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

**Consortiação de cana-de-açúcar e canola: desempenho agrônômico e bases
para simulação**

Daniel Alves da Veiga Grubert

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2018**

Daniel Alves da Veiga Grubert
Engenheiro Agrônomo

**Consortiação de cana-de-açúcar e canola: desempenho agrônomo e bases para
simulação**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **FELIPE GUSTAVO PILAU**
Coorientador:
Dr. **GENEI ANTONIO DALMAGO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2018

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

Grubert, Daniel Alves da Veiga

Consortiação de cana-de-açúcar e canola: desempenho agrônômico e bases para simulação / Daniel Alves da Veiga Grubert. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

87 p.

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

1. Intensificação agrícola 2. Produtividade 3. *Saccharum* spp. L. 4. *Brassica napus* L. 5. APSIM 6. Simulação de canola I. Título

DEDICATÓRIA

*Dedico à minha mãe Virta Maria,
que não mediu esforços para que
eu concluísse essa etapa da vida*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo em minha vida.

À minha mãe Virta Maria e meu irmão Willian Grubert, por todo apoio e incentivo à minha formação acadêmica e profissional.

À minha companheira e melhor amiga Bruna Orsi, por compartilhar dos mesmos sonhos e objetivos de vida e por estar sempre ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Felipe Gustavo Pilau, pela confiança depositada em mim, pelas oportunidades proporcionadas, pelos ensinamentos e orientação durante o mestrado, e principalmente pela grande amizade.

Ao meu coorientador Dr. Genei Antonio Dalmago pela parceria, assistência e valiosas contribuições no desenvolvimento desse trabalho.

Aos membros do Grupo GEPEMA-AGRIMET, pelo fundamental apoio nas atividades de campo e pela amizade, em especial ao Igor Barreto, ao Gustavo Ignez e ao Marco Antonio Zanatta.

À CAPES pela concessão de bolsa

À FAPESP pelo apoio financeiro para instalação e condução do experimento.

À EMBRAPA-Trigo e seus funcionários pela parceria, pela doação de sementes de canola, em especial ao Aldemir Pasinato pela hospitalidade durante minha estadia na unidade.

À AFOCAPI pela doação das mudas de cana-de-açúcar.

Aos professores do PPG Engenharia de Sistemas Agrícolas pelos ensinamentos.

Aos funcionários do LEB/ESALQ pelos serviços e apoio prestados durante o experimento.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO GERAL	9
REFERÊNCIAS.....	13
2. DESEMPENHO FITOTÉCNICO DA CONSORCIAÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CANOLA NA REGIÃO DE PIRACICABA-SP	17
RESUMO	17
ABSTRACT	17
2.1. INTRODUÇÃO	18
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	19
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
2.3.1. Caracterização Meteorológica.....	23
2.3.2. Crescimento e Desenvolvimento das Culturas	27
2.3.2.1. Fenologia dos genótipos de canola	27
2.3.2.2. Índice de área foliar das culturas	27
2.3.2.3. Massa de matéria seca da parte aérea	30
2.3.2.4. Produtividade das culturas.....	32
2.4. CONCLUSÃO	36
3. EFICIÊNCIA DE INTERCEPTAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NO CONSÓRCIO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CANOLA.....	43
RESUMO	43
ABSTRACT	43
3.1. INTRODUÇÃO	44
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	45
3.2.1. Local do experimento	45
3.2.2. Delineamento experimental.....	46
3.2.3. Coleta de dados.....	47
3.2.4. Eficiência de interceptação (ϵ_{int}), coeficiente de extinção (k) e eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa (EUR)	48
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
3.3.1. Caracterização meteorológica	49
3.3.2. Desenvolvimento temporal do índice de área foliar e da interceptação da RFA ..	51
3.3.3. Coeficiente de extinção luminosa do dossel.....	54
3.3.4. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa	55
3.4. CONCLUSÃO	56
4. CALIBRAÇÃO DO MODELO APSIM-CANOLA PARA AMBIENTE DE CLIMA TROPICAL NO BRASIL	61
RESUMO	61
ABSTRACT	61
4.1. INTRODUÇÃO	62
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	64

4.2.1. Descrição do modelo APSIM-Canola.....	64
4.2.2. Parâmetros genéticos da cultura	64
4.2.3. Parâmetros de solo	65
4.2.4. Dados experimentais.....	66
4.2.5. Calibração e avaliação do modelo	67
4.2.6. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo APSIM.....	68
4.2.7. Análise estatística do desempenho do modelo.....	69
4.2.8. Simulação da resposta produtiva da canola à variação climática.....	69
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.3.1. Caracterização meteorológica.....	70
4.3.2. Análise de sensibilidade do modelo	71
4.3.3. Simulação da fenologia.....	72
4.3.4. Simulação do índice de área foliar	73
4.3.5. Simulação da massa de matéria seca da parte aérea.....	74
4.3.6. Simulação da produtividade de grãos.....	76
4.3.7. Simulação da resposta produtiva da canola à variação climática.....	78
4.4. CONCLUSÃO.....	80
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
APÊNDICE	87

RESUMO

Consortiação de cana-de-açúcar e canola: desempenho agrônômico e bases para simulação

Projeções de crescimento populacional, do aumento do consumo de alimentos e da escassez de terras agricultáveis apontam para a necessidade de intensificar a produção agrícola, a fim de suprir a demanda mundial. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, sendo o estado de São Paulo responsável por 56% da produção nacional. Nos mais de 4,5 milhões de hectares no estado, a cultura apresenta período de latência do crescimento. Nesse momento de crescimento lento da cana-de-açúcar a introdução de uma cultura de ciclo anual curto faz-se possível. Com base nessa hipótese, a presente dissertação de mestrado se propôs avaliar o desempenho fitotécnico da consorciação de cana-de-açúcar e canola e, particularmente analisar a capacidade produtiva da oleaginosa em ambiente de clima tropical, quantificar a interação com a radiação fotossinteticamente ativa desses cultivos e avançar no estudo de modelagem da cultura da canola. Para isso, foram conduzidos experimentos a campo, durante três anos agrícolas, delineado em blocos casualizados com 4 repetições e 5 tratamentos: cana-de-açúcar + canola Hyola 61; cana-de-açúcar + canola Hyola 401 ou Hyola 571; cana-de-açúcar monocultivo; canola Hyola 61 monocultivo; canola Hyola 401 ou Hyola 571 monocultivo. Além disso, foi conduzido um experimento adicional de produção de canola irrigada delineado no esquema de blocos casualizados com 4 repetições para a calibração do modelo APSIM-Canola. Medidas meteorológicas, de solo e biométricas foram realizadas para caracterizar os sistemas de produção. Os principais resultados evidenciaram que o sistema de consorciação de cana-de-açúcar e canola foi capaz de intensificar o uso da terra, com produtividade das culturas consorciadas similar às obtidas em monocultivo. O aumento da produção do sistema consorciado ocorreu devido a utilização mais eficiente dos recursos ambientais, principalmente da radiação fotossinteticamente ativa. O modelo APSIM-Canola calibrado demonstrou potencialidade de uso para projetar a expansão agrícola da canola, podendo contribuir para o aperfeiçoamento do zoneamento agroclimático da cultura no Brasil.

Palavras-chave: Intensificação agrícola; Produtividade; *Saccharum* spp L.; *Brassica napus* L.; APSIM; Simulação de canola

ABSTRACT

Intercropping sugarcane and canola: agronomic performance and bases for simulation

Projections of population growth, increased food consumption and scarce agricultural land indicate the need to intensify agricultural production in order to meet the world demand. Brazil is the world's largest producer of sugarcane, with São Paulo state accounting for 56% of national production. In the more than 4.5 million hectares in the State, the crop has a latency period of growth. At this time of slow growth of sugarcane, the introduction of a short-season crop is possible. Based on this hypothesis, the present Master's thesis aimed to evaluate the phytotechnical performance of sugarcane and canola intercropping and, in particular, to analyze the productive capacity of the oilseed in a tropical climate environment, to quantify the interaction with the photosynthetically active radiation of these crops and to advance in the modeling study of canola. For this, field experiments were conducted during three agricultural years, delineated in randomized complete block with 4 replicates and 5 treatments: sugarcane + Hyola canola 61; canola + canola Hyola 401 or Hyola 571; cane sugar monoculture; canola Hyola 61 monoculture; canola Hyola 401 or Hyola 571 monoculture. In addition to that, it was conducted an experiment of irrigated canola production outlined in randomized complete block design with 4 replications for the calibration of APSIM-Canola model. Meteorological, soil and biometric measurements were performed to characterize the production systems. The main results showed that the sugarcane and canola intercropping system was able to intensify land use, with yields of intercropped crops similar to those obtained in monoculture. The increase in the production of the intercropping system occurs due to the more efficient use of the environmental resources, mainly of photosynthetically active radiation. The calibrated APSIM-Canola model showed potential use to project the agricultural expansion of canola, and can contribute to the improvement of the crop's agroclimatic zoning in Brazil.

Keywords: Agricultural intensification; Yield; *Saccharum* spp L.; *Brassica napus* L.; APSIM; Canola simulation

1. INTRODUÇÃO GERAL

A projeção populacional para o ano de 2050 é de 9 bilhões de habitantes que, com o incremento no poder aquisitivo e consumo, irão exercer pressão sobre a demanda mundial por alimentos (TILMAN et al., 2001). Ao mesmo tempo, mudanças climáticas e escassez de água, energia e terras agricultáveis são obstáculos a serem superados pela agricultura. O desafio de suprir a crescente demanda alimentar exige mudanças no modo de produção de alimentos (GODFRAY et al., 2010).

Estudos sobre a intensificação agrícola desempenham papel fundamental nesse processo. Uma das alternativas para melhorar o aproveitamento das terras e dos recursos naturais disponíveis pode ser a consorciação de culturas agrícolas. Esse sistema de produção consiste no cultivo de duas ou mais espécies numa mesma unidade de área, ao mesmo tempo (WILLEY, 1990).

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), cultura de importância socioeconômica no Brasil, foi cultivada em 9,05 milhões de hectares na safra 2016/17, produzindo 657 milhões de toneladas (CONAB, 2017a). Esses números confirmam o país como maior produtor mundial de açúcar e etanol.

A consorciação da cana-de-açúcar com outras culturas em áreas de produção brasileiras ainda é uma prática pouco explorada e estudada (DANTAS et al., 2015). A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene que por ter épocas distintas de crescimento, propicia a adoção do consórcio. No Centro-Sul, o crescimento das plantas ocorre basicamente entre os meses de novembro a abril, com um completo fechamento do dossel vegetal (SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006). Da brotação ao perfilhamento, logo após o plantio ou a colheita, a cana-de-açúcar tem crescimento lento devido às condições climáticas adversas – frio e/ou deficiência hídrica (ALLISON; PAMMENTER; HASLAM, 2007). Portanto, os meses de outono/inverno possibilitam a introdução de uma segunda espécie de ciclo anual em algumas áreas de produção.

Os consórcios entre espécies são mais eficientes quando os picos de crescimento vegetal não coincidem. A possibilidade de exploração dos recursos ambientais em momentos distintos minimiza a competição interespecífica (PARSONS, 2003).

Consórcios envolvendo a cana-de-açúcar são realizados em diversos locais do mundo, porém ocupam áreas pequenas, realizados principalmente pela agricultura familiar (PARSONS, 2003; GEETHA et al., 2015). Estudos apontam para diversas culturas agrícolas

com potencial comprovado para essa consorciação, a exemplo da batata (*Solanum tuberosum*), lentilha (*Lens culinaris*), mostarda (*Brassica juncea*), canola (*Brassica napus*), milho (*Zea mays* L.), alho (*Allium sativum*) e girassol (*Helianthus annuus*) (GOVINDEN, 1990; NAZIR et al., 2002; RANA et al., 2006; ISLAM et al., 2013; REHMAN; QAMAR; QAMAR, 2014).

Dentro dessa perspectiva, a canola surge como alternativa, possibilitando a produção de óleo na época do ano em que há condições desfavoráveis para a maioria das culturas oleaginosas. Seu cultivo em consorciação com a cana-de-açúcar pode aperfeiçoar o uso de equipamentos, mão-de-obra e uso da terra, além de apresentar efeitos benéficos para as culturas seguintes, particularmente, por seu sistema radicular profundo, que pode melhorar a estrutura do solo e descompactar camadas subsuperficiais, função essencial ao prolongamento de produção dos canaviais. Além disso, a decomposição de seus restos culturais fornece nutrientes para a cultura seguinte, e auxilia no controle de pragas e doenças de solo pela ação de glucosinolatos presentes nos restos culturais (BOOTH; GUNSTONE, 2004).

A canola (*Brassica napus* L.), pertencente à Família *Brassicaceae*, é uma espécie oleaginosa, desenvolvida a partir do melhoramento genético convencional da colza, típica de clima temperado, que apresenta em torno de 38% de óleo e 25% de proteínas nos grãos. Seu óleo é utilizado para produção de biodiesel e alimentação humana, considerado um alimento funcional, que apresenta elevada quantidade de ômega-3, gorduras monoinsaturadas, vitamina E e baixa quantidade de gordura saturada (TOMM, 2007).

A cultura é a terceira oleaginosa mais produzida no mundo. As principais espécies cultivadas são a *Brassica napus* L. Var. oleífera e a *Brassica campestris* L., com tipos de inverno e de primavera. No Brasil é cultivada apenas a canola de primavera da espécie *Brassica napus* L. Var. oleífera que não apresentam necessidade elevada de vernalização (TOMM, 2007).

Segundo o Primeiro Levantamento, safra 2017/18 da Companhia Nacional de Abastecimento, a produção de canola na safra 2017 foi de 61,6 mil toneladas, em uma área de 48,1 mil ha, com produtividade média de 1.281 kg ha⁻¹ (CONAB, 2017b).

As necessidades ambientais mais importantes para a canola de primavera são a temperatura e a disponibilidade hídrica, sendo que os híbridos de canola produzidos no Brasil respondem insensivelmente ao fotoperíodo (TOMM, 2007). A temperatura ótima de crescimento é 20°C, com amplitude entre 12 e 30°C. A temperatura basal inferior da cultura é de 5°C (MORRISON; MCVETTY; SHAYKEWICH, 1989; ROBERTSON et al., 2002). A necessidade hídrica da canola fica em torno de 300 a 500 mm de água durante o ciclo,

variando entre diferentes híbridos. Solos encharcados podem reduzir o número de siliques e o número de grãos por síliqua, acarretando em perda de produtividade de até 50% em relação ao cultivo em solo bem drenado (THOMAS, 2003). Em contrapartida, o aumento da produtividade da canola irrigada foi observado em diversos estudos. Faraji et al. (2009), ao quantificarem a eficiência de uso da água de genótipos de canola na Província de Golestan no Irã, verificaram diferença significativa entre a produtividade de grãos de canola sob irrigação e em sequeiro, sendo respectivamente, de 2.576 kg ha⁻¹ e 2.095 kg ha⁻¹ na safra de 2005/6, e 2.233 kg ha⁻¹ e 1.987 kg ha⁻¹ na safra de 2006/7. Sanches et al. (2014), ao avaliarem a produtividade de canola sob irrigação e doses de nitrogênio em Dourados-MS, no Brasil, observaram aumento considerável no rendimento da cultura, de 1.354 kg ha⁻¹ no sistema sequeiro para 3.145 kg ha⁻¹ com irrigação.

No Brasil ainda existem dificuldades tecnológicas à expansão do cultivo, como a identificação de melhores épocas de semeadura, manejo e genótipos adaptados para cada região (TOMM et al., 2009). A produção de canola em locais distintos do qual usualmente é explorada e adaptada, entre as latitudes de 35° e 55° graus, é considerada fundamental para a expansão da cultura no Brasil. A “tropicalização” da canola para novas áreas agrícolas de baixa latitude, representa cultivo alternativo para a rotação de culturas, com as espécies de verão, e possibilidade de produção de óleo no inverno, incrementando a renda dos agricultores.

Estudos apontam para a viabilidade da produção de canola em áreas de clima tropical (TOMM, 2004; VASCONCELOS et al., 2012; SANCHES; GOMES; AZEVEDO, 2017). Cordeiro (1997) relatou viabilidade na produção de canola sob sistema de irrigação, semeada no mês de junho, em Viçosa - MG. A produção de canola no nordeste da Paraíba (latitude 6°58'07" S, longitude 35° 44'03" W, altitude 627 m) mostrou rendimentos semelhantes aos obtidos nas regiões produtoras do Sul do Brasil, entre 1.494 kg ha⁻¹ a 2.268 kg ha⁻¹ (TOMM et al., 2008).

Neste sentido, a expansão da cultura da canola para novas áreas agrícolas pode ser avaliada por estudos de modelagem agrícola (WANG et al., 2012; GEORGE; KAFFKA, 2017). Os modelos de simulação de crescimento e desenvolvimento de culturas baseados em processos biofísicos são importantes ferramentas no estudo de sistemas agrícolas. Pois possibilitam a previsão e avaliação de sistemas de produção, simulação de práticas de manejo, impactos climáticos futuros e monitoramento de safras, e que podem aprimorar o uso dos recursos naturais e direcionar programas de melhoramento de plantas (HEINEMANN; STONE; SILVA, 2010).

A plataforma de simulação *Agricultural Production Systems Simulator* (APSIM) (KEATING et al., 2003) reúne alguns dos mais importantes modelos de culturas utilizado em diversos países do mundo, que apresenta módulos para simulação de crescimento e desenvolvimento de plantas, manejo, dinâmica de nitrogênio e água no solo, utilizando algoritmos e equações dependentes de variáveis da planta, solo e dados meteorológicos. Cada componente que exerce influência no sistema solo-planta-atmosfera é então integrado em modelos que, após a confirmação de sua eficiência em simular a realidade, permitem determinar ou prever o fenômeno em situações distintas (JAME; CUTFORTH, 1996).

O APSIM apresenta módulos que contemplam diversas culturas agrícolas, inclusive a cultura da canola, porém em condições edafoclimáticas, manejo e variedades distintas usadas no Brasil. Para o correto funcionamento do modelo é necessário proceder à sua calibração para condições locais com experimento a campo, sendo monitorados o crescimento e desenvolvimento da cultura como a fenologia, área foliar, número de folhas, surgimento de folhas, produtividade, bem como as condições meteorológicas e de solo como eficiência de uso da radiação, umidade do solo, temperatura do ar, etc., ajustando-se os parâmetros do sistema para que os resultados sejam simulados corretamente. A calibração do modelo APSIM-Canola foi realizada na Austrália, Estados Unidos e China com resultados satisfatórios que simularam adequadamente a fenologia e produtividade da cultura (FARRÉ et al., 2002; GEORGE; KAFFKA, 2017; HE et al., 2017a).

A calibração do modelo APSIM-Canola é fundamental para a adequada modelagem da canola nas condições de cultivo e genótipos utilizados no Brasil, de modo a fundamentar estudos de expansão agrícola da cultura para áreas tropicais e avaliar sua resposta produtiva. Por fim, o estudo e conhecimento dos processos de crescimento, desenvolvimento e produção da cana-de-açúcar e canola em consórcio, podem fornecer resultados promissores e se configurar em um novo sistema de produção para o estado de São Paulo. A inserção da cultura da canola no período de inverno para a região pode representar alternativa para a produção de matéria-prima para a cadeia produtiva de biocombustíveis, ganhos socioeconômicos e ambientais com geração de renda, melhor uso da terra e diversificação da produção agrícola e da matriz energética brasileira.

REFERÊNCIAS

- ALLISON, J. C. S.; PAMMENTER, N. W.; HASLAM, R. J. Why does sugarcane (*Saccharum* sp. hybrid) grow slowly? **South African Journal of Botany**, v. 73, n. 4, p. 546–551, 2007.
- BOOTH, E. J.; GUNSTONE, F. D. Rapeseeds and rapeseeds oil: agronomy, production and trade. In: GUNSTONE, F. D. (Ed.). **Rapeseed and canola oil : production, processing, properties and uses**. Blackwell Pub., 2004. p. 222.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana: segundo levantamento**. safra 2017/18, Brasília, v. 4, n. 2, 2017a.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: primeiro levantamento**. Safra 2017/18, Brasília, v. 5, p. 1-114, 2017b.
- CORDEIRO, L. A. **Avaliação de características agronômicas e qualidade de sementes de canola (*Brassica napus* L . var . oleifera) cultivada em Viçosa**. 1997. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, 1997.
- DANTAS, R. A.; CARMONA, R.; CARVALHO, A. M. de; REIN, T. A.; MALAQUIAS, J. V.; SANTOS JÚNIOR, J. de D. G. dos. Produção de matéria seca e controle de plantas daninhas por leguminosas consorciadas com cana-de-açúcar em cultivo orgânico. **Pesq. agropec. bras.**, v. 50, n. 8, p. 681–689, 2015.
- FARAJI, A.; LATIFI, N.; SOLTANI, A.; RAD, A. H. S. Seed yield and water use efficiency of canola (*Brassica napus* L.) as affected by high temperature stress and supplemental irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 1, p. 132–140, 2009.
- FARRÉ, I.; ROBERTSON, M. J.; WALTON, G. H.; ASSENG, S. Simulating phenology and yield response of canola to sowing date in Western Australia using the APSIM model. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 53, n. 10, p. 1155–1164, 2002.
- GEETHA, P.; SIVARAMAN, K.; TAYADE, A. S.; DHANAPAL, R. SUGARCANE BASED INTERCROPPING SYSTEM AND ITS EFFECT ON CANE YIELD. **Journal of Sugarcane Research**, n. July 2017, 2015.
- GEORGE, N.; KAFFKA, S. Canola as a new crop for california: A simulation study. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 2, p. 496–509, 2017.
- GODFRAY, H. C. J.; BEDDINGTON, J. R.; CRUTE, I. R.; HADDAD, L.; LAWRENCE, D.; MUIR, J. F.; PRETTY, J.; ROBINSON, S.; THOMAS, S. M.; TOULMIN, C. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 812–818, 12 fev. 2010.

