L. Merril) em diferentes arranjos espaciais**. 2002. 85 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

HOLZWORTH, D. P.; HUTH, N. I.; DEVOIL, P. G.; ZURCHER, E. J.; HERRMANN, N. I.; MCLEAN, G.; CHENU, K.; et al. APSIM – Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling & Software,** v. 62, p. 327–350, Dec. 2014.

INTERNATIONAL GRAINS COUNCIL. **Five-year global supply and demand projections Overview total grains**.** v. 44, n. March, p. 1–32, 2019.

JOHNSON, G. A.; HOVERSTAD, T. R.; GREENWALD, R. E. Integrated weed management using narrow corn row spacing, herbicides, and cultivation. **Agronomy Journal**, v. 90, p. 40-46, 1998.

KASPERBAUER, M. J.; KARLEN, D. L. Plant spacing and reflected far-red light effects on phytochrome-regulated photosynthate allocation in corn seedlings. **Crop Science**, v. 34, p. 1564-1569, 1994.

KINIRY, J. R.; BONHOMME, R. Predicting maize phenology. In: HODGES, C. (Ed.). **Predicting crop phenology**. Boca Raton: CRC Press, 1991. p. 115-131.

KIRINY, J. R.; JONES, C. A.; O’TOOLE, J. C.; BLANCHET, R.; CABELGUENNE, M.; SPANEL, D. A. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five graincrop species. **Field Crops Research**, v. 20, p. 51-64, 1989.

KÖPPEN, W. **Climatología:** con un estudio de los climas de la tierra. Mexico: Fondo de Cultura Económica, 1948. 479 p.

KUNZ, J. H. et al. Interception and use of solar radiation by maize, as modifying soil tillage, row spacing and irrigation water availability. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 42, n. 11, p. 1511–1520, 2007.

LINDQUIST, J. L. et al. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 1, p. 72–78, 2005.

MADDONNI, G. A.; OTEGUI, M. E. Leaf area, light interception, and crop development in maize. **Field Crops Research**, v. 48, p. 81-87, 1996.

MADDONNI, G. A.; OTEGUI, M. E.; CIRILO, A. G. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. **Field Crops Research**, v. 71, n. 3, p. 183–193, 2001.

MAGALHÃES, P. C. et al. Fisiologia do milho. **Circular Técnica**, v. 22, p. 1–23, 2002.

MEINKE, H. **Improving wheat simulation capabilities in Australia from a cropping perspective**. 1996. 270 p. Thesis (Ph.D.) - Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1996.

MONSI, M.; SAEKI, T. Uber den Lichtfaktor in den Pflanzen-gesellschaften und seine Bedeutung fur die Stoffproduktion. **Japanese Journal of Botany**, v. 14, p. 22–52, 1953.

MONTEITH, J. L. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, v. 88, p. 695–697, 1996.

MONTEITH, J. L. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 68, n. 3/4, p. 213–220, 1994.

MONTEITH, J. L.; MOSS, C. J. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 281, n. 980, p. 277–294, Nov. 1977.

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.; REUNIÃO LATINOAMERICANA DE GROMETEOROLOGIA, 3., 2001. Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2001. p. 565-566.

NOBEL, P. S.; FORSETH, I. N.; LONG, S. P. Canopy structure and light interception. In: **Photosynthesis and production in a changing environment**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993. p. 79–90.

O'KEEFFE, K. **Maize growth & development**. New South Wales: Department of Primary Industries, 2009. 50 p.

PATERNIANI, E.; NASS, L. L.; DOS SANTOS, M. X. O valor dos recursos genéticos de milho para o Brasil. **Uma história brasileira do milho:** o valor dos recursos genéticos. 2000. p. 11–41.

PEDREIRA, C. G. S.; NUSSIO, L. G.; DA SILVA, S. C. Condições edafo-climáticas para produção de *Cynodon spp.* In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS, 15., 1998, Piracicaba. **Anais…** Piracicaba: FEALQ, 1998. p. 85-114.

