

Limites críticos do conteúdo de água no solo para a cultura da canola (*Brassica napus* L.)



OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

2 FOME ZERO
E AGRICULTURA
SUSTENTÁVEL



ISSN 1677-8901
Fevereiro/2022

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Trigo
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
102**

**Limites críticos do conteúdo de água no solo
para a cultura da canola (*Brassica napus* L.)**

*Genei Antonio Dalmago
Gilberto Rocca da Cunha
Cleusa Adriane Menegassi Bianchi Teixeira
Aldemir Pasinato
Jorge Alberto de Gouvêa
Anderson Santi*

**Embrapa Trigo
Passo Fundo, RS
2022**

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Trigo
Rodovia BR 285, km 294
Caixa Postal 3081
99050-970 Passo Fundo, RS
Telefone: (54) 3316-5800
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações da Embrapa Trigo

Presidente
Mercedes Concórdia Carrão-Panizzi

Vice-presidente
Ana Lídia Variani Bonato

Secretária
Marialba Osorski dos Santos

Membros
Elene Yamazaki Lau, Fabiano Daniel De Bona,
João Leodato Nunes Maciel, Luiz Eichelberger,
Maria Imaculada Pontes Moreira Lima, Martha
Zavariz de Miranda, Sirio Wiethölter

Normalização bibliográfica
Rochelle Martins Alvorcem (CRB 10/1810)

Tratamento das ilustrações
Márcia Barrocas Moreira Pimentel

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Márcia Barrocas Moreira Pimentel

Foto da capa
Elisson Stéphânio Savi Pauletti

1ª edição
Publicação digital - PDF (2022)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Trigo

Limites críticos do conteúdo de água no solo para a cultura da canola (*Brassica napus* L.). / por
Genei Antonio Dalmago... [et al.]. – Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2022.
PDF (53 p.) : il. color. - (Embrapa Trigo. Boletim de pesquisa e desenvolvimento online, 102).

ISSN 1677-8901

1. Canola. 2. Solo. 3. Cultivo. 4. Meio ambiente. 5. Sustentabilidade. I. Cunha, Gilberto Rocca
da. II. Teixeira, Cleusa Adriane Menegassi Bianchi. III. Pasinato, Aldemir. IV. Gouvêa, Jorge
Alberto de. V. Santi, Anderson. VI. Embrapa Trigo. VII. Série.

CDD (21. ed) 633.85

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Introdução.....	7
Material e Métodos	10
Resultados e Discussão	18
Considerações Finais	42
Conclusões.....	44
Agradecimentos.....	45
Referências	45
Anexo I	51
Anexo II	52

Limites críticos do conteúdo de água no solo para a cultura da canola (*Brassica napus*, L.)

*Genei Antonio Dalmago*¹

*Gilberto Rocca da Cunha*²

*Cleusa Adriane Menegassi Bianchi Teixeira*³

*Aldemir Pasinato*⁴

*Jorge Alberto de Gouvêa*⁵

*Anderson Santi*⁶

Resumo - O objetivo do estudo foi determinar o nível crítico do conteúdo relativo de água no solo (CRAS), a partir do qual variáveis de crescimento, desenvolvimento, produção de grãos e do teor de óleo em canola passam a ser afetadas. Dois experimentos foram conduzidos em vasos, em casa de vegetação, em blocos ao acaso e quatro repetições, envolvendo dois genótipos de canola (Diamond e Hyola 61) e cinco níveis de conteúdo relativo de água no solo (100%, 80%, 60%, 40% e 20%), em relação à capacidade máxima de retenção de água do solo, usualmente definida como capacidade de campo. Foram avaliadas a altura de plantas, massa da matéria seca de folhas, massa da matéria seca total, massa da matéria seca de grãos, número de siliquas por planta, número de grãos por siliqua, massa de mil grãos, teor de óleo nos grãos, a evapotranspiração da cultura e a fenologia. O déficit hídrico prolongou o ciclo e reduziu o tempo entre início e final do florescimento. O conteúdo relativo de água no solo teve efeito sigmoidal em todas as variáveis, com valores maiores nos tratamentos de 80% e 100% e menores nos de 20% e 40%. O tratamento de 60% apresentou efeito intermediário. Os limites críticos de água no solo ficaram entre 40% e 100% do CRAS, com valores decrescentes na seguinte ordem: evapotranspiração da cultura (102,5%), altura de plantas (88,0%), matéria seca de folhas (86,1%), matéria seca total (79,4%),

¹ Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia/Agrometeorologia, pesquisador da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS.

² Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia/Agrometeorologia, pesquisador da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS.

³ Engenheira-agrônoma, doutora em Fitotecnia/Agrometeorologia, professora da Unijui, Ijuí, RS.

⁴ Analista de sistemas, mestre em Fitotecnia/Sistemas de Produção Vegetal, analista da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS.

⁵ Engenheiro-agrônomo, doutor em Biologia Vegetal, pesquisador da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS.

⁶ Engenheiro-agrônomo, mestre em Agronomia, pesquisador da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS.

número de siliques por planta (72,6%), massa seca de grãos (71,2%), massa de mil grãos (53,0%), número de grãos por síliqua (59,7%) e teor de óleo nos grãos (41,2%). Desta forma, as variáveis analisadas são afetadas de maneira distinta em função da fase fenológica da planta e do grau de associação dos processos envolvidos na construção biológica da produtividade da canola, com o teor de água no solo.

Termos de indexação: déficit hídrico, estresse hídrico, disponibilidade de água no solo, produtividade de grãos, *Brassica napus* L.

Critical limits of soil water content of the canola crop (*Brassica napus* L.)

Abstract - The aim of this study was to determine the critical levels of relative soil water content at which canola growth, development and grain production and its oil content are affected. Two experiments were conducted in pots in a randomized block design, with two canola genotypes (Diamond and Hyola 61) and five relative soil water content levels (100%, 80%, 60%, 40% and 20%), of the maximum water holding capacity of the soil, usually defined as the field capacity. Plant height, leaf dry matter mass, total dry matter mass, grain dry matter mass, number of siliques per plant, number of grains per siliques, thousand grain mass, oil content, crop evapotranspiration, and phenology were evaluated. Water deficit prolonged the cycle and reduced the time between the beginning and end of flowering. The relative soil water content had a sigmoidal effect on all variables, with higher values at the 80% and 100% treatments and lower values at the 20% and 40% treatments. The 60% treatment had an intermediate effect. The critical limits were between 40% and 100%, with values decreasing in order of crop evapotranspiration (102.5%), plant height (88.0%), leaf dry matter mass (86.1%), total dry matter mass (79.4%), number of siliques per plant (72.6%), grain dry matter mass (71.2%), thousand grain mass (53.0%), number of grains per siliques (59.7%) and oil content (41.2%). Therefore, variables were affected differently depending on the ontogeny of the plant and the sensitivity of the processes involved in the biological construction of canola productivity.

Keywords: soil water deficit, soil water stress, soil water availability, grain yield, *Brassica napus* L.

Introdução

A baixa disponibilidade de água no solo é um dos principais fatores ambientais que afeta negativamente a produtividade de grãos da canola (Raman et al., 2020; Tan et al., 2020) em ambientes, hidricamente, mais restritivos (Rahimi-Moghaddam et al., 2021), apesar da canola ser considerada uma espécie tolerante ao déficit hídrico (Urrea et al., 2020). A restrição hídrica pode afetar diversos processos nas plantas, dependendo do grau de tolerância que cada genótipo apresenta (Rad; Zandi, 2012; Haq et al., 2014; Bakhtari et al., 2017; Dai et al., 2020; Moghaddam et al., 2011). Estudos recentes identificaram redução da taxa fotossintética, da condutância estomática, da eficiência de uso da água, do conteúdo de clorofila, da eficiência fotoquímica, do transporte de elétrons, bem como aumento do estresse oxidativo (Dai et al., 2020). Estes e outros processos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos afetados pelo déficit hídrico (Rad; Zandi, 2012; Hosseini et al., 2015; Gao et al., 2018; Sabagh et al., 2019; Khan et al., 2019; Khodabin et al., 2020; Zhu et al., 2021) são expressados na redução da produtividade de grãos, componentes da produtividade e da massa da matéria seca total (MST) (Hosseini; Hassibi, 2011; Hergert et al., 2016; Bakhtari et al., 2017; Elferjani; Soolanayakanahally, 2018; Biswas et al., 2019) e sobre o teor de óleo nos grãos (TO) e qualidade do óleo (Ullah et al., 2012; Hergert et al., 2016; Elferjani; Soolanayakanahally, 2018). Por isso, ampliar a base de conhecimento sobre respostas biológicas e produtivas da canola e conhecer seus limites críticos quanto aos efeitos do déficit hídrico (Sinaki et al., 2007) é uma estratégia importante na perspectiva de inserção da cultura em sistemas agrícolas, como, por exemplo, os que ocorrem na região do Cerrado brasileiro.