- GOVINDEN, N. Intercropping of sugar-cane with potato in Mauritius: A successful cropping system. **Field Crops Research**, v. 25, n. 1–2, p. 99–110, 1 nov. 1990.
- HE, D.; WANG, E.; WANG, J.; LILLEY, J.; LUO, Z.; PAN, X.; PAN, Z.; YANG, N. Uncertainty in canola phenology modelling induced by cultivar parameterization and its impact on simulated yield. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 163–175, 15 jan. 2017.
- HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; SILVA, S. C. da. **Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade na pesquisa agrônômica** Santo Antônio de Goiás Embrapa Arroz e Feijão, 2010.
- ISLAM, M.; RAHMAN, M.; AHMED, F.; ALOM, M.; AKHTERUZZAMAN, M. Performance Of Different Hyv Mustard Varieties With Sugarcane (*Saccharum officinarum*) As Intercrop In Farmers' Fields. **Bangladesh Journal of Agricultural Research**, v. 38, n. 2, p. 211–217, 28 jul. 2013.
- JAME, Y. W.; CUTFORTH, H. W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 76, n. 1, p. 9–19, jan. 1996.
- KEATING, B. .; CARBERRY, P. .; HAMMER, G. .; PROBERT, M. .; ROBERTSON, M. .; HOLZWORTH, D.; HUTH, N. .; HARGREAVES, J. N. .; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; MCLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J. .; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, S.; BRISTOW, K. .; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; MCCOWN, R. .; FREEBAIRN, D. .; SMITH, C. . An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 267–288, 1 jan. 2003.
- MORRISON, M. J.; MCVETTY, P. B. E.; SHAYKEWICH, C. F. THE DETERMINATION AND VERIFICATION OF A BASELINE TEMPERATURE FOR THE GROWTH OF WESTAR SUMMER RAPE. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 69, n. 2, p. 455–464, abr. 1989.
- NAZIR, M. S.; JABBAR, A.; AHMAD, I.; NAWAZ, S.; BHATTI, I. H. Production Potential and Economics of Intercropping in Autumn-Planted Sugarcane. **International journal of agriculture & biology**, v. 4, n. 1, p. 4–1, 2002.
- PARSONS, M. J. Successful Intercropping of Sugarcane. **Proc. S. Afr. Sug. Technol. Ass.**, v. 7, p. 77–98, 2003.
- RANA, N. S.; KUMAR, S.; SAINI, S. K.; PANWAR, G. S. Indian journal of agronomy. **Indian Journal of Agronomy**, v. 51, n. 1, p. 31–33, 2006.

- REHMAN, A.; QAMAR, R.; QAMAR, J. Economic Assessment of Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) through Intercropping. **Journal of Agricultural Chemistry and Environment**, v. 03, n. 03, p. 24–28, 14 jul. 2014.
- ROBERTSON, M. J.; HOLLAND, J. F.; CAWLEY, S.; POTTER, T. D.; BURTON, W.; WALTON, G. H.; THOMAS, G. Growth and yield differences between triazine-tolerant and non-triazine-tolerant cultivars of canola. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 53, n. 6, p. 643, 2002.
- SANCHES, A. C.; GOMES, E. P.; AZEVEDO, E. P. G. Canola yield under different irrigation frequencies and nitrogen levels in the Brazilian Cerrado. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 41, n. 4, p. 367–377, 2017.
- SANCHES, A. C.; GOMES, E. P.; RAMOS, W. B.; MAUAD, M.; SANTOS, S. dos; BISCARO, G. A. Produtividade da canola sob irrigação e doses de adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 7, p. 688–693, 2014.
- SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (ORG. . (Ed.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP2, 2006. p. 415.
- THOMAS, P. The Grower's manual. **Winnipeg: Canola Council of Canada**, 2003. Disponível em: <http://www.canolacouncil.org/canola_growers_manual.aspx>.
- TILMAN, D.; FARGIONE, J.; WOLFF, B.; D'ANTONIO, C.; DOBSON, A.; HOWARTH, R.; SCHINDLER, D.; SCHLESINGER, W. H.; SIMBERLOFF, D.; SWACKHAMER, D. Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change. **Science**, v. 292, n. 5515, p. 281–284, 13 abr. 2001.
- TOMM, G. . Indicativos tecnológicos para a produção de canola no Rio Grande do Sul. v. Passo Fund, n. (Embrapa Trigo. Sistema de produção, 4), p. 68, 2007.
- TOMM, G. O. **Desempenho de genótipos de canola em Goiás, em 2004**. Passo Fundo: Embrapa Trigo (Comunicado técnico online, 118), 2004.

- TOMM, G. O.; RAPOSO, R. W. C.; SOUZA, T. A. F. de; OLIVEIRA, J. T. de L.; RAPOSO, E. H. S.; SILVA NETO, C. P. da; BRITO, A. C.; NASCIMENTO, R. de S.; RAPOSO, A. W. S.; SOUZA, C. F. **Desempenho de genótipos de canola (*Brassica napus* L.) no Nordeste do estado da Paraíba**Passo Fundo: Embrapa Trigo, (Embrapa Trigo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Online, 65), 2008.
- TOMM, G. O.; WIETHÖLTER, S.; DALMAGO, G. A.; SANTOS, H. P. **Tecnologia para produção de canola no Rio Grande do Sul**. Passo, 2009.
- VASCONCELOS, R. L.; GIACOMO, K. S.; SOUZA, E. C.; GARCIA, A. Viabilidade climática para o cultivo de canola em Ribeirão Preto-SP. **Nucleus**, v. 9, n. 2, p. 195–200, 2012.
- WANG, S.; WANG, E.; WANG, F.; TANG, L. Phenological development and grain yield of canola as affected by sowing date and climate variation in the Yangtze River Basin of China. **Crop and Pasture Science**, v. 63, n. 5, p. 478–488, 2012.
- WILLEY, R. W. Resource use in intercropping systems. **Agricultural Water Management**, v. 17, n. 1–3, p. 215–231, jan. 1990.

2. DESEMPENHO FITOTÉCNICO DA CONSORCIAÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CANOLA NA REGIÃO DE PIRACICABA-SP

RESUMO

A consorciação de culturas agrícolas apresenta potencialidade frente ao cenário futuro de escassez de terras agricultáveis e aumento da demanda mundial por alimentos. As vantagens proporcionadas pela consorciação em relação ao monocultivo são o aumento da produtividade total do sistema, do uso dos recursos ambientais e possível retorno financeiro. O desempenho fitotécnico da consorciação de cana-de-açúcar e canola foi avaliado durante três anos agrícolas em Piracicaba (SP). O experimento foi delineado em blocos casualizados com 4 repetições e 5 tratamentos: cana-de-açúcar + canola Hyola 61; cana-de-açúcar + canola Hyola 401 ou Hyola 571; cana-de-açúcar monocultivo; canola Hyola 61 monocultivo; canola Hyola 401 ou Hyola 571 monocultivo. O consórcio cana-de-açúcar e canola apresentou resultado similar ao tratamento em monocultivo, com produtividade de colmos de 51,0 a 117,0 ton ha⁻¹. A canola consorciada com cana-de-açúcar também apresentou produtividade de grãos similar aos monocultivos, de 1.026 a 1.567 kg ha⁻¹. O sistema consorciado resultou em eficiência de uso da terra de 1,74 a 1,87 vezes superior ao monocultivo.

Palavras-chave: Intensificação agrícola; Produtividade; *Saccharum* spp L.; *Brassica napus* L.

ABSTRACT

The intercropping in agriculture has potential against the future scenario of arable land scarcity and increased global demand for food. The advantages offered by the intercropping in relation to monoculture are the increase of total system yield, more efficient use of environmental resources and possible financial return. The phytotechnical performance of sugarcane and canola intercropping system was evaluated during three growing seasons in Piracicaba (SP). The experiment was designed in a randomized complete block with 4 replicates and 5 treatments: sugarcane + canola Hyola 61; sugarcane + canola Hyola 401 or Hyola 571; sugarcane monoculture; canola Hyola 61 monoculture; canola Hyola 401 or Hyola 571 monoculture. The sugarcane and canola intercropped presented a similar result to the monoculture treatment, with fresh stalks yields of 51.0 to 117.0 tons ha⁻¹. Canola intercropped with sugarcane also had grain yield similar to monocultures, from 1,026 to 1,567 kg ha⁻¹. The intercropping system resulted in land use efficiency of 1.74 to 1.87-fold higher than monoculture.

Keywords: Agricultural intensification; Yield; *Saccharum* spp L.; *Brassica napus* L.

2.1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alimento e busca por fontes alternativas de energia impulsionaram a produção de culturas oleaginosas nas últimas décadas (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012). Grande parte do aumento de produção foi sustentada pelo incremento em área de produção, que apresentou taxa de crescimento médio anual de 1,76% entre 1994 e 2013 (FREITAS et al., 2016). Para as próximas décadas as projeções mundiais limitam a expansão das terras agrícolas em apenas 4% até 2050 (BRUINSMA, 2009; VAN DEN BERG et al., 2016). Portanto, para garantir a segurança alimentar, atendendo a demanda de um adicional de 2 bilhões de pessoas, até a metade do século (FAO et al., 2017), são necessárias técnicas ou sistemas de produção capazes de intensificar a produtividade agrícola.

No Brasil, por questões de manejo, a cana-de-açúcar é plantada em linhas espaçadas em 1,4 a 1,8 m. Com brotação ou rebrota lenta, as áreas permanecem de 90 a 120 dias sem cobertura vegetal (ALLISON; PAMMENTER; HASLAM, 2007). Para esse período de crescimento lento da cana-de-açúcar, a consorciação com outras espécies de ciclo curto faz-se possível. Essa estratégia efetiva a intensificação agrícola por meio do aproveitamento da terra e dos recursos ambientais pelas culturas agrícolas consorciadas, produzindo mais por unidade de área (GEETHA et al., 2015; RASEDUZZAMAN; JENSEN, 2017).

Nesse contexto, a canola apresenta-se como alternativa para consorciação com a cana-de-açúcar, possibilitando a produção de óleo vegetal no período de inverno e assim favorecendo a diversificação da matriz energética nacional. Apesar de a cana-de-açúcar e a canola serem produzidas em regiões distintas, a cana-de-açúcar ocupando áreas de clima tropical e a canola regiões subtropicais, resultados experimentais sobre a “tropicalização” da canola, ou seja, sua produção em regiões de baixa latitude, (TOMM, 2004; TOMM et al., 2008), evidenciam o potencial produtivo.

No ambiente de produção tradicional da canola, no Sul do Brasil, a produtividade média nas safras de 2016 e 2017 foi de 1.500 e 1.281 kg ha⁻¹, respectivamente (CONAB, 2017a). Em regiões tropicais, a exemplo de Areia, na Paraíba, Tomm et al. (2008) registraram rendimentos de grãos entre 1.494 e 2.268 kg ha⁻¹, ou seja, produtividades maiores que das áreas de produção do sul do Brasil. Na Austrália, de onde provêm boa parte dos genótipos semeados no Brasil, a produtividade média de grãos é de 1.300 a 1.400 kg ha⁻¹ (FAO, 2017). No entanto, a canola tem potencial para produzir até 4.500 kg ha⁻¹ de grãos (THOMAS, 2003; KAMKAR et al., 2011).

O desempenho da cana-de-açúcar consorciada, em relação ao monocultivo, apresenta diversos resultados contraditórios da interação interespecífica do sistema (PARSONS, 2003; GEETHA et al., 2015). Roodagi, Itanal e Kandagave (2000), ao avaliarem a consorciação de cana-de-açúcar com amendoim em Karnataka, na Índia constataram redução de 6,2% na produtividade de colmos. Rasool et al. (2011) não observaram diferença significativa na produtividade de colmos em monocultivo e consórcio com trigo e lentilha em Islamabad, no Paquistão. Kaur, Bhullar e Gill (2016) avaliando diferentes manejos de plantas daninhas no consórcio cana-de-açúcar e canola em Ludhiana, na Índia, encontraram produtividade de colmos similar entre o monocultivo e consórcio.

Dentro desse contexto, o objetivo do estudo foi avaliar o desempenho fitotécnico do sistema de produção de cana-de-açúcar consorciado com canola, para a região de Piracicaba-SP.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (22° 41' 42" S; 47° 38' 28" O e 520 m de altitude) nos anos agrícolas 2015/16, 2016/17 e 2017/18. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é o Cwa, com chuvas concentradas no verão e inverno seco (ALVARES et al., 2013). A temperatura do ar média anual é de 22,3°C, precipitação pluvial média anual de 1.347 mm e radiação solar global média de 16,4 MJ m⁻² d⁻¹. O solo da área é classificado como Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico (EMBRAPA, 2013). As características químicas das amostras do solo da área do experimento: 51 g dm⁻³ de matéria orgânica; 5,7 de pH em CaCl₂; 66,7 mg dm⁻³ de P; 6,07; 0,0; 75,3; 41,3 e 16,2 mmol_(c) dm⁻³ de K, Al, Ca, Mg e H+Al, respectivamente.

O experimento foi delineado em blocos casualizados com 4 repetições e 5 tratamentos: cana-de-açúcar (RB867515) + canola (Hyola 61); cana-de-açúcar (RB867515) + canola (Hyola 401); cana-de-açúcar (RB867515); canola (Hyola 61); e canola (Hyola 401). No segundo ciclo de cultivo não foi possível avaliar os tratamentos com canola Hyola 401. No terceiro ciclo alterou-se este genótipo pelo Hyola 571, e a variedade de cana-de-açúcar para RB966928 (genótipo precoce), mantendo os demais tratamentos iguais aos anos anteriores.

As parcelas de cana-de-açúcar em monocultivo eram compostas de 5 linhas de plantio, com 10 m de comprimento, espaçadas em 1,4 m. As parcelas de canola em monocultivo tinham 10 linhas de semeadura com 5 m de comprimento, espaçadas em 0,4 m. As parcelas experimentais referentes aos consórcios foram constituídas de 5 linhas de cana-de-açúcar com 10 metros de comprimento, e nas entrelinhas da cana-de-açúcar foram semeadas 3 linhas de canola, espaçadas em 0,4 m entre si (Figura 1).

Na primeira safra as avaliações do consórcio e monocultivo foram conduzidas em cana planta. A segunda safra quantificou a primeira rebrota da cana-de-açúcar, portanto, em cana-soca. Para a terceira safra a cana-de-açúcar foi novamente plantada, alterando a variedade para a RB966928 e assim avaliando a produção de cana planta.

Figura 1. Representação das parcelas de cana-de-açúcar e canola em monocultivo e consorciadas.

Para a instalação do experimento, em janeiro de 2015, o solo foi manejado com aração e gradagem e aplicação de calcário dolomítico ($2,0 \text{ ton ha}^{-1}$) para a correção do pH, conforme dados da análise química do solo e indicações do Boletim 100 IAC (RAIJ et al., 1997).

O plantio da cana-de-açúcar foi realizado no dia 20 de abril de 2015 e 23 de abril de 2017, em sulcos com profundidade de 0,3-0,4 m. Nos sulcos foram depositados colmos de cana-de-açúcar da variedade RB867515 (primeira safra) e RB966928 (terceira safra) com 12 a 18 gemas por metro. A adubação de plantio para cana-de-açúcar foi de 50 kg ha^{-1} de N e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Adubação nitrogenada de cobertura foi realizada no mês de dezembro, em todos os anos de produção, aplicando 100 kg ha^{-1} de N na forma de uréia. No primeiro ano as parcelas de cana-de-açúcar foram colhidas de forma mecanizada, em 19 de abril de 2016. No

segundo e terceiro ciclo da cana-de-açúcar a colheita foi manual, apenas das amostras utilizadas para determinação da produção e qualidade, realizadas em 31 de maio de 2017 e 10 de abril de 2018, respectivamente.

As sementeiras dos genótipos de canola Hyola 61 e Hyola 401 foram manuais, adotando-se densidade de sementes suficientes para alcançar um estande de 40 plantas m^{-2} . Tanto em consórcio quanto em monocultivo a canola foi semeada entre os dias 24 e 28 de abril de 2015 no primeiro ciclo de produção, logo após o plantio da cana-de-açúcar. A colheita ocorreu entre 28 de agosto e 4 de setembro do mesmo ano. No segundo ciclo de produção, o híbrido de canola Hyola 61 foi semeado entre 8 e 10 de maio de 2016, com colheita em 12 de setembro de 2016. Nesse ano a germinação das parcelas experimentais da canola Hyola 401 não permitiu a sua avaliação em monocultivo e consorciada com cana-de-açúcar. Em 2017 a sementeira dos genótipos de canola Hyola 61 e Hyola 571 (substituindo a Hyola 401) em consórcio foi em 28 de abril com colheita em 24 de agosto. A sementeira em monocultivo foi em 3 de maio com colheita em 4 de setembro.

A adubação de base para canola foi depositada nas linhas, de acordo com a análise química do solo e as indicações para a cultura da canola (TOMM, 2007). Foram adicionados 30 kg ha^{-1} de N e 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 na sementeira, e 30 kg ha^{-1} de N em cobertura (à lanço) quando as plantas apresentavam quatro folhas. Plantas daninhas foram controladas manualmente. Não foram registradas doenças e pragas.

As variáveis meteorológicas medidas foram temperatura mínima, máxima e média do ar, em estações meteorológicas instaladas na própria área experimental. As medidas foram feitas a cada 10 segundos, armazenando médias de 15 minutos. A radiação solar global (Rg), o saldo de radiação, a umidade relativa do ar, a velocidade do vento e a precipitação pluvial foram obtidas do Posto Meteorológico “Professor Jesus Marden dos Santos” do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP, distante 100 m do experimento. Essas medições também foram realizadas em mesma frequência, com médias armazenadas a cada 15 minutos.

O monitoramento da disponibilidade de água no solo foi realizado a partir de balanço hídrico adaptado de Thornthwaite e Mather (1955). Para determinação da capacidade de armazenamento de água do solo (CAD) foram utilizados os valores de capacidade de campo (θ_{cc}) de 0,39 $m^3 m^{-3}$ e do ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) de 0,25 $m^3 m^{-3}$ e densidade média do solo de 1,44 $g cm^{-3}$ (MEURER, 2014; SOUSA, 2014). As simulações foram realizadas para profundidade (z) de 0,6 m para canola e 0,8 m para cana-de-açúcar. Valores de Kc utilizados para canola, foram 0,35, 1,15 e 0,51, para o início do ciclo, floração e o final do

ciclo (ALLEN et al., 1998). Para cana-de-açúcar o K_c utilizado foi de 0,5, 0,8, 0,95, 1,1, 1,2, 0,95 e 0,7 para os períodos de 0-30, 30-60, 60-75, 75-120, 120-300, 300-330 e 330-360 dias de ciclo (DOORENBOS; KASSAN, 1994). A evapotranspiração de referência foi calculada pelo modelo de Penman-Monteith.

O monitoramento fenológico da canola foi semanal, seguindo a escala Cetiom (IRIARTE; VALETTI, 2008). Para determinar a data de mudança de estágio fenológico, adotou-se o critério em que 50% das plantas das parcelas apresentavam a característica do estágio.

Análises biométricas para determinação da massa de matéria seca da parte aérea (MS) e índice de área foliar (IAF) foram realizadas durante o ciclo das culturas, em intervalos de aproximadamente 7-10 dias para canola e mensalmente, a partir do perfilhamento, para a cana-de-açúcar. Para a biometria foram coletadas de forma aleatória nas parcelas 5 plantas de cana-de-açúcar por tratamento, excluindo as bordas. Para a canola, as avaliações foram realizadas amostrando todas as plantas contidas em 0,5 m de linha de cultivo, sendo coletadas em locais distintos das parcelas ao longo do ciclo.

Para determinar a MS o material vegetal foi acondicionado em sacos de papel para secagem em estufa de ventilação forçada a 65°C e posteriormente pesado. A área foliar foi obtida por imagem digitalizada das folhas e convertida em IAF, conforme metodologia de Alvim et al. (2010).