PENNING DE VRIES, F. W. T. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. **International Rice Research Institute**, v. 29, 1989. 227 p.

PETTER, F. A. et al. Elevada densidade de semeadura aumenta a produtividade da soja? Respostas da radiação fotossinteticamente ativa. **Bragantia**, v. 75, n. 2, p. 173–183, 2016.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J, A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Soil, plant and atmosphere**. 2019. 456 p. (E-book) 10.1007/978-3-030-19322-5

ROCHA, M. J. R. et al. Determinação do coeficiente de extinção luminosa (k) para a cultura do taro *Colocasia esculenta* L. SCHOTT . p. 1–3, 1993.

ROMANO, M. R. **Desempenho fisiológico da cultura de milho com plantas de arquitetura contrastante:** parâmetros para modelos de crescimento. 2005. 100 p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SAATH, K. C. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n. 2, p. 195–212, jun. 2018.

SANGOI, L. et al. Influence of row spacing reduction on maize grain yield. **Pesq. Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 36, n. 6, p. 861–869, 2001.

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

SILVA, M. A. V. et al. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa para a produção de fitomassa no milho br 106. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., 2008, São Paulo. **A meteorologia e a cidade:** anais... São Paulo: SBMET, 2008.

SILVA, P. R. A.; TAVARES, L. A. F.; SOUSA, S. F. G.; CORREIA, T. P. S.; RIQUETTI, N. B. Rentabilidade na semeadura cruzada da cultura da soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 293-297, 2015.

STEWART, D. W.; COSTA, C.; DWYER, L. M.; SMITH, D. L.; HAMILTON, R. I.; MA, B. L. Canopy structure, light interception and photosynthesis in maize. **Agronomy Journal**, v. 95, p.1465-1474, 2003.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegeta**l. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TEIXEIRA, G. C. S.; MENEZES, G. N. B. de; SILVA, D. M.; REZENDE, S. A. de; HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F. Coeficiente de extinção luminosa (k) e eficiência do uso da radiação (EUR) para o feijoeiro. In: SEMINÁRIO JOVENS TALENTOS, 7., 2013, Santo Antônio de Goiás. **Coletânea dos resumos apresentados...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2013. 77 p.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology, Laboratory of Climatology, Centerton, v. 8, n. 1, 1955. 104 p.

TOHIDI, M.; NADERY, A.; SIADAT, S. A.; LAK, S. Variables productivity of light interception in grain maize hybrids at various amount of nitrogen. **World Applied Sciences Journal**, v. 16, p. 86-93, 2012.

TOJO SOLER, C. M. **Uso do modelo Ceres-Maize para previsão de safra do milho "safrinha".** Piracicaba: ESALQ, 2004.

TOLLENAAR, M.; BRUULSEMA, T. W. Efficiency of maize dry matter production during periods of complete leaf area expansion. **Agronomy Journal**, v. 80, p. 580-585, 1988.

UNITED NATIONS. **World population prospects 2019**. New York, 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/>. Acesso em: 01 jul. 2019.

VARLET-GRANCHER, C. et al. Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, v. 9, n. 5, p. 419–439, 1989.

WANG, Q. et al. Long-term variations in leaf area index and light extinction in a Fagus sylvatica stand as estimated from global radiation profiles. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 79, n. 3/4, p. 225–238, 2004.

WARRINGTON, I. J.; KANEMASU, E. T. Corn growth response to temperature and photoperiod. I. Seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. **Agronomy Journal**, v. 75, p. 749-754, 1983.

WORLD BANK. Creating a sustainable food future : a menu of solutions to sustainably feed more than 9 billion people by 2050. **World Resources Report 2013-14**, p. 130, 2013.

YANG, H. S. et al. Hybrid-maize: a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. **Field Crops Research**, v. 87, n. 2/3, p. 131-154, 2004.

YUNUSA, I. A. M. et al. Effect of canopy structure on efficiency of radiation interception and use in spring wheat cultivars during the pre-anthesis period in a mediterranean-type environment. **Field Crops Research**, v. 35, n. 2, p. 113–122, 1993.