A redução da produção de MST (Hosseini et al., 2015) e da produtividade de grãos (Haq et al., 2014), bem como o efeito do déficit hídrico sobre o TO e qualidade do óleo (Bahrani; Pourreza, 2016) dependem de diversos fatores, como a severidade (intensidade e/ou duração) do déficit hídrico (Hosseini et al., 2015; Elferjani; Soolanayakanahally, 2018) e da fase fenológica em que ele ocorre (Hergert et al., 2016). De acordo com Zirgoli e Kahrizi (2015), restrição hídrica a partir do florescimento reduziu em 7,67% a produtividade de grãos e a MST, 24,68% o número de ramos, 28,35% o diâmetro do caule e 3,7% a altura de plantas (ALT). Por outro lado, Wright et al. (1995), observaram reduções ainda maiores e próximas a 62% na MST, 76% na massa da

matéria seca de grãos (MSG), 53% no número de siliquas por planta (NS) e de 43% no número de grãos por síliqua (NG), quando o estresse hídrico correspondeu ao conteúdo relativo de água no solo (CRAS) de 40%. Valores semelhantes foram encontrados também em experimentos de campo (Rad; Zandi, 2012; Haq et al., 2014; Bahrani; Pourreza, 2016), em que o CRAS é assumido como o teor de água no solo na capacidade de campo (CC), que é o limite superior de retenção de água no solo após cessar a ação da gravidade sobre o movimento de água no solo.

O estresse hídrico causado por déficit de água no solo tem reflexos distintos nas fases fenológicas da cultura da canola, especialmente no período reprodutivo, que é o momento de maior sensibilidade a esse fator (Mohtashami et al., 2020). Resultados de Zirgoli e Kahrizi (2015), demonstram que plantas de canola sob déficit hídrico anteciparam o florescimento, aumentado a duração da fase reprodutiva, em relação aquelas que não sofreram restrição hídrica (Zirgoli; Kahrizi, 2015; Mohtashami et al., 2020). Porém, quando o mesmo ocorreu no florescimento a canola reduziu o tempo de florescimento, antecipando a formação das siliquas. Assim se o estresse hídrico acontecer no início do enchimento dos grãos, ocorre a antecipação da maturação fisiológica (Teshfami et al., 2010; Birunara et al., 2011). O déficit hídrico nos estádios reprodutivos diminui o NS e o NG, comprometendo a produtividade de grãos (Ghobadi et al., 2006). Estes estádios são os mais críticos (Ghobadi et al., 2006; Haq et al., 2014), mesmo em curto período de déficit hídrico (Ahmadi; Bahrani, 2009).

Os efeitos do déficit hídrico na redução do TO são mais intensos quando acontecem durante a floração ou nos subperíodos correspondentes ao final do enchimento dos grãos, em relação a fase vegetativa (Teshfami et al., 2010). Déficit hídrico, especialmente nesta fase, pode aumentar os teores de glucosinolatos e ácido erúico e diminuir o teor de ácido oleico, reduzindo a qualidade do óleo (Ullah et al., 2012). Relatos na literatura apontam redução no TO de 1,2 a 14,6 unidades percentuais (Teshfami et al., 2010; Bilibio et al., 2011; Rad; Zandi, 2012; Bahrani; Pourreza, 2016) em consequência de déficit hídrico. Porém, o TO de canola pode oscilar muito, desde 30% (Righi et al., 2017) até 50% (Wittkop et al., 2009; Ullah, et al., 2013) em decorrência de outros fatores.