Ao final do ciclo das culturas as produtividades de grãos de canola e de colmos frescos de cana-de-açúcar foram determinadas. Para isso foram colhidas 5 amostras de 3 m de linha de cultivo de canola, e 5 amostras de 5 m de linhas de cultivo de cana-de-açúcar. Para obtenção da produtividade total (kg ha^{-1}) foi determinada a umidade dos grãos de canola em todas as amostras colhidas, conforme metodologia descrita pela regra de análise de sementes (BRASIL, 2009), utilizando o método da estufa a 105°C por 24 horas, e então corrigido para a base de 10% de umidade.

As amostras dos grãos coletados foram submetidas a extração de óleo pelo método de solvente soxhlet (MORETTO; FETT, 1998). Os colmos de cana-de-açúcar foram analisados pela metodologia da CONSECANA (2006) para determinação do teor de sacarose aparente na cana-de-açúcar (Pol do colmo), porcentagem de sólidos solúveis do caldo (°Brix), relação entre pol/brix x 100 (Pureza), açúcares redutores (AR), açúcares redutores totais (ATR), teor de fibra no colmo e teor de açúcares redutores na cana-de-açúcar (ARC).

Para o cálculo da soma térmica utilizou-se equação de Gilmore e Rogers (1958), com temperatura basal de 5°C para a canola (MORRISON; MCVETTY; SHAYKEWICH, 1989).

Adicionalmente a isso, calculou-se a Eficiência de Uso da Terra (EUT), conforme Equação 1 (ANDREWS; KASSAM, 1976):

$$EUT = \frac{Y_{\text{cana cons.}}}{Y_{\text{cana monoc.}}} + \frac{Y_{\text{canola cons.}}}{Y_{\text{canola monoc.}}} \quad (1)$$

Onde: $Y_{\text{cana cons.}}$ é o rendimento de colmos de cana-de-açúcar quando consorciada com a canola; $Y_{\text{cana monoc.}}$ é o rendimento de colmos de cana-de-açúcar em monocultivo; $Y_{\text{canola cons.}}$ é o rendimento de grãos de canola em consórcio com cana-de-açúcar; $Y_{\text{canola monoc.}}$ é o rendimento de grãos do híbrido de canola em monocultivo.

Os dados das variáveis obtidos foram avaliados quanto a normalidade dos mesmos, utilizando o teste de Shapiro-Wilk ($\alpha=0,05$), e homogeneidade das variâncias, utilizando o teste de Bartlett. Em seguida, os dados foram submetidos a análise de variância (Teste F) a 5% de significância. Uma análise de componentes principais foi conduzida utilizando dados de canola e cana-de-açúcar, individualmente. A matriz dos dados foi auto escalada antes da análise, de modo a obter o mesmo peso para cada variável. As análises estatísticas foram realizadas no programa estatístico R versão 3.4.3 (R CORE TEAM, 2013).

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Caracterização Meteorológica

No primeiro ciclo de cultivo, no período de produção da canola, a temperatura média do ar variou entre 15,2°C e 24,6°C. No segundo ciclo de produção, também para canola, a temperatura média do ar variou entre 10,4°C e 24,4°C, e no terceiro ano de produção da canola a temperatura média do ar durante o ciclo foi dos 13,8°C a 24,1°C (Figura 2). A temperatura do ar é a variável de maior importância no crescimento e desenvolvimento da canola, sendo o valor ótimo de 20 °C, com limites extremos de 12 e 30°C (ROBERTSON et al., 2002; THOMAS, 2003). Em todos os ciclos de produção da canola a temperatura do ar esteve dentro da faixa térmica ideal para a cultura.

Figura 2. Temperatura máxima ($T_{\max}$), média ($T_{\text{méd}}$) e mínima ($T_{\min}$) do ar durante o período de condução do experimento de consórcio de cana-de-açúcar e canola, de abril de 2015 a abril de 2018.

Conforme Robertson et al. (2013) há uma redução na produtividade de grãos de canola em 0,08% para cada hora com temperatura do ar acima de 29°C durante o florescimento. Essa condição térmica foi registrada em cinco, seis e apenas um dia durante o florescimento, respectivamente no primeiro, segundo e terceiro ciclo de produção da cultura. A redução na produtividade de grãos pode ainda, ter sido intensificada com o déficit hídrico registrado no período (KUTCHER; WARLAND; BRANDT, 2010). O híbrido de canola Hyola 401, semeado no segundo ano, não apresentou germinação e emergência de plântulas suficientes para avaliação. Uma das hipóteses é a interferência das condições de solo, como a temperatura e umidade do solo. Para a germinação da canola, a faixa de temperatura do solo considerada ideal está entre 15 e 20°C (KONDRA; CAMPBELL; KING, 1983). A temperatura do solo não foi medida, porém a temperatura máxima do ar no período de germinação apresentou média de 26,8°C, e a temperatura do solo descoberto, provavelmente mais elevada (ZHENG; HUNT; RUNNING, 1993), associada a ausência de precipitação pluvial reduziu significativamente o estande de plantas do genótipo Hyola 401, inviabilizando sua avaliação.

A disponibilidade de energia radiante, seguindo curso normal de redução entre os meses de abril e junho, com retomada crescente a partir desse último mês, apresentou valor médio de 15,65 MJ m⁻² d⁻¹, 13,49 MJ m⁻² d⁻¹ e 13,7 MJ m⁻² d⁻¹ para o primeiro, segundo e

terceiro ciclos de produção da canola (Figura 3). A radiação solar global não é um elemento limitante à canola nas condições brasileiras. Os resultados experimentais de Tomm et al. (2008), com canola em baixa latitude (6°58'07" S), indicam que a cultura também não é sensível ao excesso energético. De acordo com Mendham, Shipway e Scott (1981), a eficiência de uso da radiação solar da canola está entre 1,05 e 1,18 g/MJ de radiação solar global, podendo chegar a 1,35 g/MJ, segundo Wright, Smith e Woodroffe (1988).

Figura 3. Precipitação pluviométrica mensal acumulada e radiação solar global média mensal (Rg) durante o período de condução do experimento de consórcio de cana-de-açúcar e canola, de abril de 2015 a abril de 2018.

Para os três anos de estudo a precipitação pluviométrica acumulada durante o período de crescimento da canola (abril-setembro) foi de 154 mm, 323 mm e 227 mm no primeiro, segundo e terceiro ciclo de produção, respectivamente. Apesar da diferença na precipitação pluviométrica entre os três ciclos produtivos, em 2016 a maior parte da precipitação pluviométrica concentrou-se basicamente no mês de junho de 2016, quando os registros totalizaram 169 mm a mais que no mesmo período de 2015 (Figura 3). A precipitação pluviométrica não foi uniformemente distribuída ao longo do ciclo de produção da canola. Do total de precipitação pluviométrica acumulada no ciclo, 64%, em média, concentraram-se entre a emergência e o florescimento.

Em estudo com colza, no Rio Grande do Sul, Westphalen e Bergamaschi (1982) apontaram a necessidade hídrica de 312 mm para o ciclo. Para diferentes híbridos de canola de inverno no Canadá, Thomas (2003) estabeleceu que a demanda hídrica da cultura foi de

325 a 550 mm durante o ciclo. Segundo Robertson e Kirkegaard (2005), a produtividade potencial da canola de primavera é reduzida por valores de precipitação pluvial acumulada inferiores a 450 mm durante o ciclo. O total acumulado de precipitação pluvial registrado nos três ciclos de produção ficou abaixo desses valores. Estudos indicam que a incidência de déficit hídrico, principalmente no período reprodutivo, reduz a produtividade de grãos e afeta a qualidade e quantidade de óleo produzido (ANGADI et al., 2003; SINAKI et al., 2007)

A variação do armazenamento de água no solo evidencia a baixa disponibilidade hídrica, principalmente entre o florescimento e maturação fisiológica da canola, compreendendo o final de junho e o início de setembro (Figura 4).

Figura 4. Armazenamento de água no solo durante o período de condução experimental do consórcio de cana-de-açúcar e canola, de abril de 2015 a abril de 2018.

A precipitação pluvial acumulada durante o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, foi de 1.393 mm, 1.665 mm e 1.010 mm, no primeiro, segundo e terceiro ciclo de produção, respectivamente. Segundo Peres (1988), em uma revisão de valores médios de consumo hídrico, a necessidade hídrica da cana-de-açúcar é alterada pelas condições climáticas, variedade e fase fenológica, podendo variar de 2,3 mm dia⁻¹ a 5,7 mm dia⁻¹. No período de realização do experimento a temperatura média, máxima e mínima do ar e a radiação solar global estiveram próximas das normais climatológicas para a região (ALVARES et al., 2013) e da condição favorável ao crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar (SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006).

2.3.2. Crescimento e Desenvolvimento das Culturas

2.3.2.1. Fenologia dos genótipos de canola

O ciclo dos genótipos de canola e a duração dos subperíodos fenológicos não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos em monocultivo e seus respectivos tratamentos consorciados em cada ano, tanto em número de dias quanto em tempo térmico (Tabela 1).

A duração do ciclo em graus-dia foi dentro do intervalo de 1.157°C d e 1.747°C d relatados por Morrison, Mcvetty e Shaykewich (1989) e Tesfamariam (2004), respectivamente. Entretanto, a elevação da temperatura do ar diminuiu o número de dias para completar o ciclo da canola em 2015, em relação aos demais anos, corroborando com os resultados observados por Luz et al. (2012).

Tabela 1. Número de dias (Nº dias) entre a emergência (EM) e a floração (FLO) /maturação fisiológica (MAT) e soma térmica (ST em °C d) acumulada no ciclo de três genótipos de canola em experimento de consórcio de canola e cana-de-açúcar, no período de 2015 a 2017.

Tratamento	2015			2016			2017		
	EM - FLO	EM - MAT	ST	EM - FLO	EM - MAT	ST	EM - FLO	EM - MAT	ST
	Nº dias	Nº dias		Nº dias	Nº dias		Nº dias	Nº dias	
Canola 401	51	108	1.609						
Canola 401 + cana	44	108	1.624						
Canola 61	51	108	1.609	58	117	1.570	63	116	1.606
Canola 61 + cana	44	108	1.624	58	117	1.570	51	111	1.523
Canola 571							44	109	1.493
Canola 571 + cana							59	117	1.621

2.3.2.2. Índice de área foliar das culturas

Os valores de índice de área foliar (IAF) da canola (Figura 5) assemelharam-se ao IAF relatado por Farré et al. (2002) e Thomas (2003), variando entre 3 e 6. No primeiro ciclo o IAF máximo aproximou-se de 5 para os dois genótipos de canola (Figuras 5A e 5B). Esse valor foi superior e mantido por um período maior que nos demais anos (Figuras 5C, 5D e

5E), explicado pela melhor distribuição da precipitação pluvial e disponibilidade hídrica durante o ciclo em 2015 (Figuras 3 e 4).

De acordo com Chavarria et al. (2011), avaliando o IAF para diferentes espaçamentos e densidade de semeadura de canola no estado do Rio Grande do Sul, o IAF apresentou variações de 1,48, em espaçamento de 17 cm entre linhas e 45 plantas m^{-2} , a até 5,73 em espaçamentos de 68 cm entre linhas e densidade de 60 plantas m^{-2} . Entretanto o IAF máximo da canola no período de início do florescimento, pode chegar a valores superiores a 8 (TESFAMARIAM, 2004).

Figura 5. Índice de área foliar (IAF) da canola Hyola 61 no primeiro, segundo e terceiro ano (A, C, D), da canola Hyola 401 no primeiro ciclo de produção (B) e da canola Hyola 571 no terceiro ciclo de produção (E), em relação ao tempo térmico, cultivada em consórcio e monocultivo, nos anos de 2015 (A, B), 2016 (C) e 2017 (D, E).

Em relação à cana-de-açúcar, no primeiro ciclo de produção, os valores de IAF da cultura em consórcio com canola Hyola 61 e Hyola 401, apresentaram tendência similar, sendo o IAF máximo de 4,11 e 4,10, e ao final do ciclo de 3,86 e 3,61, respectivamente (Figura 6). O IAF da cana-de-açúcar em monocultivo superou os demais tratamentos no início do ciclo e no período de IAF máximo (Figura 6A). A redução do IAF no final do ciclo foi observada em todos os tratamentos, devido a senescência foliar da cultura.

No segundo ciclo de produção o IAF da cana-de-açúcar, em monocultivo, foi superior somente no início do ciclo. Após essa data, 200 dias após o corte da cana-de-açúcar, os tratamentos não mais diferiram entre si. O valor máximo de IAF foi de 6,23 e 6,0 para o tratamento em monocultivo e consorciado com canola Hyola 61, respectivamente. No segundo ciclo de produção não foi observado a redução do IAF ao final do ciclo da cultura (Figura 6B). Esse resultado é atribuído a grande lâmina de precipitação pluvial, de 420 mm durante os meses de abril e maio, superando a normal climatológica para o período, de 236 mm.

Figura 6. Índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar, em monocultivo e consorciada com canola Hyola 61, Hyola 401 e Hyola 571, em relação a dias após o plantio (DAP) em 2015 e 2017 (A e C), e dias após o corte (DAC) em 2016 (B). Valores médios $\pm$ Erro Médio.

Na terceira safra o IAF da cana-de-açúcar em monocultivo não diferiu significativamente dos tratamentos consorciados. Inman-Bamber e Smith (2005) ao avaliarem os efeitos da disponibilidade hídrica à cultura da cana-de-açúcar, observaram valores de IAF máximo entre 4 e 5,5 para plantas com e sem estresse hídrico, respectivamente. Valores estes próximos ao observado no presente estudo. No entanto,

valores superiores foram observados por Meki et al. (2015), em que a maior produtividade de colmos de cana-de-açúcar ocorreu para IAF máximo de 7,5.

2.3.2.3. Massa de matéria seca da parte aérea

Analisando a massa de matéria seca (MS) da parte aérea de canola entre os anos, a Hyola 61 apresentou MS mais elevada no ano de 2016, em relação ao primeiro e terceiro ciclos de produção (Figura 7). A diferença observada entre os ciclos de produção de 2015 e 2017, em relação a 2016, pode ser explicada pela disponibilidade de água à cultura (Figuras 3 e 4), mais favorável principalmente nos dois primeiros meses do ciclo de 2016. Essa condição possibilitou à canola ter um crescimento mais vigoroso, atingindo acumulado final de matéria seca superior ao primeiro e terceiro ciclos (Figura 7C).

Figura 7. Produção de massa de matéria seca (MS) da parte aérea de plantas de canola do genótipo Hyola 61 no primeiro, segundo e terceiro ano (A, C, D), do genótipo Hyola 401 no primeiro ciclo de produção (B) e do genótipo Hyola 571 no terceiro ciclo de produção (E), em monocultivo e em consórcio com cana-de-açúcar, em função da soma térmica, nos anos de 2015, 2016 e 2017.

Bilibio et al. (2011), em estudo sobre o efeito da deficiência hídrica nas plantas de canola em casa de vegetação em Witzenhausen na Alemanha, encontraram valores médios de MS de 51,25 g planta⁻¹ em tratamento sem deficiência hídrica. Quando a cultura foi submetida a deficiência hídrica de 30% e 60%, em relação a ET_c, os dados de MS apresentaram redução

de 18,9% (41,53 g planta⁻¹) e 38,3% (31,6 g planta⁻¹), respectivamente. Esse último dado próximo dos valores obtidos no presente estudo. Já Sanches et al. (2017), ao avaliarem doses de nitrogênio e frequências de irrigação verificaram valores médios de MS de plantas de canola variando entre 18,34 e 23,44 g planta⁻¹, para os tratamentos não irrigados, e valores entre 19,92 e 52,25 g planta⁻¹ para os tratamentos com dose de 60 kg ha⁻¹ de N, condições estas que se aproximam do manejo adotado.

A Produção de MS da parte aérea das plantas dos genótipos Hyola 401, Hyola 61 e Hyola 571, em monocultivo, não diferiram significativamente pelo teste F ($P < 0,05$) dos tratamentos em consórcio, em seus respectivos ciclos de produção.

O crescimento da cana-de-açúcar também foi quantificado pela massa de matéria seca da parte aérea das plantas (MS). No primeiro ciclo, no tratamento com a cana-planta em monocultivo, foram acumulados 388 g planta⁻¹. Nesse mesmo ano, a cana-de-açúcar consorciada com canola Hyola 401 atingiu 370 g planta⁻¹ e o tratamento consorciado com a Hyola 61 acumulou 338 g planta⁻¹. No segundo ciclo de produção, com a cana-soca, a MS final das plantas em monocultivo foi de 901 g planta⁻¹ e no tratamento consorciado com a Hyola 61 foi de 918 g planta⁻¹ (Figura 8).

Os resultados de MS de cana-de-açúcar da terceira safra foram bastante próximos àqueles obtidos no primeiro ano. Entretanto, nessa safra, a cana-de-açúcar em monocultivo teve acúmulo de biomassa superior no período inicial, em relação aos demais tratamentos (Figura 8C).

O corte mais tardio e as condições climáticas favoráveis na segunda safra são responsáveis pela diferença na MS entre os anos. Na análise individual por safra não houve diferença significativa na MS por planta entre os tratamentos de cana-de-açúcar em consórcio e monocultivo pelo teste F ($P < 0,05$).

Em relação aos resultados apresentados por Oliveira et al. (2007), a produção de MS de cana-de-açúcar variou entre 615 e 860 g planta⁻¹ para as variedades RB855536 e RB72454, respectivamente. Os resultados da cana-de-açúcar em monocultivo do primeiro e terceiro ano foram 47% e 66,5% inferior, enquanto dados do segundo ano experimental extrapolaram o referencial em 22%. Essas diferenças mostram, além das diferenças meteorológicas de cada ano, o efeito da colheita precoce da cana-de-açúcar variedade RB867515, indicando a necessidade de ajuste do material genético para incrementar a produção de massa de matéria seca por planta e consequentemente a produção e qualidade em sistema consorciado com canola.

Figura 8. Massa de matéria seca (MS) da parte aérea de plantas de cana-de-açúcar nos sistemas de monocultivo e consorciada com canola Hyola 61, Hyola 401 e Hyola 571, em relação a dias após o plantio (DAP) em 2015 e 2017 (A e C), e dias após a colheita (DAC) em 2016 (B). Valores médios $\pm$ erro médio.

2.3.2.4. Produtividade das culturas

A produtividade média de grãos dos híbridos de canola ficou dentro da média brasileira do período experimental, que foi de 1.281 kg ha⁻¹ (CONAB, 2017a). Os resultados (Tabela 2) estão de acordo com diversos estudos de canola em diferentes regiões do Brasil (TOMM et al., 2008; KRÜGER et al., 2011; SANCHES et al., 2017). Embora a produtividade da canola tenha sido superior no sistema de monocultivo para as três safras avaliadas, estatisticamente não houve diferença entre os sistemas de produção pelo teste F ($P < 0,05$), indicando potencial de utilização da canola em sistemas consorciados com a cana-de-açúcar (Tabela 2).

Tabela 2. Produtividade de colmos de cana-de-açúcar e de grãos de canola por hectare, em monocultivo e consórcio, nos ciclos de produção de 2015, 2016 e 2017 e Eficiência de Uso da Terra (EUT) para os respectivos tratamentos e anos de cultivo.

2015			
Tratamento	Produtividade (kg ha⁻¹)		EUT
	Cana-de-açúcar	Canola	
Cana-de-açúcar	74.317,4.a	-	
Cana-de-açúcar + Hyola 401	63.845,2.a	1.055.a	1,81
Cana-de-açúcar + Hyola 61	74.250,0.a	1.168.a	1,74
Canola Hyola 401	-	1.105.a	
Canola Hyola 61	-	1.567.a	
2016			
Tratamento	Produtividade (kg ha⁻¹)		EUT
	Cana-de-açúcar	Canola	
Cana-de-açúcar	117.000,1.a	-	
Cana-de-açúcar + Hyola 61	111.000,5.a	1.226.a	1,83
Canola Hyola 61	-	1.386.a	
2017			
Tratamento	Produtividade (kg ha⁻¹)		EUT
	Cana-de-açúcar	Canola	
Cana-de-açúcar	55.957,7.a	-	
Cana-de-açúcar + Hyola 61	51.026,0.a	1.045.a	1,86
Cana-de-açúcar + Hyola 571	52.738,7.a	1.026.a	1,87
Canola Hyola 61	-	1.095.a	
Canola Hyola 571	-	1.107.a	

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste F ($P < 0,05$).

O rendimento de colmos de cana-de-açúcar no primeiro ano foi similar a média de produtividade do estado de São Paulo, de 77.500 kg ha⁻¹ (CONAB, 2017b). Já no segundo ano, a cana-soca produziu mais de 110.000 kg ha⁻¹, basicamente em função das melhores condições meteorológicas, com 300 mm a mais de precipitação pluvial que a primeira safra (Figura 3) e ao atraso da colheita, aumentando o ciclo de produção para 408 dias.