Os resultados encontrados na literatura sobre respostas da canola ao CRAS apresentam grande variabilidade. Isso ocorre, na maioria das vezes, devido aos distintos CRAS adotados, ou ainda, à utilização de outros critérios de manejo da cultura e de avaliação do fator hídrico. Akram et al. (2018) estabeleceram dois tratamentos de CRAS e consideraram aquele de 60% como déficit hídrico para a canola. Avaliando genótipos de canola no Irã, Bakhtari et al. (2017) trabalharam com CRAS de 70% e 40%, como condição sem e com déficit hídrico, enquanto Haq et al. (2014) e Bahrani e Pourreza (2016), empregaram CRAS de 100% e 50%, respectivamente, para o mesmo fim. Outros estudos, como Wright et al. (1995), Tesfamariam et al. (2010) e Haq et al. (2014) não indicam valores de CRAS e fazem referência somente à condição “com e sem déficit hídrico” no ciclo ou durante as fases vegetativa e reprodutiva da cultura, especialmente na floração e início do enchimento de grãos.

A respeito dos limites críticos de CRAS que comprometem a produção biológica e a produtividade de grãos, são escassos os estudos referenciados na literatura. Ibarra et al. (2014) em estudo realizado a campo com canola, verificaram que a produtividade de grãos mais elevada e a maior eficiência de uso da água foram obtidas nos CRAS de 65% e 61% durante os subperíodos vegetativo e reprodutivo, respectivamente. Em ambiente controlado, Birunara et al., 2011, aplicaram CRAS de 30%, 50%, 70% e 100% nos estádios de alongamento, florescimento e formação de síliquas para uma cultivar classificada como outonal (necessidade de vernalização menor do que aquelas de inverno), mas não definiram os limites críticos específicos, apresentando apenas resultados de desempenho relativo. Bilbibio et al. (2011), em ambiente controlado, trabalharam com três níveis de déficit de água no solo, correspondendo a 0%, 30% e 60% da evapotranspiração de referência (ET_o). Estes autores encontraram uma relação linear de decréscimo das respostas em relação ao déficit hídrico, em que as maiores reduções ocorreram em 60% de déficit relativo à ET_o. Devido ao baixo número de tratamentos (apenas três), eles não estudaram outras respostas, além da linear. Considerando que o déficit hídrico afeta o crescimento biológico, o desenvolvimento fenológico e a produtividade de grãos, seriam esperadas respostas não lineares (Ibarra et al., 2014), em relação aos CRAS, semelhantes àsquelas obtidas por Pereira et al. (2019), trabalhando com lâminas de irrigação relativas à ET_o.

Apesar dos resultados existentes na literatura, os limites críticos de CRAS para a canola ainda permanecem indefinidos. Esses limites são importantes para definir níveis de risco associado ao déficit hídrico para a cultura, os quais tem aplicabilidade no Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), que visa a identificação das regiões potenciais de cultivo da canola no País e das melhores épocas de semeadura em cada local. O avanço no aprimoramento do ZARC está orientado para o uso de indicadores baseados em produtividade das culturas, estimada por modelagem de processos em que o fator hídrico é parte fundamental. Nesse aspecto, conhecer melhor como o CRAS afeta processos produtivos na planta é de grande valia, uma vez que distintos processos que ocorrem durante a ontogenia da planta respondem de maneira distinta ao CRAS (Ghobadi et al., 2006) e, portanto, devem ter limites críticos diferentes para induzir perdas significativas (Sinaki et al., 2007). Por isso, o objetivo deste estudo foi estabelecer os limites críticos do conteúdo relativo de água no solo, a partir do qual aumentam os riscos de comprometimento da biomassa, da produtividade de grãos e do teor de óleo em canola.