Em 2015 a produtividade de cana-de-açúcar nos consórcios com Hyola 401 e Hyola 61 foi 14,1% e 0,09% menor que no monocultivo, respectivamente. No segundo ano a produtividade de colmos foi 5,12% menor no consórcio e no terceiro ano o consórcio com Hyola 571 e Hyola 61 apresentou produtividade de colmos 5,76% e 8,8% inferior ao monocultivo, respectivamente. Kaur, Bhullar e Gill (2016), ao avaliarem a consorciação de

cana-de-açúcar com canola, obtiveram valor de produtividade de colmos de -6,12% a +0,9% em consorciação, em relação ao monocultivo. No entanto, apesar das diferenças em produtividade de colmos entre os tratamentos em consorciação e monocultivo, não houve diferença significativa pelo teste F ($P < 0,05$) em seus respectivos anos de avaliação. Portanto, pode se inferir que não há efeito direto das plantas de canola no crescimento da cana-de-açúcar, indicando a viabilidade fitotécnica de produção de cana-de-açúcar em consorciação com canola.

O índice de uso eficiente da terra (EUT) dos sistemas consorciados, superiores a unidade, evidenciam a capacidade de intensificar a produção agrícola através do sistema de produção proposto e analisado. Em média, os sistemas consorciados foram 79,3% mais eficientes no uso da terra do que o sistema em monocultivo, expressando o melhor aproveitamento dos recursos ambientais em relação ao sistema monocultivo (ANDREWS; KASSAM, 1976).

Os resultados das análises qualitativas apontaram teor médio de óleo nos grãos de canola Hyola 61 de 31%, e de 28,8% no genótipo Hyola 401. Valores inferiores ao teor médio de 38% relatado por Tomm (2007), evidenciando um provável efeito negativo da deficiência hídrica (Figura 3) e da temperatura do ar elevada no período reprodutivo (Figura 2) (SINAKI et al., 2007). Segundo Bouchereau et al. (1996), a deficiência hídrica limita a disponibilidade de carboidratos na planta para a síntese de óleo e acelera o ciclo da cultura, reduzindo o número de dias para acúmulo de óleo nos grãos.

As análises qualitativas da cana-de-açúcar colhida, na primeira e segunda safra, indicaram efeito indireto do sistema de consorciação com canola, uma vez que, para possibilitar a semeadura da canola dentro do período indicado pelo zoneamento agroclimático em abril da segunda safra, foi necessário colher a cana-de-açúcar precocemente. Dessa forma, a variedade RB867515 apresentou características indesejáveis à usina na primeira safra (FERNANDES, 2000) (Figura 9).

No primeiro ano de produção, 2015, a cultura apresentou valores de POL no colmo (sacarose aparente) inferior a 14, valores de pureza inferiores a 85%, porcentagem de açúcares redutores (AR) maior que 0,8%, e proporções de ATR (Açúcares redutores totais) menores que 15%. No segundo ano de cultivo, o atraso na colheita teve influência positiva, com resultados dentro das faixas recomendadas para o processamento em usina (Figura 9).

Figura 9. Resultado das análises tecnológicas dos tratamentos de cana-de-açúcar, em monocultivo e consorciado com canola Hyola 61 e Hyola 401, nos ciclos de produção de 2015 (A) e 2016 (B). Teor de sacarose aparente na cana-de-açúcar (Pol colmo), porcentagem de sólidos solúveis do caldo (Brix), relação entre pol/brix x 100 (Pureza), Açúcares redutores (AR), açúcares redutores totais (ATR), teor de fibra no colmo (Fibra), teor de açúcares redutores na cana-de-açúcar (ARC).

A análise de componentes principais evidenciou baixa influência dos tratamentos consórcio e monocultivo para ambas as culturas, uma vez que os tratamentos foram agrupados em função do ano agrícola e não da consorciação (Figura 10). Dessa forma, a variabilidade na produção de MS e produtividade de cana-de-açúcar e canola podem ser atribuídas às condições climáticas de cada safra. Esse resultado, mais uma vez, evidencia a potencialidade de consorciação do sistema cana-de-açúcar e canola para as condições de Piracicaba-SP.

Figura 10. Análise de componentes principais da massa de matéria seca da parte aérea (MS) e produtividade (Prod) de cana-de-açúcar (A) e canola (B). 2015/16 foi utilizado o genótipo de cana-de-açúcar RB867515 e 2017 o genótipo RB966928.

2.4. CONCLUSÃO

A produção de canola em monocultivo mostrou-se viável na região de Piracicaba, SP. Para maximizar a produção de grãos, o momento da semeadura deve considerar efeitos térmicos negativos, em início de ciclo, e de deficiência hídrica em meio e final de produção.

O sistema de consorciação de cana-de-açúcar e canola mostrou-se capaz de intensificar o uso da terra.

Em razão da baixa disponibilidade hídrica a partir de abril, recomenda-se a semeadura de canola em entrelinhas de cana-de-açúcar de maturação precoce.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. World agriculture towards 2030/2050. **Land Use Policy**, v. 20, n. 4, p. 375, 2012.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. In: **FAO**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. p. 300.
- ALLISON, J. C. S.; PAMMENTER, N. W.; HASLAM, R. J. Why does sugarcane (*Saccharum sp. hybrid*) grow slowly? **South African Journal of Botany**, v. 73, n. 4, p. 546–551, 1 nov. 2007.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- ALVIM, K. R. de T.; BRITO, C. H. de; BRANDÃO, A. M.; GOMES, L. S.; LOPES, M. T. G. Quantificação da área foliar e efeito da desfolha em componentes de produção de milho. **Ciência Rural**, v. 40, n. 5, p. 1017–1022, maio 2010.
- ANDREWS, D. J.; KASSAM, A. H. The importance of multiple cropping in increasing world food supplies. In: **AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY (ASA)**. **Multiple cropping systems**. Madison: American Society of Agronomy, 1976. p. 1–10.
- ANGADI, S.; CUTFORTH, H.; MCCONKEY, B.; GAN, Y. Yield Adjustment by Canola Under Different Plant Populations in the Semiarid Prairie. **Crop Science**, v. 43, p. 1358–1366, 2003.

- BILIBIO, C.; CARVALHO, J. de A.; HENSEL, O.; RICHTER, U. Effect of different levels of water deficit on rapeseed (*Brassica napus* L.) crop. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 4, p. 672–684, ago. 2011.
- BOUCHEREAU, A.; CLOSSAIS-BESNARD, N.; BENSAOUD, A.; LEPORT, L.; RENARD, M. Water stress effects on rapeseed quality. **European Journal of Agronomy**, v. 5, n. 1–2, p. 19–30, 1 out. 1996.
- BRASIL. **Regras para análise de sementes**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009.
- BRUINSMA, J. **The resource outlook to 2050: By how much do land, water use and crop yields need to increase by 2050?** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009.
- CHAVARRIA, G.; TOMM, G. O.; MULLER, A.; MENDONÇA, H. F.; MELLO, N.; BETTO, M. S. Índice De Área Foliar Em Canola Cultivada Sob Variações De Espaçamento E De Densidade De Semeadura. **Ciência Rural**, v. 41, n. 12, p. 2084–2089, 2011.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: primeiro levantamento**. Safra 2017/18, Brasília, v. 5, p. 1-114, 2017a.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana: segundo levantamento**. Safra 2017/18, Brasília, v. 4, n. 2, 2017b.
- CONSECANA. **Manual de instruções**. 5. ed. Piracicaba: Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar, Álcool do Estado de São Paulo, 2006.
- DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. Efeitos da água no rendimento das culturas. **Estudos FAO: irrigação e drenagem**, 33, p. 212, 1994.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. rev. Embrapa, 2013.
- FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT**, 2017. Disponível em: <www.faostat.org>.
- FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2017. Building resilience for peace and food security**. Rome FAO, 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-I7695e.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2018.
- FARRÉ, I.; ROBERTSON, M. J.; WALTON, G. H.; ASSENG, S. Simulating phenology and yield response of canola to sowing date in Western Australia using the APSIM model. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 53, n. 10, p. 1155–1164, 2002.
- FERNANDES, A. C. **Cálculos na Agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba: STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos, 2000.

- FREITAS, R. E.; MENDONÇA, M. A. A. de; FREITAS, R. E.; MENDONÇA, M. A. A. de. Expansão Agrícola no Brasil e a Participação da Soja: 20 anos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 54, n. 3, p. 497–516, set. 2016.
- GEETHA, P.; SIVARAMAN, K.; TAYADE, A. S.; DHANAPAL, R. SUGARCANE BASED INTERCROPPING SYSTEM AND ITS EFFECT ON CANE YIELD. **Journal of Sugarcane Research**, n. July 2017, 2015.
- GILMORE, E. C.; ROGERS, J. S. Heat Units as a Method of Measuring Maturity in Corn1. **Agronomy Journal**, v. 50, n. 10, p. 611, 1 out. 1958.
- INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2–3, p. 185–202, 2005.
- IRIARTE, L. B.; VALETTI, O. E. **Cultivo de Colza**. Buenos Aires. Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária – INTA, 2008.
- KAMKAR, B.; DANESHMAND, A. R.; GHOOSHCHI, F.; SHIRANIRAD, A. H.; SAFAHANI LANGEROUDI, A. R. The effects of irrigation regimes and nitrogen rates on some agronomic traits of canola under a semiarid environment. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 1005–1012, 1 abr. 2011.
- KAUR, N.; BHULLAR, M. S.; GILL, G. Weed management in sugarcane-canola intercropping systems in northern India. **Field Crops Research**, v. 188, p. 1–9, 2016.
- KONDRA, Z. P.; CAMPBELL, D. C.; KING, J. R. TEMPERATURE EFFECTS ON GERMINATION OF RAPESEED (*Brassica napus* L. AND *B. campestris* L.). **Canadian Journal of Plant Science**, v. 63, n. 4, p. 1063–1065, out. 1983.
- KRÜGER, C. A. M. B.; SILVA, J. A. G. da; MEDEIROS, S. L. P.; DALMAGO, G. A.; SARTORI, C. O.; SCHIAVO, J. Arranjo de plantas na expressão dos componentes da produtividade de grãos de canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 11, p. 1448–1453, 2011.
- KUTCHER, H. R.; WARLAND, J. S.; BRANDT, S. A. Temperature and precipitation effects on canola yields in Saskatchewan, Canada. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 2, p. 161–165, 2010.
- LUZ, G. L. da; MEDEIROS, S. L. P.; TOMM, G. O.; BIALOZOR, A.; AMARAL, A. D. do; PIVOTO, D. Temperatura base inferior e ciclo de híbridos de canola. **Ciência Rural**, v. 42, n. 9, p. 1549–1555, set. 2012.
- MEKI, M. N.; KINIRY, J. R.; YOUKHANA, A. H.; CROW, S. E.; OGOSHI, R. M.; NAKAHATA, M. H.; TIRADO-CORBALÁ, R.; ANDERSON, R. G.; OSORIO, J.;

- JEONG, J. Two-Year Growth Cycle Sugarcane Crop Parameter Attributes and Their Application in Modeling. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 4, p. 1310, 4 fev. 2015.
- MENDHAM, N. J.; SHIPWAY, P. A.; SCOTT, R. K. The effects of delayed sowing and weather on growth, development and yield of winter oil-seed rape (*Brassica napus*). **The Journal of Agricultural Science**, v. 96, n. 02, p. 389, 27 abr. 1981.
- MEURER, I. Estudo de diferentes métodos na estimativa da curva de retenção da água no solo. 2014. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade de São Paulo Escola Superior de “ Agricultura Luiz de Queiroz ”.
- MORETTO, E.; FETT, R. **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais na indústria de alimentos**. 1. ed. São Paulo: Varela, 1998.
- MORRISON, M. J.; MCVETTY, P. B. E.; SHAYKEWICH, C. F. THE DETERMINATION AND VERIFICATION OF A BASELINE TEMPERATURE FOR THE GROWTH OF WESTAR SUMMER RAPE. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 69, n. 2, p. 455–464, abr. 1989.
- OLIVEIRA, R. A. De; DAROS, E.; LUIS, J.; ZAMBON, C.; WEBER, H.; IDO, O. T.; BESPALHOK-FILHO, J. C.; ZUFFELLATO-RIBAS, K. C.; KELLY, D. Área Foliar Em Três Cultivares De Cana-De-Açúcar E Sua. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 2, p. 71–76, 2007.
- PARSONS, M. J. Successful Intercropping of Sugarcane. **Proc S Afr Sug Technol Ass**, v. 7, p. 77–98, 2003.
- PERES, F. C. **Determinação dos coeficientes de cultura (Kc) da cana-de-açúcar: ciclo de cana soca**. 1988. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1988.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria. R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>
- RAIJ, B. V.; 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.
- RASEDUZZAMAN, M.; JENSEN, E. S. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. **European Journal of Agronomy**, v. 91, p. 25–33, 1 nov. 2017.

- RASOOL, A.; FAROOQ, M. A.; ZUBAIR, M.; JAMIL, M.; AHMAD, S.; AFGHAN, S. Prospects of intercropping rabi crops in autumn planted sugarcane. **Pakistan Sugar Journal**, v. 26, p. 2–5, 2011.
- ROBERTSON, M. J.; HOLLAND, J. F.; CAWLEY, S.; POTTER, T. D.; BURTON, W.; WALTON, G. H.; THOMAS, G. Growth and yield differences between triazine-tolerant and non-triazine-tolerant cultivars of canola. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 53, n. 6, p. 643, 2002.
- ROBERTSON, M. J.; KIRKEGAARD, J. A. Water use efficiency of dryland canola in an equi-seasonal rainfall environment. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 56, p. 1373–1386, 2005.
- ROBERTSON, S. M.; JEFFREY, S. R.; UNTERSCHULTZ, J. R.; BOXALL, P. C. Estimating yield response to temperature and identifying critical temperatures for annual crops in the Canadian prairie region. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 93, n. 6, p. 1237–1247, 2013.
- ROODAGI, L. I.; ITANAL, C. J.; KANDAGAVE, R. B. Better intercrops and planting methods for higher and sustained yield of sugarcane in north Karnataka. **Bharatiya Sug**, v. 25, p. 21–26, 2000.
- SANCHES, A. C.; GOMES, E. P.; PEREIRA, E.; AZEVEDO, G. Canola yield under different irrigation frequencies and nitrogen levels in the Brazilian Cerrado. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 4, p. 367–377, 2017.
- SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (ORG. . (Ed.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP2, 2006. p. 415.
- SINAKI, J. M.; HERAVAN, E. M.; RAD, A. H. S.; NOORMOHAMMADI, G.; ZAREI, G. The effects of water deficit growth stages of canola (*Brassica napus* L.). **American Eurasian Journal Agricultural & Environment Science**, v. 2, n. 4, p. 417–422, 2007.
- SOUSA, H. H. de F. Fluxo preferencial de água no solo pela aplicação da equação de Darcy-Buckingham e do método do balanço de água no solo. 2014. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade de São Paulo Escola Superior de “ Agricultura Luiz de Queiroz ”.
- TESFAMARIAM, E. H. **Modelling the soil water balance of Canola (*Brassica napus* L.)** (**Hyola 60**). 2004. University of Pretoria, 2004.

- THOMAS, P. The Grower's manual. **Winnipeg: Canola Council of Canada**, 2003.
Disponível em: <http://www.canolacouncil.org/canola_growers_manual.aspx>.
- THORNTWHAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publication in Climatology**, v. Laboratory, n. 1, 1955.
- TOMM, G. . Indicativos tecnológicos para a produção de canola no Rio Grande do Sul. v. Passo Fund, n. (Embrapa Trigo. Sistema de produção, 4), p. 68, 2007.
- TOMM, G. O. **Desempenho de genótipos de canola em Goiás, em 2004**Passo Fundo: Embrapa Trigo (Comunicado técnico online, 118), 2004.
- TOMM, G. O.; RAPOSO, R. W. C.; SOUZA, T. A. F. de; OLIVEIRA, J. T. de L.; RAPOSO, E. H. S.; SILVA NETO, C. P. da; BRITO, A. C.; NASCIMENTO, R. de S.; RAPOSO, A. W. S.; SOUZA, C. F. **Desempenho de genótipos de canola (Brassica napus L.) no Nordeste do estado da Paraíba**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, (Embrapa Trigo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Online, 65), 2008.
- VAN DEN BERG, M.; NEUMANN, K.; VAN VUUREN, D. P.; BOUWMAN, A. F.; KRAM, T.; BAKKES, J. Exploring resource efficiency for energy, land and phosphorus use: Implications for resource scarcity and the global environment. **Global Environmental Change**, v. 36, p. 21–34, 2016.
- WESTPHALEN, S. L.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração da colza (Brassica napus L.) através de evapotranspirômetros “tipo Thornthwaite”. In: REUNIÃO ANUAL DE PROGRAMAÇÃO DE PESQUISA E ASSISTÊNCIA TÉCNICA DA COLZA, **Anais...**Porto Alegre. Resultados de Pesquisa... Porto Alegre: Instituto de Pesquisa Agronômica, 1982.
- WRIGHT, G. C.; SMITH, C. J.; WOODROOFE, M. R. The effect of irrigation and nitrogen fertilizer on rapeseed (Brassica napus) production in South-Eastern Australia. **Irrigation Science**, v. 9, n. 1, p. 1–13, fev. 1988.
- ZHENG, D.; HUNT, E. R.; RUNNING, S. W. A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications. **Climate Research**, v. 2, p. 183–191, 1993.

3. EFICIÊNCIA DE INTERCEPTAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NO CONSÓRCIO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CANOLA

RESUMO

A consorciação de culturas agrícolas é capaz de aumentar a produtividade agrícola ao intensificar o aproveitamento da terra e dos recursos ambientais. A eficiência de uso da radiação solar é um dos principais fatores responsáveis pela vantagem produtiva e econômica dos consórcios em relação aos monocultivos. O presente estudo investigou os efeitos da consorciação de canola com cana-de-açúcar no coeficiente de extinção da radiação fotossinteticamente ativa (k), na eficiência de interceptação (ϵ_{int}) e na eficiência de uso da radiação (EUR) pela cana-de-açúcar em três anos agrícolas, em Piracicaba (SP). O experimento foi delineado em blocos casualizados com 4 repetições e 5 tratamentos: cana-de-açúcar + canola Hyola 61; cana-de-açúcar + canola Hyola 401 ou Hyola 571; cana-de-açúcar monocultivo; canola Hyola 61 monocultivo; canola Hyola 401. O coeficiente de extinção (k) da cana-de-açúcar foi reduzido nos tratamentos em consórcio com a canola, em 4%. A média de EUR da cana-de-açúcar consorciada foi de 3,10 g MJ⁻¹, enquanto no monocultivo foi de 2,99 g MJ⁻¹. A ϵ_{int} média dos sistemas consorciados, durante as safras, foi 4,8% superior ao monocultivo de cana-de-açúcar. Esses resultados indicam que a cana-de-açúcar consorciada com canola pode promover o aumento da produção agrícola por meio da utilização mais eficiente da energia solar.

Palavras-chave: Eficiência de uso da radiação; Coeficiente de extinção da radiação; Consorciação de culturas; *Saccharum* spp L.; *Brassica napus* L.

ABSTRACT

The intercropping in agriculture is capable of increasing yield by enhancing the use of land and environmental resources. The solar radiation use efficiency is one of the main factors responsible for the productive and economic advantage of the intercropping in relation to monoculture. The present study investigated the effects of canola and sugarcane intercropped system on the extinction coefficient of photosynthetically active radiation (k), the interception efficiency (ϵ_{int}) and the radiation use efficiency (RUE) on sugarcane in three growing seasons in Piracicaba (SP). The experiment was designed in a randomized complete block with 4 replicates and 5 treatments: sugarcane + canola Hyola 61; sugarcane + canola Hyola 401 or Hyola 571; sugarcane monoculture; canola Hyola 61 monoculture; canola Hyola 401 or Hyola 571 monoculture. The extinction coefficient (k) of sugarcane was reduced in the treatments intercropped with canola, by 4%. The average RUE of intercropped sugarcane was 3.10 g MJ⁻¹, while in the monoculture it was 2.99 g MJ⁻¹. The mean ϵ_{int} of the intercropped

systems, during the growing seasons, was 4.8% higher than the monoculture sugarcane. These results indicate that sugarcane intercropped with canola can promote increased production through more efficient use of solar energy.

Keywords: Solar radiation use efficiency; Extinction coefficient; Intercropping; *Saccharum* spp L.; *Brassica napus* L.

3.1. INTRODUÇÃO

Os processos fisiológicos, rendimento e qualidade da produção das plantas são determinados pela quantidade de radiação solar absorvida, que por sua vez, é dependente da estrutura da copa da planta e interceptação da energia radiante (PILAU; ANGELOCCI, 2015). A interação entre a radiação solar e o dossel das plantas está relacionada ainda às trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera e, portanto, determinam as condições microclimáticas dos cultivos agrícolas (CAMPBELL; NORMAN, 1998).

A interceptação da radiação solar pelas plantas depende da arquitetura e densidade de folhas no dossel, assim como das propriedades ópticas da vegetação e da relação entre radiação direta e difusa (SINCLAIR; SHIRAIWA; HAMMER, 1992; RADIN et al., 2003). A fração da radiação transmitida pelo dossel vegetativo é determinante para o estabelecimento dos fatores bióticos na superfície do solo. Esse contexto é ainda mais importante em sistemas agrícolas que apresentam momentos com ausência ou quase ausência de folhas devido à dormência natural ou condições ambientais adversas, como nas culturas caducifólias e na cana-de-açúcar. Nesses momentos de ausência da folhagem há incremento na transmitância da radiação solar, favorecendo o crescimento natural de plantas daninhas ou de culturas intercalares (SINCLAIR; MUCHOW, 1999; PILAU; ANGELOCCI, 2015).