A presente publicação contribui para o atendimento de parte do 2º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável do Brasil (ODS 2) pelas Nações Unidas (ONU, 2021), intitulado “Fome zero e agricultura sustentável: Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável”. Os resultados se alinham a meta 2.4 da referida ODS: “Até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo” (ONU, 2021), por apresentar indicadores hídricos com potencial de serem utilizados para o manejo da cultura e melhor posicionamento espaço-temporal nos ambientes produtivos do Brasil

Material e Métodos

Para este estudo foram realizados dois experimentos em casa de vegetação, com a canola cultivada em vasos (Anexo I). O primeiro foi de 19/05/2017

a 02/10/2017 (Exp. 1) e o segundo de 30/04/2019 a 28/09/2019 (Exp. 2), correspondendo ao ciclo de 136 e 151 dias, respectivamente. O delineamento experimental utilizado foi um bifatorial em blocos ao acaso, com dois genótipos de canola e cinco níveis de CRAS. Para o fator genótipo foram utilizados os híbridos de canola Diamond e Hyola 61 e para o fator CRAS foram utilizados os valores de: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, em relação à capacidade máxima de retenção de água no solo.

O interior da casa de vegetação n° 8A, da Embrapa Trigo foi dividido em quatro partes para estabelecer os blocos. Isto foi necessário devido às variações de distribuição da radiação solar internamente, em decorrência do tipo de estrutura e de cobertura e também da variação da declinação solar durante os períodos de condução dos experimentos. No Exp.1, em 2017, foram alocadas 4 repetições de cada tratamento por bloco, totalizando 160 vasos, enquanto no Exp. 2, em 2019, foi utilizada uma repetição de cada tratamento por bloco, totalizando 40 vasos. No Exp. 2 os blocos foram alocados na extremidade sul da casa de vegetação em virtude da redução do número de vasos (Anexo I).

A casa de vegetação apresenta paredes de vidro e o telhado é de polipropileno. A saída de ar quente foi facilitada pelo lanternim no teto e por dois exaustores em uma das extremidades. Na extremidade oposta aos exaustores a parede lateral foi construída com argila expansiva, a qual foi mantida úmida e permeável ao ar. A evaporação da água, ocasionada pela corrente de ar que passava pela argila auxiliou na manutenção da temperatura do ar no interior da casa de vegetação. Sempre que a temperatura do ar atingia 25 °C um termostato acionava os exaustores e um sistema motobomba, acionado ao mesmo tempo, fornecia água à respectiva parede de argila. Sobre o teto da casa de vegetação foi instalada uma manta reflexiva para reduzir a entrada de radiação solar, nos dias mais quentes.

Os vasos, com capacidade volumétrica de 20 litros, foram preenchidos com solo retirado do horizonte A de um Latossolo Vermelho distrófico típico (Streck et al. 2018), o qual foi destorroado e misturado, uniformemente. O mesmo foi adubado conforme a indicação para cultivo da canola (Tomm et al., 2009). Antes do preenchimento, a base dos vasos foi perfurada para facilitar o escoamento do excesso de água irrigada e recebeu uma camada de tecido TNT (tecido não tecido) de polipropileno para evitar a perda de solo pelos furos. Após o preenchimento, o solo foi levemente comprimido, median-

te cinco a seis batidas do vaso contra uma superfície de concreto até formar uma borda de, aproximadamente, 1 cm do topo. Em seguida foram pesados e padronizados com a mesma massa de solo e alocados em linhas paralelas nos blocos, com numeração em ordem sequencial. Amostras de solo foram coletadas no mesmo momento, para determinar a umidade gravimétrica.

Em cada experimento foram preenchidos 5 vasos de 20 litros para determinar o CRAS máximo (100%). Para estabelecer esse limite os vasos foram saturados em tanques de plástico por três dias, deixando uma lâmina de água sobre o solo de, aproximadamente, 1 mm. Após retirados do tanque a superfície foi coberta com plástico preto para evitar evaporação da água. Diariamente, foram pesados até a drenagem cessar e a massa permanecer constante durante 3 dias. O CRAS máximo foi obtido pela derivada primeira da função exponencial decrescente ajustada aos dados da massa de solo e água ao tempo de pesagem. Na última pesagem foram retiradas amostras de solo na parte superior, intermediária e inferior do vaso para determinar a umidade gravimétrica média.

Foram semeadas 10 sementes por vaso sendo aplicados dois litros de água como primeira irrigação, com o intuito de aumentar o contato solo-semente e favorecer a germinação. Com três folhas foi realizado o desbaste, mantendo duas plantas por vaso, com padrão de desenvolvimento semelhante, de acordo com cada genótipo. Com o crescimento, as plantas foram tutoradas com uma haste de madeira, instalada no centro do vaso. No estágio B4 da escala fenológica de Iriarte e Valetti, (2008) foi aplicado 3,15 g de sulfato de amônio em cobertura, como fonte de nitrogênio e entre 15 a 20 dias após foi feita a segunda aplicação na mesma dose, em dia com alta disponibilidade externa de radiação solar. As plantas foram mantidas livres de pragas e doenças, conforme indicados para a canola.

Para monitorar os tratamentos do CRAS foram utilizados dois sistemas de controle e avaliação da umidade do solo: microlisímetros de drenagem e balanças digitais (Anexo I). O microlisímetro de drenagem foi o único sistema que esteve presente em todas as repetições dos dois experimentos, por ser um sistema acessível, de fácil construção, manutenção e utilização. As balanças eletrônicas de pesagem foram utilizadas nos dois experimentos, em uma repetição por tratamento e por bloco no Exp. 1 e em todas as unidades

experimentais no Exp. 2, devido a redução das unidades experimentais neste experimento (Anexo I).

Os microlisímetros foram construídos pela inserção do vaso com solo, em outro de mesmo tamanho. Isso foi possível devido a forma levemente cônica que tinham e porque a inserção de um vaso dentro do outro deixava uma câmara de ar na base daquele externo (Anexo I). Ou seja, o fundo do vaso interno não atingia aquele do externo, formando um ambiente para coleta da água drenada. A água coletada foi conduzida para um recipiente de coleta por um orifício aberto na lateral junto ao fundo do vaso externo, utilizando-se um sistema de mangueira e torneira.

O monitoramento constante e diário dos tratamentos foi feito por diferença de massa pelo conjunto das balanças. No Exp. 1, a repetição que recebeu a balança foi definida por sorteio e a mesma foi utilizada como referência para as demais repetições do mesmo tratamento e bloco. Neste experimento foi utilizado um estrado de madeira embaixo de cada microlisímetro que não tinha balança, para que as unidades experimentais ficassem todas na mesma altura e, assim, uniformizar a altura do dossel, evitando maior exposição das plantas sobre as balanças em relação às demais. No Exp. 2, todas as unidades experimentais de 20 litros foram colocadas sobre as balanças (Anexo I).

Diariamente, até as 9h da manhã foram registradas as massas dos microlisímetros nas balanças e o volume de água drenada para o dia. Em seguida, por diferença de massa entre o valor registrado e o valor limite para cada tratamento de CRAS (20%, 40%, 60%, 80% e 100%) foi calculada a quantidade de água a ser adicionada para restabelecer a condição hídrica no solo no limite de cada tratamento. Na sequência era realizada a irrigação com o volume de água calculado para cada vaso. Ao longo do dia a água drenada após a irrigação foi readicionada ao respectivo vaso.

Os limites de massa de referência dos tratamentos foram estabelecidos no início de cada experimento. Para isso foram calculadas as massas de solo e água armazenada no interior do vaso, no momento em que foi determinado o CRAS máximo. A massa de solo seco foi obtida a partir da correção da umidade do solo para 0% no momento de preenchimento dos vasos, utilizando-se a umidade gravimétrica daquele momento. Por diferença de massa entre o valor medido no momento de determinação do CRAS máximo e a massa de solo seco foi obtida a massa de água necessária para a obtenção do limite do

CRAS no tratamento de 100%. Para os tratamentos intermediários foi calculada a relação percentual de cada tratamento em relação ao CRAS máximo. Por exemplo, para o tratamento do CRAS de 80% foi adicionada o equivalente a 80% da massa de água determinada para estabelecer a capacidade de campo e assim sucessivamente.