Ao conjugar duas ou mais espécies, com desenvolvimento fenológico coincidentes no tempo, formam-se estratos vegetais, naturalmente disputando pelos recursos, principalmente radiação solar. As plantas do estrato dominante têm crescimento distinto, interceptando a maior fração da energia radiante (AWAL; KOSHI; IKEDA, 2006). Assim, plantas do estrato inferior são diretamente influenciadas pelo sombreamento, por vezes exigindo adaptações morfofisiológicas (DEINUM et al., 1996; PACIULLO et al., 2007).

A atenuação da radiação solar pelos estratos do dossel das espécies consorciadas também causa alterações micrometeorológicas, ao condicionar a partição entre calor sensível e, conseqüentemente afetar a resposta térmica do crescimento e desenvolvimento da cultura do estrato inferior, calor latente e a capacidade produtiva do sistema (PEZZOPANE; PEDRO

JÚNIOR; GALLO, 2007; PILAU; ANGELOCCI, 2016). Em relação ao sombreamento e redução da temperatura do solo e do ar no interior dos consórcios, a proporção desse efeito acaba minimizada quando as espécies consorciadas apresentam crescimentos temporalmente distintos.

Em regiões tropicais a agricultura enfrenta maior variabilidade climática, ocorrência de pragas, doenças e plantas daninhas (PATERNIANI, 2001). No entanto, a regular disponibilidade de energia solar ao longo do ano, sobretudo nas estações de outono-inverno, é uma vantagem em relação às demais áreas de produção, em latitudes maiores (MONTEITH, 1972; ROSENZWEIG; LIVERMAN, 1992). Por isso, sistemas agrícolas tropicais poderiam se caracterizar por maior eficiência de produção.

Em razão do exposto, o presente estudo determinou os efeitos da consorciação de canola com cana-de-açúcar no coeficiente de extinção (k), na eficiência de interceptação (ε_{int}) e na eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa (EUR) da cana-de-açúcar.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Local do experimento

O experimento foi conduzido na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (22° 41' 42" S; 47° 38' 28" O e 520 m de altitude) nos anos agrícolas 2015/16, 2016/17 e 2017/18.

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é o Cwa, com chuvas concentradas no verão e inverno seco (ALVARES et al., 2013). A temperatura média anual é de 22,3°C, precipitação pluvial média anual de 1.347 mm e radiação solar global média de 16,4 MJ m⁻² d⁻¹.

O solo da área é classificado como Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico (EMBRAPA, 2013). As características químicas das amostras do solo da área do experimento: 51 g dm⁻³ de matéria orgânica; 5,7 de pH em CaCl₂; 66,7 mg dm⁻³ de P; 6,07; 0,0; 75,3; 41,3 e 16,2 mmol_(c) dm⁻³ de K, Al, Ca, Mg e H+Al, respectivamente.

3.2.2. Delineamento experimental

O experimento foi delineado em blocos casualizados com 4 repetições e 5 tratamentos: cana-de-açúcar (RB867515) + canola (Hyola 61); cana-de-açúcar (RB867515) + canola (Hyola 401 ou Hyola 571); cana-de-açúcar (RB867515); canola (Hyola 61); e canola (Hyola 401 ou Hyola 571). No segundo ciclo de cultivo não foi possível avaliar os tratamentos com canola Hyola 401. No terceiro ciclo alterou-se este genótipo pelo Hyola 571, e a variedade de cana-de-açúcar para RB966928 (genótipo precoce), mantendo os demais tratamentos iguais aos anos anteriores.

As parcelas de cana-de-açúcar em monocultivo eram compostas de 5 linhas de plantio com 10 m de comprimento, espaçadas em 1,4 m. As parcelas de canola em monocultivo tinham 10 linhas de semeadura com 5 m de comprimento, espaçadas em 0,4 m. As parcelas experimentais referentes aos consórcios foram constituídas de 5 linhas de cana-de-açúcar com 10 metros de comprimento, e nas entrelinhas da cana-de-açúcar foram semeadas 3 linhas de canola espaçadas em 0,4 m entre si.

Na primeira safra as avaliações do consórcio e monocultivo foram conduzidas em cana planta. A segunda safra quantificou a primeira rebrota da cana-de-açúcar, portanto, em cana-soca. Para a terceira safra a cana-de-açúcar foi novamente plantada, assim avaliando a produção de cana planta.

Para a instalação do experimento, em janeiro de 2015, o solo foi manejado com aração e gradagem, e aplicação de calcário dolomítico ($2,0 \text{ ton ha}^{-1}$) para a correção do pH, conforme dados da análise química do solo e indicações do Boletim 100 IAC (RAIJ et al., 1997).

O plantio da cana-de-açúcar foi realizado no dia 20 de abril de 2015 e 23 de abril de 2017, em sulcos com profundidade de 0,3-0,4 m, espaçados em 1,4 m entre linhas. Nos sulcos foram depositados colmos de cana-de-açúcar da variedade RB867515 (primeira safra) e RB966928 (terceira safra) com 12 a 18 gemas por metro. A adubação de plantio para cana-de-açúcar foi de 50 kg ha^{-1} de N e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Adubação nitrogenada de cobertura foi realizada no mês de dezembro, em todos os anos de produção, aplicando 100 kg ha^{-1} de N na forma de uréia. No primeiro ano, as parcelas de cana-de-açúcar foram colhidas mecanicamente em 19 de abril de 2016. No segundo e terceiro ciclo da cana-de-açúcar a colheita foi manual, apenas das amostras utilizadas para determinação da produção, realizadas em 31 de maio de 2017 e 10 de abril de 2018, respectivamente.

A semeadura dos genótipos de canola Hyola 61 e Hyola 401 foi manual, adotando-se densidade de sementes para alcançar a densidade de 40 plantas m^{-2} . Tanto em consórcio quanto em monocultivo a canola foi semeada entre os dias 24 e 28 de abril de 2015 no primeiro ciclo de produção, logo após o plantio da cana. A colheita ocorreu entre 28 de agosto e 4 de setembro do mesmo ano. No segundo ciclo de produção, o híbrido de canola Hyola 61 foi semeado entre 8 e 10 de maio de 2016, com colheita em 12 de setembro de 2016. Nesse ano, a baixa germinação das parcelas experimentais do genótipo de canola Hyola 401 não permitiu a sua avaliação em monocultivo e consórcio com cana-de-açúcar. Em 2017 a semeadura dos genótipos de canola Hyola 61 e Hyola 571 (substituindo a Hyola 401) em consórcio foi em 28 de abril com colheita em 24 de agosto. A semeadura em monocultivo foi em 3 de maio com colheita em 4 de setembro.

A adubação de base para canola foi depositada nas linhas, de acordo com a análise química do solo e as indicações para a cultura da canola (TOMM, 2007). Foram adicionados 30 kg ha^{-1} de N e 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 na semeadura e 30 kg ha^{-1} de N em cobertura (à lanço) quando as plantas apresentavam quatro folhas. Plantas daninhas foram controladas manualmente. Não foram registradas doenças e pragas.

3.2.3. Coleta de dados

Para as medições da radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA_i) e da fração transmitida pelo dossel vegetal (RFA_τ) foram utilizados sensores lineares quânticos (SQ-326-SS, *Apogee instruments*), com 0,5 m de comprimento, contendo 6 pontos de medições. Para as medições, foram instalados um sensor a céu aberto fora das parcelas experimentais, a 1,5 m acima da superfície do solo (RFA_i) e mais um sensor por tratamento (RFA_τ) alocados perpendicularmente as linhas de cultivo, nivelados e suportados a 5 cm acima do solo por duas bases metálicas.

Os sensores quânticos foram ligados a *dataloggers* (CR1000, Campbell Sci.), programadas para medir a cada 10 segundos, armazenando médias de RFA a cada 15 minutos.

A radiação solar global, temperatura do ar e a precipitação pluvial foram medidas no Posto Meteorológico “Professor Jesus Marden dos Santos” do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP, distante 100 m das parcelas experimentais. Essas medições foram realizadas em mesma frequência, com médias armazenadas a cada 15 minutos.

Análises biométricas para mensuração da massa de matéria seca da parte aérea (MS) e índice de área foliar (IAF) foram realizadas ao longo do ciclo das culturas, em intervalos de aproximadamente 7-10 dias para canola e mensalmente, a partir do perfilhamento, para a cana-de-açúcar. Para a biometria foram coletadas 5 plantas por tratamento, para cana-de-açúcar, sendo as coletas realizadas aleatoriamente dentro de cada parcela, excluindo as bordas. As avaliações de canola foram realizadas amostrando todas as plantas contidas em 0,5 m de linha de cultivo, sendo coletadas em locais distintos das parcelas ao longo do ciclo.

Para determinar a MS o material vegetal foi acondicionado em sacos de papel para secagem em estufa de ventilação forçada a 65°C e posteriormente pesado. A área foliar foi obtida por meio de imagem digitalizada das folhas e convertida em IAF, conforme metodologia de Alvim et al. (2010).

3.2.4. Eficiência de interceptação (ϵ_{int}), coeficiente de extinção (k) e eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa (EUR)

A radiação fotossinteticamente interceptada (K^*) pelo dossel vegetal foi calculada a partir das medidas da radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA_i) e a fração transmitida ($RFA\tau$) pelos dosséis vegetais (Equação 1).

$$K^* = RFA_i - RFA\tau \quad (1)$$

A eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (ϵ_{int}) foi determinada a partir do quociente entre a radiação fotossinteticamente ativa interceptada (K^*) e a total incidente (RFA_i) sobre o dossel (Equação 2):

$$\epsilon_{int} = \frac{K^*}{RFA_i} \quad (2)$$

Com os valores médios de eficiência de interceptação (ϵ_{int}) da RFA e do índice de área foliar (IAF), o coeficiente de extinção (k) do dossel foi estimado, a partir da Teoria de Monsi & Saeki, com base nos pressupostos da lei de Beer, a partir da Equação 3 (HIROSE, 2005):

$$\ln(1 - \varepsilon_{int}) = -k \cdot IAF \quad (3)$$

A eficiência de uso da radiação (EUR) foi determinada pelo quociente entre a massa de matéria seca da parte aérea (MS) e a RFA interceptada pelo dossel vegetativo (K^*) da cultura, conforme Equação 4.

$$EUR = \frac{MS}{K^*} \quad (4)$$

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Caracterização meteorológica

A temperatura média do ar e a precipitação pluvial acumulada diária ficaram próximas a normal climatológica da região. Com destaque para a segunda safra de 2016 que apresentou valores de temperatura média do ar inferiores aos demais anos no período de inverno (Figura 1). No primeiro ciclo de cultivo, no período de produção da canola, a temperatura média do ar variou entre 15,2°C e 24,6°C. No segundo ciclo de produção, também para canola, a temperatura média do ar variou entre 10,4°C e 24,4°C, e no terceiro ano de produção da canola a temperatura média do ar durante o ciclo foi dos 13,8°C a 24,1°C.

A precipitação pluvial acumulada durante o ciclo da cana-de-açúcar foi de 1.393 mm, 1.665 mm e 1.010 mm, na primeira, segunda e terceira safra, respectivamente. No período de crescimento da canola, de abril a setembro, a precipitação pluvial foi de 154 mm, 323 mm e 227 mm em 2015, 2016 e 2017, respectivamente. O valor de precipitação pluvial da normal climatológica de 1985 a 2014 para a região é de 1.340 mm, enquanto que para o período de crescimento da canola (abril-setembro) é de 195 mm. Apesar da diferença na precipitação pluvial entre os três ciclos produtivos, em 2016 a maior parte da precipitação pluvial concentrou-se basicamente no mês de junho de 2016, quando os registros totalizaram 169 mm a mais que no mesmo período de 2015. A precipitação pluvial não foi uniformemente distribuída ao longo do ciclo de produção da canola, sendo a maior parte de sua ocorrência no período anterior ao florescimento da canola, em média, 64%.

Figura 1. Temperatura média do ar (Tmed) diária e precipitação pluvial (Prec. pluvial) diária durante o período de condução experimental do consórcio de cana-de açúcar e canola, 2015 a 2018, Piracicaba-SP.

A radiação solar global (Rg) e a radiação fotossinteticamente ativa (RFAi) seguiram curso normal de redução entre os meses de abril e junho, com retomada crescente na primavera-verão (Figura 2).

Figura 2. Radiação solar global (Rg) diária e Radiação fotossinteticamente ativa (RFA) diária no período de condução experimental do consórcio de cana-de açúcar e canola, 2015 a 2018, Piracicaba-SP.

A R_g média no período de crescimento da canola foi de 16,03, 12,8 e 13,5 MJ m⁻² dia⁻¹ para o primeiro, segundo e terceiro ciclo de produção. Para a cana-de-açúcar esses valores foram 18,9, 17,8 e 18,07 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente.

3.3.2. Desenvolvimento temporal do índice de área foliar e da interceptação da RFA

No sistema de cana-de-açúcar em monocultivo o IAF teve rápido incremento inicial em comparação aos tratamentos consorciados, atingindo valores de IAF superiores nas primeiras avaliações, entre os meses de julho a setembro (Figura 3). Já nos consórcios, ao interceptar a radiação solar incidente e consequentemente minimizar o aporte energético e aquecimento do solo, a canola interferiu no crescimento inicial da cana-de-açúcar, que expressou atraso de evolução do IAF, possivelmente efeito da menor temperatura do solo, atrasando a soma térmica para a cana-de-açúcar. Oliveira et al. (2001) relataram diminuição da temperatura do solo em experimento com palha sobre o solo em relação ao tratamento sem cobertura na cana-de-açúcar. A presença da canola pode ser considerada análoga à da cobertura com palha em alterar o balanço de energia e diminuir o fluxo de calor no solo, o que consequentemente resulta em diminuição da soma térmica. Stone, Sorensen e Jamieson (1999), ao estudarem o efeito da temperatura do solo na cultura do milho, observaram atraso no desenvolvimento foliar e fenológico com a diminuição da temperatura do solo.

Posteriormente, a cana-de-açúcar consorciada atingiu valores de IAF similares ao tratamento em monocultivo no final do ciclo, quando ambos os sistemas de produção, pós-colheita da canola, incluíam somente a cultura da cana-de-açúcar. O IAF nos tratamentos de cana-de-açúcar seguiu tendência similar dentro dos mesmos ciclos de produção, evidenciando a maior influência das variáveis meteorológica de cada ano do que dos tratamentos.

O valor máximo de IAF da cana-de-açúcar se deu no mês de março no primeiro e terceiro ciclo de cultivo (Figura 3). No segundo ciclo, com uma condição meteorológica mais favorável, com temperatura e 300 mm a mais de precipitação pluvial que a primeira safra, além do atraso na colheita, aumentando o ciclo de produção para 408 dias, a duração do IAF máximo foi prolongada até o mês de maio (Figura 3B).

Figura 3. Índice de área foliar (IAF) de cana-de-açúcar, em monocultivo e consorciada, e de canola consorciada durante o período de condução experimental, primeiro (A), segundo (B) e terceiro (C) ciclo de produção, Piracicaba-SP.

A eficiência de interceptação (ϵ_{int}) da RFA, média dos três ciclos de produção, refletiu as diferenças de IAF observadas entre os tratamentos de cana-de-açúcar, no período inicial do ciclo (Figura 4). Para a cana-de-açúcar em monocultivo, a ϵ_{int} da RFA teve acelerado incremento e atingiu 90% de interceptação da RFA antes da cana-de-açúcar consorciada, basicamente em razão do maior incremento inicial em área foliar.

A cana-de-açúcar em monocultivo, na média dos ciclos, atingiu o valor de ϵ_{int} da RFA igual a 0,9 entre o final de novembro e início de dezembro. Para a cana-de-açúcar em consorciação com canola atingir esse valor de ϵ_{int} foram necessários, em média, 20 dias a mais, em razão da competição com a canola.

Assim como observado em outros cultivos ou sistemas de produção, valores de IAF entre 2,5 e 3,0 para a cultura da cana-de-açúcar, coincidindo com o mês de dezembro para ambos sistemas de produção, definem uma ϵ_{int} de pelo menos 90% (PENGELLY; BLAMEY; MUCHOW, 1999; RADIN et al., 2003; WANG et al., 2015)

Apesar da cana-de-açúcar no tratamento em monocultivo apresentar maior eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (ϵ_{int}), da brotação, em meados de julho, ao mês de fevereiro, no tratamento consorciado a canola ocupa o espaço da entrelinha e aproveita o período de latência da cana-de-açúcar com elevada ϵ_{int} da RFA (Figura 4). A ϵ_{int} da RFA do ciclo da oleaginosa e a recuperação observada no final do ciclo para a cana-de-açúcar são os momentos em que o sistema consorciado se sobressai no uso desse recurso em relação ao monocultivo.

Figura 4. Eficiência de interceptação (ϵ_{int}), média de três safras agrícolas, da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) de cana-de-açúcar em monocultivo e consorciada com canola durante os meses do ano, Piracicaba-SP.

A ϵ_{int} média do sistema consorciado, durante as safras, foi 4,8% superior ao monocultivo de cana-de-açúcar. Em média diária o sistema consorciado resultou em ϵ_{int} de 0,743 ao longo do ano, enquanto no monocultivo, pela quase completa ausência de cobertura vegetal do solo pelo período de quase 60 dias, a ϵ_{int} média diária anual foi de 0,709, apontando para uma implicação benéfica direta, muito bem associada à proteção do solo (BARTON et al., 2004).

3.3.3. Coeficiente de extinção luminosa do dossel

O coeficiente de extinção da RFA (k) para cana-de-açúcar em monocultivo foi de 0,74, ligeiramente acima do obtido para a cana-de-açúcar que foi consorciada, de 0,71 (Figura 5). Muchow et al. (1994) ao avaliarem o k em cana-de-açúcar plantada no outono e sob irrigação na Austrália, encontraram valor médio do k da RFA de 0,38. Ferreira Junior et al. (2013), ao avaliarem a influência do espaçamento duplo e simples no coeficiente k de cana-de-açúcar, no nordeste brasileiro, relataram valores de k da RFA variando entre 0,48 e 0,51. Estudos de modelagem de cana-de-açúcar reportaram valores de k de 0,69 e 0,73, para cultivares do México e Brasil, respectivamente (MARIN; JONES, 2014; BAEZ-GONZALEZ et al., 2017), esses similares aos encontrados (Figura 5).

Figura 5. Coeficiente de extinção para radiação fotossinteticamente ativa (RFA) em função do índice de área foliar (IAF) de cana-de-açúcar em monocultivo (A) e consorciada com canola (B), média de três safras agrícolas de 2015 a 2017, Piracicaba-SP.

A diferença no coeficiente k entre consórcio e monocultivo é consistente com outros estudos de consorciação. Gao et al. (2010) observaram valores de “ k ” inferiores no consórcio (0,51), em relação ao monocultivo (0,59), ao avaliarem o coeficiente k da soja consorciada com milho em Shangqiu na China. O mesmo ocorreu para o consórcio entre milho e amendoim, em que a cultura do amendoim sombreada apresentou valor de k de 0,49 enquanto o monocultivo exibiu coeficiente k de 0,59 (AWAL; KOSHI; IKEDA, 2006). Segundo os mesmos autores, o menor valor de k para a cultura do amendoim consorciado ocorreu em razão do efeito do sombreamento do milho, sendo que a cultura do amendoim alterou a

estrutura do seu dossel como estratégia para interceptar a menor quantidade de radiação solar disponível.

3.3.4. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa

A eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa (EUR) média para a cana-de-açúcar, observada nos três anos de cultivo, foi de $2,99 \text{ g MJ}^{-1}$ de RFA no sistema monocultivo e $3,10 \text{ g MJ}^{-1}$ de RFA no sistema consorciado (Figura 6). A ϵ_{int} da cana-de-açúcar de ambos os sistemas, a partir de novembro, com o início das chuvas e intenso crescimento, foi similar. A diferença entre valores de ϵ_{int} (Figura 4) ou, diretamente dos valores de K^* , registrados entre plantio e/ou rebrota e o mês de novembro, teve pouca influência na formação de biomassa. Ao final do ciclo, esse adicional de ϵ_{int} do monocultivo não resultou em maior valor de EUR, já que a maior interceptação da radiação no monocultivo durante o período seco não resultou em acúmulo de biomassa superior ao consórcio, caracterizando vantagem do consórcio em relação a EUR.

Figura 6. Relação entre a produção de massa de matéria seca acumulada (MS) e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada acumulada (K^*) da cana-de-açúcar em monocultivo (A) e consorciada com canola (B), durante três safras agrícolas de 2015 a 2017, Piracicaba-SP.

A EUR superior no consórcio também pode estar relacionada ao menor valor do coeficiente k em relação ao monocultivo. Nessa situação, o dossel vegetativo produz maior quantidade de biomassa por quantidade de RFA interceptada (AWAL; KOSHI; IKEDA, 2006).

Padrão similar foi determinado no consórcio entre milho e amendoim, em que a cultura consorciada condicionada ao estrato inferior do dossel (amendoim), apresentou valores superiores de EUR em relação ao seu respectivo monocultivo (AWAL; KOSHI; IKEDA, 2006). O aumento da ε_{int} da RFA e da EUR no sistema consorciado de milho e soja em relação ao monocultivo foi observado por Liu et al. (2017). Ferreira Junior et al. (2015) observaram valores de EUR entre 2,73 e 2,78 g MJ⁻¹ para cana-de-açúcar cultivada em diferentes espaçamentos no nordeste do Brasil. Ramanujam e Venkatarama (1999) quantificaram a EUR de RFA para 14 genótipos de cana-de-açúcar e observaram que os valores médios durante o ciclo podem variar entre 1,86 a 2,86 g MJ⁻¹. Segundo os mesmos autores, a EUR foi variável ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, entre 0,85 g MJ⁻¹ no estabelecimento inicial, e 4,93 g MJ⁻¹ no período de crescimento máximo das plantas.

3.4. CONCLUSÃO

A cana-de-açúcar tolerou o sombreamento pela consorciação com a canola, expressando crescimento vigoroso após a colheita da oleaginosa.

A consorciação da cana-de-açúcar com a canola foi capaz de intensificar a eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- ALVIM, K. R. de T.; BRITO, C. H. de; BRANDÃO, A. M.; GOMES, L. S.; LOPES, M. T. G. Quantificação da área foliar e efeito da desfolha em componentes de produção de milho. **Ciência Rural**, v. 40, n. 5, p. 1017–1022, maio 2010.
- AWAL, M. A.; KOSHI, H.; IKEDA, T. Radiation interception and use by maize/peanut intercrop canopy. **Handbook of Environmental Chemistry, Volume 5: Water Pollution**, v. 139, n. 1–2, p. 74–83, 2006.
- BAEZ-GONZALEZ, A.; KINIRY, J.; MEKI, M.; WILLIAMS, J.; ALVAREZ-CILVA, M.; RAMOS-GONZALEZ, J.; MAGALLANES-ESTALA, A.; ZAPATA-BUENFIL, G. Crop

- Parameters for Modeling Sugarcane under Rainfed Conditions in Mexico. **Sustainability**, v. 9, n. 8, p. 1337, 31 jul. 2017.
- BARTON, A. P.; FULLEN, M. A.; MITCHELL, D. J.; HOCKING, T. J.; LIU, L.; WU BO, Z.; ZHENG, Y.; XIA, Z. Y. Effects of soil conservation measures on erosion rates and crop productivity on subtropical Ultisols in Yunnan Province, China. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 104, p. 343–357, 2004.
- CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **An Introduction to Environmental Biophysics**. 2. ed. New York, NY: Springer New York, 1998.
- DEINUM, B.; SULASTRI, R. D.; ZEINAB, M. H. J.; MAASSEN, A. Effects of light intensity on growth, anatomy and forage quality of two tropical grasses (*Brachiaria brizantha* and *Panicum maximum* var. *trichoglume*). **NJAS wageningen journal of life sciences**, v. 44, n. 2, p. 111–124, 1 jun. 1996.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. rev. ampl. Embrapa, 2013.
- FERREIRA JUNIOR, R. A.; DE SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; ESCOBEDO, J. F.; SANTOS, M. V. C. Energy conversion efficiency in sugarcane under two row spacings in northeast of Brazil. **Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 1919, n. 88, 2015.
- FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, J. L. de; TEODORO, I.; ARAÚJO NETO, R. A. de; SILVA, M. B. P. da; ESCOBEDO, J. F. Coeficiente de extinção da luz em cana-de-açúcar irrigada em alagoas. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 4, n. 2, p. 55–60, 2013.
- GAO, Y.; DUAN, A.; QIU, X.; SUN, J.; ZHANG, J.; LIU, H.; WANG, H. Distribution and use efficiency of photosynthetically active radiation in strip intercropping of maize and soybean. **Agronomy Journal**, v. 102, n. 4, p. 1149–1157, 2010.
- HIROSE, T. Development of the Monsi-Saeki theory on canopy structure and function. **Annals of botany**, v. 95, n. 3, p. 483–94, fev. 2005.
- LIU, X.; RAHMAN, T.; YANG, F.; SONG, C.; YONG, T.; LIU, J.; ZHANG, C.; YANG, W. PAR Interception and Utilization in Different Maize and Soybean Intercropping Patterns. **PloS one**, v. 12, n. 1, p. e0169218, 2017.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 1, p. 1–16, fev. 2014.
- MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v. 9, p. 747–766, 1972.
- MUCHOW, R.; SPILLMAN, M.; WOOD, A.; THOMAS, M. Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 45, n. 1, p. 37, 1994.

- OLIVEIRA, J. C. M.; TIMM, L. C.; TOMINAGA, T. T.; CÁSSARO, F. A. M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; DOURADO-NETO, D.; DE S. CÂMARA, G. M. Soil temperature in a sugar-cane crop as a function of the management system. **Plant and Soil**, v. 230, n. 1, p. 61–66, 2001.
- PACIULLO, D. S. C.; CARVALHO, C. A. B. de; AROEIRA, L. J. M.; MORENZ, M. J. F.; LOPES, F. C. F.; ROSSIELLO, R. O. P. Morfofisiologia e valor nutritivo do capim-braquiária sob sombreamento natural e a sol pleno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 4, p. 573–579, abr. 2007.
- PATERNIANI, E. Agricultura sustentável nos trópicos. **Estudos Avançados**, v. 15, n. 43, p. 303–326, dez. 2001.
- PENGELLY, B. C.; BLAMEY, F. P. C.; MUCHOW, R. C. Radiation interception and the accumulation of biomass and nitrogen by soybean and three tropical annual forage legumes. **Field Crops Research**, n. 2, p. 99–112, 1999.
- PEZZOPANE, J. R. M.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; GALLO, P. B. Caracterização microclimática em cultivo consorciado café/banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 256–264, jun. 2007.
- PILAU, F. G.; ANGELOCCI, L. R. Área foliar e interceptação de radiação solar pela copa de uma laranjeira. **Bragantia**, v. 74, n. 4, p. 476–482, 2015.
- PILAU, F. G.; ANGELOCCI, L. R. Padrões de interceptação de radiação solar por cafeeiros em função da área foliar. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 127–136, 2016.
- RADIN, B.; BERGAMASCHI, H.; REISSER JUNIOR, C.; BARNI, N. A.; MATZENAUER, R.; DIDONÉ, I. A. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 9, p. 1017–1023, set. 2003.
- RAIJ, B. V.; 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.
- RAMANUJAM, T.; VENKATARAMANA, S. Radiation interception and utilization at different growth stages of sugarcane and their influence on yield. **Indian Journal of Plant Physiology**, v. 4, n. 4, p. 85–89, 1999.
- ROSENZWEIG, C.; LIVERMAN, D. PREDICTED EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON AGRICULTURE: A Comparison of Temperate and Tropical Regions. **Global climate change: Implications, challenges, and mitigation measures**. The Pennsylvania Academy of Sciences: Pennsylvania, 1992.

- SINCLAIR, T. R.; MUCHOW, R. C. Radiation Use Efficiency. **Advances in Agronomy**, v. 65, p. 215–265, 1 jan. 1999.
- SINCLAIR, T. R.; SHIRAIWA, T.; HAMMER, G. L. Variation in Crop Radiation-Use Efficiency with Increased Diffuse Radiation. **Crop Science**, v. 32, n. 5, p. 1281, 1992.
- STONE, P. J.; SORENSEN, I. B.; JAMIESON, P. D. Effect of soil temperature on phenology, canopy development, biomass and yield of maize in a cool-temperate climate. **Field Crops Research**, v. 63, n. 2, p. 169–178, 1999.
- TOMM, G. . Indicativos tecnológicos para a produção de canola no Rio Grande do Sul. v. Passo Fund, n. (Embrapa Trigo. Sistema de produção, 4), p. 68, 2007.
- WANG, Z.; ZHAO, X.; WU, P.; HE, J.; CHEN, X.; GAO, Y.; CAO, X. Radiation interception and utilization by wheat/maize strip intercropping systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 204, p. 58–66, 2015.

4. CALIBRAÇÃO DO MODELO APSIM-CANOLA PARA AMBIENTE DE CLIMA TROPICAL NO BRASIL

RESUMO

No Brasil, a quase totalidade da produção de canola se restringe às áreas do Sul, basicamente Rio Grande do Sul e Paraná por questão climática. Resultados de produção em regiões de clima tropical ainda são limitados, incipientes para analisar o potencial dessa oleaginosa em áreas de baixa latitude, não tradicionais de produção. A capacidade de produção de canola em clima tropical seria alternativa à expansão do cultivo no Brasil. Resultados experimentais de canola em área de clima tropical permitiriam a calibração e uso de modelos baseados em processos, ferramentas eficientes para estudar o efeito climático sobre a produção. O objetivo desse estudo foi calibrar e avaliar o modelo APSIM-Canola, para o genótipo Hyola 61, utilizando dados experimentais de quatro safras agrícolas. Os experimentos foram conduzidos de 2015 a 2017, em Piracicaba (SP), e avaliaram a massa de matéria seca da parte aérea (MS), índice de área foliar (IAF), produtividade de grãos e duração dos estádios fenológicos durante o ciclo da canola. Após a calibração dos parâmetros genéticos e de solo, o modelo apresentou bons resultados na predição das variáveis da planta, com bom desempenho dos índices estatísticos. O modelo APSIM-Canola explicou entre 73% e 99% da variação de MS e IAF. A estimativa da produtividade de grãos apresentou raiz do erro quadrático médio (REQM) entre 220 kg ha⁻¹ e 527 kg ha⁻¹. No entanto, o modelo subestimou todas as variáveis analisadas. Os resultados das simulações de longo prazo evidenciaram variação significativa na produtividade de grãos entre os anos em função da variabilidade climática em Piracicaba (SP). A simulação da produtividade potencial média da cultura para a região sob irrigação foi de 3.041 kg ha⁻¹ e em sequeiro de 1.026 kg ha⁻¹.

Palavras-chave: Simulação de canola; Produtividade potencial; Ambiente tropical; Variabilidade climática; Datas de semeadura

ABSTRACT

In Brazil, almost all canola production is restricted to the southern areas, basically Rio Grande do Sul and Paraná due to climatic conditions. Production data in regions of tropical climate are still limited, incipient to analyze the potential of this oleaginous in non-traditional production areas of low latitude. The production capacity of canola in a tropical climate would be an alternative to the expansion of cultivation in Brazil. Experimental data of canola in a tropical climate area would allow the calibration and use of process-based crop models, efficient tools to study the climatic effect on the production. The objective of this study was to calibrate and evaluate the APSIM-Canola model, for the Hyola 61 genotype, using experimental data from four growing seasons. The experiments

were conducted from 2015 to 2017 in Piracicaba (SP), and evaluated the shoot dry matter mass (SDM), leaf area index (LAI), grain yield and duration of phenological stages during the canola growing seasons. After calibration of the genetic and soil parameters, the model presented good results in the prediction of plant variables, with good performance of the statistical indices. The APSIM-Canola model explained between 73% and 99% of the variation of SDM and LAI. The grain yield estimate showed root mean squared error (RMSE) between 220 kg ha⁻¹ and 527 kg ha⁻¹. However, the model underestimated all variables analyzed. The results of the long-term simulations showed a significant variation in grain yield between the years due to climatic variability in Piracicaba (SP). The simulated average potential yield of the irrigated crop for the region was 3,041 kg ha⁻¹ and 1,026 kg ha⁻¹ in rainfed condition.

Keywords: Canola simulation; Yield potential; Tropical environment; Climate variability; Sowing time

4.1. INTRODUÇÃO

A canola, terceira oleaginosa mais produzida no mundo, pertence à Família *Brassicaceae* e foi desenvolvida a partir do melhoramento genético convencional da colza. Típica de regiões de Clima Temperado, apresenta em torno de 38% de óleo e 25% de proteínas nos grãos. O óleo pode ser utilizado para produção de biodiesel e alimentação humana. No Brasil a principal espécie cultivada é a canola de primavera *Brassica napus* L. Var. oleífera (TOMM et al., 2009).

Conforme o 1º Levantamento – Safra 2017/18 da Companhia Nacional de Abastecimento, a produção de canola na safra 2017 foi de 61,6 mil toneladas, em uma área de 48,1 mil ha, com produtividade média de 1.281 kg ha⁻¹, produzindo 14,3% menos grãos que na safra 2016, basicamente por questões meteorológicas adversas – excesso de chuva e geada (CONAB, 2017). Essa produção se concentra no Centro-Sul do Brasil, especialmente nos estados do Rio Grande do Sul e Paraná, em razão das condições climáticas.

No Brasil, dificuldades tecnológicas ainda impedem a expansão do cultivo. Os principais entraves estão relacionados à identificação de locais, épocas de semeadura e manejo (semeadura, controle de pragas, doenças, plantas daninhas e colheita mecanizada) (TOMM et al., 2009). Além disso, outro obstáculo é a adaptação das variedades e/ou híbridos disponíveis, não desenvolvidos para as condições nacionais de cultivo mas sim adaptados (TOMM, 2000; MELGAREJO et al., 2014). Apesar das dificuldades, a possibilidade de expandir o cultivo da canola para áreas agrícolas de baixa latitude, a exemplo do que ocorreu com a cultura da soja (ALMEIDA et al., 1999), é considerada fundamental para ampliar sua

produção nacional (TOMM, 2004). A tropicalização da canola para novas áreas agrícolas representa importante alternativa para a rotação de culturas com as espécies de verão.

A viabilidade da produção de canola em regiões de clima tropical, ainda em início de avaliação, já foi evidenciada em alguns estudos (TOMM, 2004; VASCONCELOS et al., 2012; SANCHES et al., 2017). Para o município de Areia, estado da Paraíba, Tomm et al. (2008) avaliaram a produtividade de grãos dos genótipos Hyola 43, Hyola 60, Hyola 61, Hyola 401, Hyola 432, Hyola 411, Hyola 433, I4403 e H4815 de canola. Com ciclo de produção de 90 a 113 dias e condições meteorológicas de 519 mm acumulados de chuva e temperatura média entre 21,2 °C e 23,7 °C, as produtividades foram similares às obtidas na região Sul do Brasil, de 1.494 kg ha⁻¹ a 2.268 kg ha⁻¹.

Dentro da perspectiva de tropicalização e definição das regiões edafoclimáticas apropriadas, os modelos de simulação de crescimento e desenvolvimento de culturas baseados em processos tornam-se um importante instrumento para esse fim (FARRÉ et al., 2002; WANG et al., 2012; GEORGE; KAFFKA, 2017). Os modelos de culturas integrados em sistemas de suporte à tomada de decisão agrônômica possibilitam avaliar sistemas de produção, simular diferentes manejos de plantas, quantificar os impactos climáticos futuros, e prever e monitorar safras, facilitando as simulações de projetos de aprimoramento do uso dos recursos naturais, e até mesmo de programas de melhoramento vegetal (HEINEMANN; STONE; SILVA, 2010).

A plataforma de simulação *Agricultural Production Systems Simulator* (APSIM) (KEATING et al., 2003) integra alguns dos mais importantes modelos de culturas mundialmente utilizados. A partir de seus módulos, formados por algoritmos e equações dependentes de variáveis da planta, solo e dados meteorológicos, permite ao usuário simular o crescimento e desenvolvimento da planta, analisar o manejo e compreender a dinâmica de nitrogênio e água no solo. No APSIM encontra-se um módulo dedicado especialmente à canola (ROBERTSON; LILLEY, 2016). Originalmente as condições edafoclimáticas, manejo e variedades nele descritas são distintas das empregadas no Brasil. Portanto, para o adequado funcionamento do modelo é necessário calibrá-lo às condições locais (JAME; CUTFORTH, 1996).

A calibração do modelo APSIM-Canola foi realizada na Austrália e na China, com resultados satisfatórios, simulando adequadamente a fenologia e produtividade da cultura (FARRÉ et al., 2002; HE et al., 2017a). Na Austrália, o modelo foi validado, principalmente com dados de canola de primavera, em mais de 250 pontos (ROBERTSON et al., 1999; ROBERTSON; LILLEY, 2016). Mais recentemente o APSIM-Canola foi testado com

cultivares de canola de inverno na China (WANG et al., 2012) e Alemanha (HOFFMANN; JACOBS; WHITBREAD, 2015).

Da mesma forma, busca-se calibrar e avaliar o modelo APSIM-Canola para uma condição brasileira de produção, em área de clima tropical. Com o modelo ajustado, também avaliar o potencial produtivo da canola frente a variabilidade climática de Piracicaba-SP.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1. Descrição do modelo APSIM-Canola

O modelo APSIM-Canola simula o crescimento, desenvolvimento, rendimento de grãos e acúmulo de nitrogênio da canola, por unidade de área e tempo. Para sua utilização requer dados meteorológicos diários [radiação solar global (Rg), temperatura do ar máxima (Tmax) e mínima (Tmin) e precipitação pluvial], parâmetros de solo e definição de cultivar. Informações de adubação, manejo e irrigação no sistema também podem ser incluídos para simulações (KEATING et al., 2003). A calibração do modelo consiste em alterar os coeficientes genéticos do genótipo e parâmetros de solo para adequar as simulações às condições locais de cultivo. Uma descrição geral do modelo APSIM-Canola pode ser encontrada em Robertson e Lilley (2016).

4.2.2. Parâmetros genéticos da cultura

Na plataforma APSIM os parâmetros genéticos de cada espécie são derivados de um modelo genérico de plantas com adaptações, podendo ainda, apresentar distinção em coeficientes genéticos para genótipos dentro da mesma espécie. A fenologia da cultura no APSIM-Canola é dividida em fases. A duração de cada uma é definida por tempo térmico ($^{\circ}\text{C d}$), conforme temperatura basal inferior (0°C) e superior (35°C). Do período de emergência ao final do vegetativo o modelo considera o efeito vernalizante. No final da fase vegetativa há também um período de sensibilidade fotoperiódica, dependente do genótipo.

A área foliar é descrita por funções de surgimento, expansão e senescência foliar (ROBERTSON et al., 2002). A interceptação de radiação solar pela planta é determinada pelo índice de área foliar e pelo coeficiente de extinção da radiação solar. A partir da eficiência de

uso da radiação solar global da cultura ($1,35 \text{ g MJ}^{-1}$), o modelo simula o acúmulo potencial de biomassa acima do solo, limitada também pela disponibilidade hídrica (ROBERTSON et al., 2002; ROBERTSON; LILLEY, 2016).

A mesma abordagem é usada para simular a produção de grãos, considerando o índice de colheita (HI), particionamento e retranslocação de carbono entre os órgãos da planta (ROBERTSON et al., 2002).

4.2.3. Parâmetros de solo

A plataforma APSIM contém cadastro de solos da Austrália, e algumas informações para Bangladesh, Indonésia, África do Sul, Estados Unidos. Devido à ausência de informações de solos para o Brasil foi necessário a construção de um solo no APSIM modificando seus principais parâmetros. Os principais parâmetros capacidade de campo (DUL), ponto de murcha permanente (LL15), ponto de saturação de água (SAT), profundidade do solo (PROF), densidade do solo (BD), teor de carbono orgânico (OC), condutividade hidráulica saturada (KS) foram ajustados, assim como parâmetros que agrupam planta-solo, como o valor mínimo de umidade do solo em que a raiz da cultura extrai água (canolaLL) (Tabela 1).

Tabela 1. Valores dos parâmetros de solo da área experimental inseridos na plataforma APSIM para diferentes camadas do perfil do solo (PROF). Ponto de murcha permanente (LL15), capacidade de campo (DUL), ponto de saturação (SAT), taxa máxima de extração de água pelas raízes (canola KL), condutividade hidráulica saturada (KS), densidade do solo (BD), teor de carbono orgânico (OC), teor de argila (ARG), teor de silte (SIL), teor de areia (ARE), pH em água (PHA).

PROF	LL15	DUL	SAT	Canola KL	KS	BD	OC	ARG	SIL	ARE	PHA
cm	-----mm mm ⁻¹ -----				mm dia ⁻¹	g cm ⁻³	-----%-----				
Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico											
0-26	0,249	0,338	0,494	0,06	161	1,48	1,33	48,8	18,8	32,2	6,0
26-52	0,306	0,363	0,457	0,06	38	1,40	1,33	60,4	11,4	25,1	6,0
52-85	0,306	0,363	0,457	0,04	139	1,40	0,25	60,3	15,0	24,4	6,0
85-114	0,306	0,363	0,457	0,04	139	1,26	0,20	60,3	15,0	24,4	-
114-160	0,231	0,342	0,540	0,02	107	1,17	0,10	56,8	16,9	26,1	-

4.2.4. Dados experimentais

Para calibrar o modelo APSIM-Canola foram utilizados dados experimentais de canola, híbrido Hyola 61. O experimento foi conduzido na área experimental da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP (22° 41' 42" S; 47° 38' 28" O e 520 m de altitude). Segundo a classificação climática de Köppen, o macroclima da região é classificado como Cwa, com chuvas concentradas no verão e período seco de inverno (ALVARES et al., 2013). A temperatura média anual do ar é de 22,3°C, precipitação pluvial média anual de 1.347 mm e radiação solar global média de 16,4 MJ m⁻² d⁻¹. O solo da área é classificado como Nitossolo Vermelho eutrófico latossólico (EMBRAPA, 2013).

As parcelas experimentais utilizadas na calibração foram delineadas em blocos casualizados com 4 repetições. Em cada uma foram semeadas 10 linhas com 5 m de comprimento. O espaçamento entre linhas foi de 0,4 m. Densidade de 40 plantas m⁻². A semeadura foi realizada em 28 de julho de 2017. Parcelas experimentais receberam plena adubação N-P-K (TOMM, 2007), controle de pragas, doenças e plantas daninhas. Análises físico-hídricas foram efetuadas no local do experimento (Tabela 1). Todas as parcelas foram irrigadas por aspersão, com monitoramento contínuo do conteúdo de água no solo pela técnica da reflectometria no domínio da frequência (CS616, Campbell Sci.). A camada mais superficial de solo, com 0,4 m de profundidade, teve a umidade do solo sempre mantida próxima à capacidade de campo (DUL), assegurando integral disponibilidade hídrica à cultura durante o ciclo.

Os dados meteorológicos necessários para executar o APSIM-Canola (radiação solar global, temperatura máxima e mínima diária e precipitação pluvial) foram medidos no Posto Meteorológico "Professor Jesus Marden dos Santos", da ESALQ, distante 50 m das parcelas experimentais.

As avaliações consideraram o monitoramento fenológico semanal, seguindo a escala Cetiom (IRIARTE; VALETTI, 2008), e biometria realizada quinzenalmente. A partir da coleta aleatória de 2 plantas por parcela, totalizando 8 plantas por avaliação, foram determinados o acúmulo temporal de biomassa da parte aérea, o particionamento de biomassa nos órgãos caule, folhas, siliques e grãos, e o índice de área foliar (IAF).

Em estágio de maturação foram colhidas 6 amostras aleatórias, cada uma contando com 2 m de linha de cultivo, para determinação do rendimento de grãos. A umidade dos grãos foi corrigida para 10%.

Para a avaliação do modelo APSIM-Canola foram utilizados dados experimentais independentes provenientes do mesmo híbrido – Hyola 61, coletados nas safras 2015, 2016 e 2017, produzidos em sistema sequeiro, no mesmo sítio experimental. Nessas safras as análises biométricas para determinação da massa de matéria seca da parte aérea (MS) e índice de área foliar (IAF) foram realizadas durante os ciclos de produção da canola, em intervalos 7-10 dias. As avaliações foram realizadas amostrando todas as plantas contidas em 0,5 m de linha de cultivo, sendo coletadas em locais distintos das parcelas ao longo dos ciclos. O delineamento experimental, dimensões das parcelas, instalação e condução da cultura seguiram os procedimentos adotados no experimento utilizado para calibração, conforme descrito anteriormente. As semeaduras, em cada safra, ocorreram nas datas: 25 de abril de 2015, 10 de maio de 2016 e 28 de abril de 2017.

Para a determinação da MS o material vegetal foi acondicionado em sacos de papel para secagem em estufa de ventilação forçada a 65°C e posteriormente pesado. A área foliar foi obtida por imagem digitalizada das folhas e convertida em IAF, segundo metodologia de Alvim et al. (2010).

4.2.5. Calibração e avaliação do modelo

A calibração do modelo APSIM-Canola foi realizada alterando os valores dos parâmetros genéticos do genótipo de canola de ciclo médio ‘*mid*’ (Tabela 2) e de solo (Tabela 1). Os valores dos coeficientes genéticos foram determinados com base nos dados observados experimentalmente, minimizando qualitativamente a raiz do erro quadrático médio (REQM) para massa de matéria seca da parte aérea, IAF e produtividade de grãos. A calibração foi iniciada pela fenologia da cultura, desenvolvimento do dossel e posteriormente ajustando o particionamento de biomassa de plantas sem estresse hídrico, comparando a condição hídrica simulada com a observada.

Alguns parâmetros, não avaliados no presente estudo, foram inseridos no APSIM-Canola de acordo com informações provenientes da literatura. Em função da grande variabilidade entre valores de filocrono dentro de uma mesma espécie (MOOT et al., 2015), utilizou-se os valores de filocrono obtidos por Dalmago et al. (2013), específico para o híbrido de canola Hyola 61. Valores de temperatura basal inferior e superior foram obtidos de Morrison, Mcvetty, Shaykewich (1989) e Meng et al. (2017), respectivamente. Área foliar máxima modificada de acordo com Thomas (2003). Com os parâmetros de solo inseridos no

modelo e os coeficientes genéticos calibrados, foram realizadas simulações com o APSIM-Canola para as três safras agrícolas: 2015, 2016 e 2017.

Tabela 2. Valores otimizados dos parâmetros genéticos no modelo APSIM-Canola para o genótipo Hyola 61 e valores iniciais do genótipo ‘mid’.

Parâmetro	Descrição	Unidade	Valor inicial	Valor calibrado
Y temp	Temperatura basal inferior	°C	0	5 ¹
X temp	Temperatura basal superior	°C	35	30 ²
TT emergence	Tempo térmico da emergência ao período juvenil	°C dia	300	220
TT end juvenile	Tempo térmico do juvenil aos botões florais	°C dia	500	380
TT init flowering	Tempo térmico dos botões florais à abertura floral	°C dia	250	135
TT flowering	Tempo térmico do florescimento ao enchimento de grãos	°C dia	200	170
TT grain filling	Tempo térmico do início do enchimento de grãos ao fim do enchimento de grãos	°C dia	700	300
Node app rate	Taxa de aparecimento de nós de folhas	°C dia nó ⁻¹	75-75- 20-20	36-36- 113-113 ³
Node sen rate	Taxa de senescência de nós de folhas	°C dia nó ⁻¹	60	30
Fr lf sen rate	Fração de folhas senescentes por nó por dia	0-1	0,04	0,07
Hi max pot (HI)	Índice de colheita máximo	0-1	0,30	0,25
Frac leaf	Fração de particionamento de biomassa para as folhas em cada estágio (emerg, juven, inic.flor.)	0-1	0,9-0,7- 0,4	0,8-0,75- 0,65
Grain oil conc	Conteúdo de óleo nos grãos	0-1	0,45	0,35
Grn water content	Conteúdo de água nos grãos	0-1	0,085	0,10
Sla max	Área foliar específica máxima	mm ² g ⁻¹	35000	44000
Sla min	Área foliar específica mínima	mm ² g ⁻¹	10000	11750
Leaf size	Área foliar (Varia em função do número do nó no caule, 1-5-10-16)	mm ²	1000- 2000- 14000- 15000	2000- 7000- 15000- 25000 ⁴

Fonte dados: ¹Temperatura basal inferior 5° C (MORRISON; MCVETTY; SHAYKEWICH, 1989).

²Temperatura basal superior 30° C (MENG et al., 2017). ³Taxa de surgimento de nós de folhas (DALMAGO et al., 2013). ⁴Área foliar máxima (THOMAS, 2003).

4.2.6. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo APSIM

Após a calibração do modelo foi realizada a análise de sensibilidade local. Os parâmetros de entrada foram alterados um a um, mantendo os demais constantes. Foram utilizados 31 parâmetros genéticos e de solo (Apêndice A). A variação dos parâmetros de entrada foi correlacionada a produtividade grãos e MS ao final do ciclo da cultura. Para a

determinação da sensibilidade do modelo, os parâmetros foram submetidos a variações de $\pm 10\%$.

A importância relativa dos parâmetros foi calculada pela sensibilidade absoluta, convertida em sensibilidade relativa (SR) (SALTELLI, 2002). Após a alteração dos parâmetros, aqueles com valores de SR maiores que 0,1 pontos ou menores que -0,1 pontos foram graficamente analisados. Parâmetros com $SR > 0,1$ foram considerados como influência positiva, enquanto os que tiveram $SR < -0,1$ classificados como influência negativa nas variáveis de saída.

4.2.7. Análise estatística do desempenho do modelo

A avaliação do desempenho do modelo APSIM-Canola foi efetuada pelo coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT, 1981), raiz do erro quadrático médio (REQM) e pelo índice de eficiência da modelagem de Nash-Sutcliffe (NSE) (NASH; SUTCLIFFE, 1970). Todas as análises foram conduzidas no programa estatístico R (R CORE TEAM, 2013).

4.2.8. Simulação da resposta produtiva da canola à variação climática

O modelo APSIM-Canola, calibrado e avaliado, foi utilizado para simulação da resposta produtiva da cultura à variação climática de Piracicaba (SP). Para simular as produções sequeiro e irrigada foram usados os dados climáticos históricos de 30 anos (1985-2014).

Simulações consideraram adição de 120 kg ha^{-1} de N no ciclo, a fim de assegurar o pleno crescimento da canola, sem deficiência nutricional.

Para simulação de cultivo irrigado, o APSIM-Canola foi configurado a prover irrigação quando a capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) atingisse valor de 80%, elevando a umidade do solo à capacidade de campo. Simulações de produção em sequeiro contabilizaram apenas a precipitação pluvial, expressando unicamente o efeito climático sobre o crescimento e produção da canola.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1. Caracterização meteorológica

Para os períodos de experimentação (2015-2017), valores médios da temperatura máxima do ar e radiação solar global apresentaram valores próximos a normal climatológica do período de 1985-2014 (Figura 1).

A respeito da temperatura mínima do ar, os valores médios do ano de 2015 superaram os registros médios - normal climatológica ao longo do ciclo da canola (abril-setembro). Para os três anos experimentais, a precipitação pluvial acumulada durante o período de produção da cultura foi de 154 mm, 323 mm e 227 mm, respectivamente no primeiro, segundo e terceiro ciclos de produção. Para essa variável meteorológica, o valor da normal climatológica para Piracicaba (SP) durante o período é de 195 mm.

Figura 1. Média mensal da temperatura mínima (A) e máxima (B) do ar, da Radiação solar global (Rg) (C) e precipitação pluvial acumulada (D) durante os anos de condução experimental e normal climatológica do período de 1985-2014. Piracicaba-SP.

4.3.2. Análise de sensibilidade do modelo

Conforme análise de sensibilidade local dos parâmetros do modelo (Apêndice A), aqueles que apresentaram maior importância relativa para as variáveis de saída foram o DUL e canolaLL, que definem de forma respectiva, a umidade do solo em capacidade de campo e o limite inferior de umidade do solo em que a raiz consegue extrair água (Figura 2).

O DUL regula o volume de armazenamento de água no solo e dessa forma afeta a disponibilidade de água às plantas. O seu aumento em 10% influencia positivamente a produtividade de grãos (Figura 2A) e a MS (Figura 2C). Em contrapartida seu decréscimo em 10% resulta em impacto negativo na produtividade de grãos (Figura 2B) e MS (Figura 2D). O parâmetro canolaLL influenciou ambas as variáveis de saída do modelo de maneira oposta ao DUL, pois define o limite inferior de umidade do solo em que a raiz consegue extrair água. Portanto o acréscimo em 10% neste parâmetro resultou em valor negativo da sensibilidade relativa e vice-versa.

Figura 2. Sensibilidade relativa dos parâmetros do modelo APSIM na produtividade de grãos (A, B) e massa de matéria seca da parte aérea (C, D). Valores maiores que 0 indicam respostas positivas e valores inferiores a 0 indicam respostas negativas. Descrição das siglas no Apêndice A.

Dos parâmetros genéticos relacionados à cultura, o que apresentou maior grau de influência na produtividade de grãos foi o índice de colheita (HI) (Figura 2A e 2B). Embora em menor proporção, a influência do tempo térmico necessário para cumprimento dos estádios fenológicos (TT emergence, TT end juvenile, TT ini flowering, TT flowering e TT grain filling) ocorreu em ambas as variáveis de saída, em função de suas variações tanto positivas como negativas. A importância relativa desses parâmetros é evidenciada na análise de sensibilidade devido aos coeficientes genéticos, que regulam a dinâmica de particionamento de biomassa, absorção de água e nutrientes e nível de estresse da cultura aos fatores ambientais, serem específicos de cada estágio fenológico da cultura.

4.3.3. Simulação da fenologia

O modelo APSIM-Canola apresentou adequado desempenho na simulação da duração do período entre a semeadura e o florescimento. Na média entre os anos, as simulações superestimaram o número de dias entre esses estádios, com REQM de 5,9 dias. Isso deve-se à parametrização inicial do modelo que não considera o rápido crescimento inicial dos genótipos híbridos de canola (ROBERTSON; LILLEY, 2016). A duração do período entre a semeadura e o florescimento simulada no APSIM por Farré et al. (2002), na região da Austrália Ocidental, apresentou valor de REQM de 4,7 dias, valor próximo ao observado por Christy et al. (2013) com REQM de 3,5 dias. Lilley, Bell e Kirkegaard (2015), avaliando a predição do APSIM para a duração do período da semeadura e florescimento na Austrália, observaram valores de REQM de 8,5 e 12,4 dias para genótipos de canola de inverno e de primavera, respectivamente.

A duração total do ciclo simulado da canola, da semeadura à maturação fisiológica, apresentou resultados satisfatórios em comparação com os dados observados, com REQM médio entre os anos avaliados de 5,1 dias. Christy et al. (2013) encontraram valor de REQM de 4,5 dias para a duração total do ciclo da canola. Previsões mais acuradas do desenvolvimento fenológico são importantes quando o particionamento de carbono e o acúmulo de biomassa é dependente de coeficientes genéticos específicos para cada estágio da planta (ROBERTSON; LILLEY, 2016).

4.3.4. Simulação do índice de área foliar

No APSIM-Canola o desenvolvimento foliar é caracterizado pelo surgimento de folhas nos nós do caule. O IAF é estabelecido a partir da simulação do surgimento de folhas, ramificações no caule, tamanho de folhas e área foliar específica. A utilização dos valores calibrados de filocrono (DALMAGO et al., 2013) resultou em bons índices estatísticos (Tabela 3), embora o IAF tenha sido subestimado pelo APSIM em todos os anos avaliados (Figura 3).

Figura 3. Índice de área foliar (IAF) observada (pontos) e simulada pelo APSIM-Canola (linha) para o genótipo Hyola 61 nos anos de 2015 (A), 2016 (B) e 2017 (C), Piracicaba-SP.

A maioria dos estudos com o modelo APSIM-Canola avaliaram a produtividade de grãos ao final do ciclo da cultura (FARRÉ et al., 2002; WANG et al., 2012; HE et al., 2017b). Estudos de simulação do desenvolvimento do IAF pelo APSIM são limitados, entretanto, já

foi relatado a subestimativa dos dados simulados em relação aos observados para alfafa e trigo (MOOT et al., 2015; GAYDON et al., 2017). A subestimativa do IAF simulado para trigo foi atribuída à resposta incorreta da temperatura dos processos fisiológicos implementados no modelo (GAYDON et al., 2017).

Os parâmetros genéticos que regulam a simulação da senescência foliar no APSIM-Canola são a fração de folhas senescentes (folha d^{-1}) e a taxa de senescência de nós ($^{\circ}C d \text{ nó}^{-1}$). Que se iniciam logo após o pleno florescimento, e originalmente, tendem a simular a manutenção das folhas até praticamente o fim do ciclo da cultura. A partir dos dados coletados a campo, a fração de folhas senescentes foi alterada de 0,04 para 0,07 folha d^{-1} e taxa de senescência de nós de $60^{\circ}C d \text{ nó}^{-1}$ para $30^{\circ}C d \text{ nó}^{-1}$, melhorando consideravelmente a comparação entre dados simulados e medidos de IAF (Tabela 3). Esse mesmo valor adotado de taxa de senescência de folhas foi observado por Chen (2013), para as condições de cultivo na China, e também utilizado na calibração por He et al. (2017b) no APSIM-Canola, que resultou em melhoria na predição do IAF pelo modelo, ao simular a diminuição da área foliar no fim do ciclo da cultura, em comparação aos dados observados no final de ciclo.

4.3.5. Simulação da massa de matéria seca da parte aérea

A massa de matéria seca da parte aérea (MS) para o híbrido Hyola 61, na maturação fisiológica, foi subestimada em todos os anos pelo modelo APSIM-Canola (Figura 4). A simulação da MS até 50 dias após a semeadura seguiu os dados observados. A partir desse momento, em todos os anos, o modelo passou a subestimar a produção de MS, tal como ocorrido para IAF (Figura 3).

He et al. (2017b) destacaram a subestimativa do APSIM-Canola para a variável MS em função da parametrização inicial do modelo não considerar o efeito da densidade de plantas nessa variável. Segundo os autores, a simulação com densidade de plantas alta ($60 \text{ plantas m}^{-2}$) utilizando parâmetros derivados de experimento com densidade de plantas mais baixa resultou em subestimativas do modelo. Portanto, esse efeito indica a deficiência do APSIM-Canola em simular a plasticidade fenotípica da produtividade de grãos e biomassa da parte aérea da cultura com a variação da densidade de plantas, como descrito por He et al. (2017b). Uma vez que o modelo não considera o aumento da eficiência de uso da radiação com o aumento da densidade de plantas (WANG et al., 2013; HE et al., 2017b).

O REQM da MS entre valores observados e simulados foi de 910 kg ha⁻¹ a 1.631 kg ha⁻¹, estando de acordo com resultados relatados em outros locais do mundo. Robertson et al. (1999), ao avaliarem a capacidade preditiva do APSIM-Canola para a variável MS ao final do ciclo, com REQM de 1.340 kg ha⁻¹. Kirkegaard et al. (2016), para a mesma variável, obtiveram REQM de 1.510 kg ha⁻¹ entre o valor simulado e observado. Christy et al. (2013) encontraram valor de REQM de 3.750 kg ha⁻¹ para MS no estágio de maturação fisiológica da canola.

Figura 4. Massa de matéria seca da parte aérea (MS) observada (pontos) e simulada pelo APSIM-Canola (linha) para o genótipo Hyola 61 nos anos de 2015 (A), 2016 (B) e 2017 (C), Piracicaba-SP.

O melhor desempenho foi observado para a safra de 2017, principalmente para o IAF, e que consequentemente resultou em melhoria da predição da MS e produtividade de grãos. O IAF é responsável pela interceptação da radiação solar e desse modo afeta diretamente o acúmulo de biomassa da cultura. Dentre as variáveis analisadas, a simulação de MS exibiu resultado inferior às demais, confirmando a necessidade de melhoria dos parâmetros do modelo APSIM-Canola que regulam essa modelagem. Estimativas inconsistentes também abaixo dos valores reais observados foram reportados por He et al.

(2017b), ao simularem MS em alta densidade de plantas com coeficientes de calibração obtidos em experimento de baixa densidade de plantas. Dessa forma os autores evidenciaram a limitação do modelo em considerar a plasticidade fenotípica da canola.

4.3.6. Simulação da produtividade de grãos

A produtividade de grãos de canola do genótipo Hyola 61, embora subestimada pelo modelo APSIM-Canola (Figura 5), apresentou bons resultados estatísticos entre os dados observados e simulados (Tabela 3). A produtividade de grãos é a variável mais avaliada em estudos de simulação de culturas agrícolas, até mesmo com o APSIM-Canola na Austrália (ROBERTSON et al., 1999; FARRÉ et al., 2002; KIRKEGAARD et al., 2016), China (WANG et al., 2012), Alemanha (HOFFMANN; JACOBS; WHITBREAD, 2015) e Estados Unidos (GEORGE; KAFFKA, 2017).

Figura 5. Produtividade de grãos observada (ponto) e simulada pelo APSIM-Canola (linha) para o genótipo Hyola 61 nos anos de 2015 (A), 2016 (B) e 2017 (C), Piracicaba-SP.

A REQM entre a produtividade de grãos observada e simulada variou de 220 kg ha⁻¹ a 527 kg ha⁻¹ (Tabela 3). Robertson e Holland (2004) observaram valores de REQM para produtividade de grãos de 300 kg ha⁻¹, com R² de 0,82. Farré et al. (2002) obtiveram valores de REQM variando entre 300 e 400 kg ha⁻¹ para produtividade de grãos com R² de 0,77.

Na Alemanha, Hoffmann, Jacobs e Whitbread (2015) obtiveram valores observados de produtividade de grãos variando entre 1.300 e 4.800 kg ha⁻¹, média de 3.050 kg ha⁻¹. Segundo os mesmos autores a produtividade de grãos simulada foi de 3.150 kg ha⁻¹, resultando em REQM de 270 kg ha⁻¹. Christy et al. (2013) encontraram valor de REQM de 1.060 kg ha⁻¹ para a produtividade de grãos no sul da Austrália. Wang et al. (2012), avaliando genótipos de canola de inverno no vale Yangtze na China, verificaram produtividade de grãos de 660 a 3.200 kg ha⁻¹. A produtividade de grãos simulada pelo APSIM-Canola, segundo os autores, foi de 2.120 kg ha⁻¹, com REQM de 450 kg ha⁻¹ e R² de 0,75.

Tabela 3. Comparação estatística dos dados observados e simulados pelo modelo APSIM-Canola para o genótipo Hyola 61 nos anos de 2015, 2016 e 2017, Piracicaba-SP. Índice de área foliar (IAF), massa de matéria seca da parte aérea (MS), produtividade de grãos (PROD), Coeficiente de determinação (R²), Raiz do erro quadrático médio (REQM), Índice de concordância de Willmott (d) e eficiência da modelagem de Nash-Sutcliffe (NSE).

Índices estatísticos	APSIM-Canola Hyola 61		
	IAF	MS	PROD
Safra 2015			
R ²	0,82	0,97	-
REQM	0,90	1631	527
d	0,90	0,83	-
NSE	0,65	0,55	-
Safra 2016			
R ²	0,73	0,81	-
REQM	0,72	1157	390
d	0,86	0,81	-
NSE	0,44	0,55	-
Safra 2017			
R ²	0,99	0,95	-
REQM	0,61	910	220
d	0,95	0,92	-
NSE	0,86	0,78	-

A produtividade de grãos de canola em diversas regiões do mundo apresenta consistência entre os dados simulados pelo APSIM-Canola e os dados observados, com REQM entre 270 e 1.060 kg ha⁻¹. O modelo APSIM-Canola explica cerca de 70% da variação observada na produtividade de grãos (ROBERTSON; LILLEY, 2016). O mesmo foi observado no presente estudo para as condições edafoclimáticas de Piracicaba-SP.

4.3.7. Simulação da resposta produtiva da canola à variação climática

Os resultados evidenciaram grande amplitude de resposta às condições climáticas em um cenário de produção de canola dependente da precipitação pluvial, com produtividade de grãos oscilando entre 623 kg ha⁻¹ e 1.777 kg ha⁻¹. A produtividade média para o período analisado de 30 anos foi de 1.026 kg ha⁻¹ em cultivo sequeiro. Já em sistema de produção irrigada a produtividade média dos 30 anos foi de 3.041 kg ha⁻¹, com menor variação interanual (Figura 6).

Figura 6. Simulação da produtividade de grãos, irrigada e em sequeiro, em resposta à variação climática. Data de semeadura simulada no dia 1 de maio, para o período de 1985 a 2014, Piracicaba-SP.

De maneira geral, nos anos em que a produtividade no sistema irrigado é reduzida, observa-se aumento na produtividade de grãos no sistema em sequeiro. Nessas safras, as maiores lâminas de precipitação pluvial acumuladas são a principal causa, beneficiando e

elevando a produtividade de grãos de canola em sequeiro e em contrapartida, o aumento do tempo com céu nublado limita a disponibilidade de energia radiante, provocando redução do rendimento de grãos no sistema de produção irrigada.

As simulações de longo prazo para Piracicaba (SP), com diferentes datas de semeadura, no período de 1985 a 2014 (Figura 7), revelam a influência da variação climática interanual na produtividade de grãos de canola. Simulações de semeaduras precoce, em sistema de produção sequeiro, resultaram em aumentos produtivos, com média de 1.504 kg ha⁻¹ de grãos para semeadura em 01 de março, incremento de 42,7% em relação à semeadura de 01 de maio.

Figura 7. Simulação da produtividade de grãos em função de diferentes datas de semeadura para o período de 1985 a 2014 em Piracicaba-SP. Ponto e linha dentro do boxplot representam a média e mediana, respectivamente.

O aumento na produtividade de grãos para semeaduras precoces tem relação direta com a melhor condição hídrica nas fases de estabelecimento inicial da canola, no mês de março em relação a maio em Piracicaba-SP. Embora a antecipação para o início de março resulte em aumento da produtividade média, a simulação apresenta grande amplitude, com anos discrepantes em que a produtividade de grãos foi inferior a 1.000 kg ha⁻¹.

Conforme as simulações, o atraso na semeadura apresenta menor variabilidade na produtividade de grãos entre os anos. Essa menor variabilidade produtiva é reflexo da maior

predominância da condição de tempo seco no período de inverno na região (ALVARES et al., 2013). Sua ocorrência, principalmente nos meses de julho a agosto, é caracterizada pela precipitação pluvial acumulada mensal inferior a 30 mm, e que dessa forma afetam a fase de florescimento e enchimento de grãos da canola. Ao simular a semeadura em 01 de junho, a produtividade média de grãos foi superior às duas datas anteriores, basicamente pelo retorno do período chuvoso no final do ciclo da canola. O aumento produtivo ocorreu devido ao período de floração e enchimento de grãos ser contemplado, em média, com mais de 60 mm e 110 mm de precipitação pluvial acumulada mensal, respectivamente nos meses de setembro e outubro. Os resultados simulados indicam a importância de programar a semeadura para proporcionar maior regime pluviométrico às fases fenológicas mais sensíveis à deficiência hídrica. Uma vez que a incidência de déficit hídrico, principalmente no período reprodutivo, reduz a produtividade de grãos e afeta a qualidade e quantidade de óleo produzido (ANGADI et al., 2003; SINAKI et al., 2007).

4.4. CONCLUSÃO

O modelo APSIM-Canola, calibrado e avaliado, mostrou potencialidade de uso para projetar a expansão da cultura da canola para regiões onde seu cultivo não é realizado. Da mesma forma, o modelo pode contribuir para o aperfeiçoamento do zoneamento agroclimático da canola para o Brasil.

Os resultados das simulações indicam maior potencial produtivo de canola Hyola 61 nas condições climáticas de Piracicaba, quando semeadas mais precocemente.

Conforme simulações, a produtividade de grãos de canola pode triplicar em cultivo irrigado.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. A. de; KIIHL, R. A. de S.; MIRANDA, M. A. C. de; CAMPELO, G. J. de A. Melhoramento da soja para regiões de baixas latitudes. **Recursos genéticos e melhoramento de plantas para o nordeste brasileiro**, 1999.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.

- ALVIM, K. R. de T.; BRITO, C. H. de; BRANDÃO, A. M.; GOMES, L. S.; LOPES, M. T. G. Quantificação da área foliar e efeito da desfolha em componentes de produção de milho. **Ciência Rural**, v. 40, n. 5, p. 1017–1022, maio 2010.
- ANGADI, S.; CUTFORTH, H.; MCCONKEY, B.; GAN, Y. Yield Adjustment by Canola Under Different Plant Populations in the Semiarid Prairie. **Crop Science**, v. 43, p. 1358–1366, 2003.
- CHEN, X. **Comparative Study on Growth Development and Yield of Different Maturity Canola Varieties in Early and Late Sowing Date**. 2013. Huazhong Agricultural University, 2013.
- CHRISTY, B.; O'LEARY, G.; RIFFKIN, P.; ACUNA, T.; POTTER, T.; CLOUGH, A. Long-season canola (*Brassica napus* L.) cultivars offer potential to substantially increase grain yield production in south-eastern Australia compared with current spring cultivars. **Crop and Pasture Science**, v. 64, n. 9, p. 901, 2013.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: primeiro levantamento** Safra 2017/18, Brasília, v. 5, p. 1-114, 2017.
- DALMAGO, G. A.; FOCESATTO, E.; KOVALESKI, S.; TAZZO, I. F.; BOLIS, L. M.; CUNHA, G. R. da; NIED, A. H.; BERGAMASCHI, H.; SANTI, A. Filocrono e número de folhas da canola em diferentes condições ambientais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 6, p. 573–581, 5 set. 2013.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. rev., Embrapa, 2013.
- FARRÉ, I.; ROBERTSON, M. J.; WALTON, G. H.; ASSENG, S. Simulating phenology and yield response of canola to sowing date in Western Australia using the APSIM model. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 53, p. 1155–1164, 2002.
- GAYDON, D. S.; BALWINDER-SINGH; WANG, E.; POULTON, P. L.; AHMAD, B.; AHMED, F.; AKHTER, S.; ALI, I.; AMARASINGHA, R.; CHAKI, A. K.; CHEN, C.; CHOUDHURY, B. U.; DARAI, R.; DAS, A.; HOCHMAN, Z.; HORAN, H.; HOSANG, E. Y.; KUMAR, P. V.; KHAN, A. S. M. M. R.; LAING, A. M.; LIU, L.; MALAVIACHICHI, M. A. P. W. K.; MOHAPATRA, K. P.; MUTTALEB, M. A.; POWER, B.; RADANIELSON, A. M.; RAI, G. S.; RASHID, M. H.; RATHANAYAKE, W. M. U. K.; SARKER, M. M. R.; SENA, D. R.; SHAMIM, M.; SUBASH, N.; SURIADI, A.; SURIYAGODA, L. D. B.; WANG, G.; WANG, J.; YADAV, R. K.; ROTH, C. H. Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. **Field Crops Research**, v. 204, p. 52–75, 2017.

- GEORGE, N.; KAFFKA, S. Canola as a new crop for california: A simulation study. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 2, p. 496–509, 2017.
- HE, D.; WANG, E.; WANG, J.; LILLEY, J.; LUO, Z.; PAN, X.; PAN, Z.; YANG, N. Uncertainty in canola phenology modelling induced by cultivar parameterization and its impact on simulated yield. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 163–175, 15 jan. 2017a.
- HE, D.; WANG, E.; WANG, J.; ROBERTSON, M. J. Data requirement for effective calibration of process-based crop models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 234–235, p. 136–148, 2017b.
- HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; SILVA, S. C. da. **Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade na pesquisa agronômica**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão (Documentos 264), 2010.
- HOFFMANN, M. P.; JACOBS, A.; WHITBREAD, A. M. Crop modelling based analysis of site-specific production limitations of winter oilseed rape in northern Germany. **Field Crops Research**, v. 178, p. 49–62, 1 jul. 2015.
- IRIARTE, L. B.; VALETTI, O. E. **Cultivo de Colza**. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuária – INTA, 2008.
- JAME, Y. W.; CUTFORTH, H. W. Crop growth models for decision support systems. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 76, n. 1, p. 9–19, jan. 1996.
- KEATING, B. .; CARBERRY, P. .; HAMMER, G. .; PROBERT, M. .; ROBERTSON, M. .; HOLZWORTH, D.; HUTH, N. .; HARGREAVES, J. N. .; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; MCLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J. .; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, S.; BRISTOW, K. .; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; MCCOWN, R. .; FREEBAIRN, D. .; SMITH, C. . An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 267–288, 1 jan. 2003.
- KIRKEGAARD, J. A.; LILLEY, J. M.; BRILL, R. D.; SPRAGUE, S. J.; FETTELL, N. A.; PENGILLEY, G. C. Re-evaluating sowing time of spring canola (*Brassica napus* L.) in south-eastern Australia—how early is too early? **Crop and Pasture Science**, v. 67, n. 4, p. 381, 2016.
- LILLEY, J. M.; BELL, L. W.; KIRKEGAARD, J. A. Optimising grain yield and grazing potential of crops across Australia’s high-rainfall zone: a simulation analysis. 2. Canola. **Crop and Pasture Science**, v. 66, n. 4, p. 349, 2015.

- MELGAREJO, A. M. A.; DUARTE JÚNIOR, J. B.; COSTA, A. C. T. da; MEZZALIRA, É. J.; PIVA, A. L.; SANTIN, A. Características agronômicas e teor de óleo da canola em função da época de semeadura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 9, p. 934–938, set. 2014.
- MENG, T.; CAREW, R.; FLORKOWSKI, W. J.; KLEPACKA, A. M.; MENG, T.; CAREW, R.; FLORKOWSKI, W. J.; KLEPACKA, A. M. Analyzing Temperature and Precipitation Influences on Yield Distributions of Canola and Spring Wheat in Saskatchewan. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 56, n. 4, p. 897–913, 20 abr. 2017.
- MOOT, D. J.; HARGREAVES, J.; BROWN, H. E.; TEIXEIRA, E. I. Calibration of the APSIM-Lucerne model for Grasslands Kaituna lucerne crops grown in New Zealand. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 58, n. 2, p. 190–202, 2015.
- MORRISON, M. J.; MCVETTY, P. B. E.; SHAYKEWICH, C. F. THE DETERMINATION AND VERIFICATION OF A BASELINE TEMPERATURE FOR THE GROWTH OF WESTAR SUMMER RAPE. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 69, n. 2, p. 455–464, abr. 1989.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria. R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>.
- ROBERTSON, M. J.; CARBERRY, P. S.; HUTH, N. I.; TURPIN, J. E.; PROBERT, M. E.; POULTON, P. L.; BELL, M.; WRIGHT, G. C.; YEATES, S. J.; BRINSMEAD, R. B. Simulation of growth and development of diverse legume species in APSIM. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 53, n. 4, p. 429–446, 2002.
- ROBERTSON, M. J.; HOLLAND, J. F. Production risk of canola in the semi-arid tropics of Australia. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 55, p. 525–538, 2004.
- ROBERTSON, M. J.; HOLLAND, J. F.; KIRKEGAARD, J. A.; J., S. C. Simulating growth and development of canola in Australia. In: Proceedings of the 10th International Rapeseed Congress, Canberra. **Anais...** Canberra: Proceedings of the 10th International Rapeseed Congress, 1999.
- ROBERTSON, M. J.; LILLEY, J. M. Simulation of growth, development and yield of canola (Brassica napus) in APSIM. **Crop & Pasture Science**, v. 67, p. 332–344, 2016.
- SALTELLI, A. Sensitivity Analysis for Importance Assessment. **Risk Analysis**, v. 22, n. 3, p. 579–590, 1 jun. 2002.

- SANCHES, A. C.; GOMES, E. P.; PEREIRA, E.; AZEVEDO, G. Canola yield under different irrigation frequencies and nitrogen levels in the Brazilian Cerrado Produtividade de canola sob diferentes frequências de irrigação e doses de nitrogênio na região do Cerrado Brasileiro. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 4, p. 367–377, 2017.
- SINAKI, J. M.; HERAVAN, E. M.; RAD, A. H. S.; NOORMOHAMMADI, G.; ZAREI, G. The effects of water deficit growth stages of canola (*Brassica napus* L.). **American Eurasian Journal Agricultural & Environment Science**, v. 2, n. 4, p. 417–422, 2007.
- THOMAS, P. The Grower's manual. **Winnipeg: Canola Council of Canada**, 2003. Disponível em: <http://www.canolacouncil.org/canola_growers_manual.aspx>.
- TOMM, G. . Indicativos tecnológicos para a produção de canola no Rio Grande do Sul. v. Passo Fund, n. (Embrapa Trigo. Sistema de produção, 4), p. 68, 2007.
- TOMM, G. O. **Situação atual e perspectivas da canola no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo (Comunicado Técnico Online, 58), 2000.
- TOMM, G. O. **Desempenho de genótipos de canola em Goiás, em 2004**. Passo Fundo: Embrapa Trigo (Comunicado técnico online, 118), 2004.
- TOMM, G. O.; RAPOSO, R. W. C.; SOUZA, T. A. F. de; OLIVEIRA, J. T. de L.; RAPOSO, E. H. S.; SILVA NETO, C. P. da; BRITO, A. C.; NASCIMENTO, R. de S.; RAPOSO, A. W. S.; SOUZA, C. F. **Desempenho de genótipos de canola (*Brassica napus* L.) no Nordeste do estado da Paraíba**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Online 65), 2008.
- TOMM, G. O.; WIETHÖLTER, S.; DALMAGO, G. A.; SANTOS, H. P. **Tecnologia para produção de canola no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009.
- VASCONCELOS, R. L.; GIACOMO, K. S.; SOUZA, E. C.; GARCIA, A. Viabilidade climática para o cultivo de canola em Ribeirão Preto-SP. **Nucleus**, v. 9, n. 2, p. 195–200, 2012.
- WANG, J.; WANG, E.; FENG, L.; YIN, H.; YU, W. Phenological trends of winter wheat in response to varietal and temperature changes in the North China Plain. **Field Crops Research**, v. 144, p. 135–144, 2013.
- WANG, S.; WANG, E.; WANG, F.; TANG, L. Phenological development and grain yield of canola as affected by sowing date and climate variation in the Yangtze River Basin of China. **Crop and Pasture Science**, v. 63, n. 5, p. 478–488, 2012.
- WILLMOTT, C. . On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme os objetivos do trabalho, a proposta de avaliar o desempenho do sistema de consorciação de cana-de-açúcar e canola e calibrar o modelo APSIM-Canola nas condições ambientais da região de Piracicaba-SP, foi concluída. Os resultados do estudo indicaram a potencialidade fitotécnica da produção de grãos no período de inverno, ocupando as áreas de produção canavieira em seu estágio de estabelecimento.

A produtividade média de grãos de todos os genótipos de canola em consorciação com cana-de-açúcar, nas três safras, foi de 1.104 kg ha⁻¹. Tais dados foram obtidos em sistema de produção sequeiro, sob clima tropical, em plenos meses de outono-inverno. Os resultados também evidenciaram ausência de efeitos negativos devido à consorciação para a produção da cana-de-açúcar. A partir desses resultados, considerando os mais de 4,5 milhões de hectares cultivados com cana-de-açúcar somente no estado de São Paulo, seria possível se produzir cerca de 5 milhões de toneladas de grãos. A introdução da canola nos canaviais, ocupando a terra em um momento de crescimento incipiente da cana-de-açúcar, também pode caracterizar um cultivo de cobertura, trazendo ao sistema diversos benefícios indiretos, e não apenas a produção de grãos. A retenção e ciclagem de nutrientes, o controle da erosão, a descompactação natural do solo, o controle de plantas daninhas e até mesmo efeitos benéficos sobre a biologia do solo e redução de ocorrência de pragas e doenças poderiam ser obtidos.

Evidentemente, mais aspectos devem ser considerados para adotar esse sistema de produção na região, como o controle químico de plantas daninhas no consórcio, o impacto do manejo mecanizado empregado na cana-de-açúcar, além do efeito da cobertura da palha, produzida na colheita dos canaviais, no estabelecimento inicial da canola. No entanto, os resultados positivos do estudo poderão se configurar em um importante sistema de produção alternativo de cana-de-açúcar juntamente com canola no período de outono e inverno, podendo minimizar a queda da produção de biocombustíveis nesta época do ano devido às condições climáticas desfavoráveis para as culturas oleaginosas de verão.

Adicionalmente à avaliação do desempenho dos sistemas consorciados, o objetivo de avaliar a produção de canola em ambiente tropical e auxiliar na expansão da cultura no Brasil foi realizado. Em relação a isso, com a calibração e avaliação do modelo APSIM-Canola ficou evidente a sua aplicabilidade como ferramenta no estudo de zoneamento agroclimático da canola, que podem, futuramente, subsidiar estudos de expansão agrícola da cultura para

novas áreas e se configurar numa importante espécie alternativa para a rotação de culturas no período de outono/inverno.

APÊNDICE

Apêndice A. Descrição dos parâmetros do modelo APSIM-Canola utilizados na análise de sensibilidade local.

Parâmetro	Descrição	Unidade
Airdry	Ponto de solo seco	mm mm ⁻¹
BD	Densidade do solo	g cm ⁻³
Canola leaf number	Número de folhas	-
Canola leaf size	Tamanho de folhas	mm ²
Canola specific leaf area	Área foliar específica	g mm ²
CanolaLL	Limite inferior de umidade do solo em que a raiz consegue extrair água	mm mm ⁻¹
Diffusivity constant	Constante de difusividade de água do solo	-
DUL	Capacidade de campo	mm mm ⁻¹
Extinc coeff	Coefficiente de extinção luminosa do dossel	-
Grain oil conc	Conteúdo relativo de óleo	0-1
Hi max pot (HI)	Índice máximo de colheita	0-1
KL	Taxa máxima de extração de água do solo pelas raízes	mm mm ⁻¹
KSAT	Condutividade hidráulica saturada	mm dia ⁻¹
LL15	Ponto de murcha permanente do solo	mm mm ⁻¹
Node app rate	Taxa de aparecimento de nós no caule	°C dia nó ⁻¹
Node sen rate	Taxa de senescência de nós no caule	°C dia nó ⁻¹
OC	Teor de carbono orgânico no solo	%
Plant height	Altura das plantas	mm
Pod extinc coef	Coefficiente de extinção luminosa das sílikas	-
Pod RUE	Eficiência de uso da radiação das sílikas	g MJ ⁻¹
RUE	Eficiência de uso da radiação	g MJ ⁻¹
SAT	Ponto de saturação de água do solo	mm mm ⁻¹
Soil albedo	Albedo do solo	-
Specific pod area	Área específica das sílikas	mm ² g
SWCON	Coefficiente de drenagem de água do solo	0-1
Lf sen rate	Taxa de senescência de folhas	0-1
TT emergence	Tempo térmico da emergência ao período juvenil	°C dia
TT end juvenile	Tempo térmico do juvenil aos botões florais	°C dia
TT flowering	Tempo térmico do florescimento ao enchimento de grãos	°C dia
TT grain filling	Tempo térmico do ini. enchimento de grãos ao fim do enchimento grãos	°C dia
TT initial flowering	Tempo térmico dos botões florais ao início do florescimento	°C dia
XF	Fator de exploração das raízes	0-1