Os limites das massas de referência para cada CRAS e os cálculos diários da necessidade de água foram estabelecidos, exclusivamente para as massas de solo e água, descontando o microlisímetro e demais estruturas presentes nele. Após a definição do mesmo foram acrescidos os valores da massa do vaso e de outras estruturas que foram adicionadas à balança, como, por exemplo, a massa da haste de madeira de sustentação das plantas. O acúmulo diário de MST das plantas não foi considerado no cálculo, por representar um valor baixo na escala diária e o mesmo ser compensado pela massa de água adicionada todos os dias. A diferença de massa entre os dias "n-1" e o dia "n" foi considerada como sendo a evapotranspiração da cultura (ETc) para o dia "n-1" nas condições da casa de vegetação, a qual foi representada em gramas por planta (g planta^{-1}), pela divisão da massa de água pelo número de plantas em cada unidade experimental.

Em ambos experimentos foram instalados sensores meteorológicos para monitorar o interior da casa de vegetação, iniciando 11 dias após a semeadura (DAS) no Exp.1 e no dia da semeadura no Exp. 2. Uma haste de ferro foi fixada na parte central da casa de vegetação, onde foram instalados um piranômetro modelo SP-110-L-10 da marca Apogee Instruments, para medir a radiação solar global incidente (R_g) e um saldoradiômetro, modelo NR-LITE2-L, da marca Kipp e Zonen, para medir o saldo de radiação (R_n), ambos instalados a 2 m de altura. A um metro de altura foi instalado um anemômetro sônico bidirecional, modelo WINDSONIC1-L34, marca GILL, para medir a velocidade de deslocamento do ar (V) interno quando os exaustores foram acionados. Para obter a temperatura (T_m) e umidade relativa do ar (UR) diárias foram instalados dois psicrômetros não ventilados, construídos com termopar (termômetros) cobre-constantan. O termômetro de bulbo úmido foi obtido por um cordão formado com gaze, conectado a junção do cobre-constantan e a outra extremidade introduzida em um recipiente com água destilada. A UR e o déficit de pressão de vapor (DS) diários foram estimadas conforme Pereira et al. (2002). Todos os sensores foram conectados ao datalogger, modelo CR1000, marca Campbell Scientific, Inc., programado para leituras a cada

30 segundos e registro a cada 15 minutos. A temperatura máxima (T_{max}) e a mínima (T_{min}) diárias do ar foram obtidas do termômetro de bulbo seco.

Os tratamentos de CRAS iniciaram com as plantas entre os estádios C1 e C2 (Iriarte; Valetti, 2008), aos 59 e 44 dias após a semeadura (DAS), respectivamente no Exp. 1 e Exp. 2. Esse critério foi adotado como forma de proporcionar desenvolvimento radicular para ocupar o volume de solo dos vasos e as plantas terem área foliar suficiente para responderem, rapidamente, à redução do CRAS por ocasião da aplicação dos tratamentos. Até o início da aplicação dos mesmos, as plantas foram mantidas com o solo entre 60% e 80% do CRAS.

No início dos tratamentos, as repetições dos CRAS de 80% e 100% foram irrigadas para alcançarem o respectivo limite. Aquelas dos demais CRAS foram mantidas sem irrigação para atingir os respectivos CRAS. Ao atingir o limite, a irrigação diária correspondeu apenas à reposição da água consumida no dia anterior, elevando o CRAS sempre ao limite de equilíbrio de cada tratamento. Esse procedimento foi adotado até o final do experimento.

Para avaliar diferenças entre os tratamentos foi medida a temperatura das folhas (TF) da canola durante o ciclo. No Exp. 1 foram feitas medições nos dias 17/08/2017, 29/08/2017 e 04/09/2017, no Exp. 2 nos dias 13/06/2019, 28/06/2019 e 03/07/2019, respectivamente, aos 31, 43 e 49 e aos 1, 16 e 21 dias após o início dos tratamentos (59 ou 44 DAS) de CRAS. A TF foi medida com termômetro infravermelho, marca HOMIS, modelo 466-A, posicionado na inclinação de 45° e na distância aproximada de 20 cm da folha. Para a leitura foram escolhidas as folhas do topo das plantas, expostas à radiação solar.

A fenologia detalhada (Iriarte; Valetti, 2008) foi feita apenas no Exp. 2, registrando a emergência (EM), o início do florescimento (IF), o final do florescimento (FF) e a maturação fisiológica (MF). A colheita das plantas foi feita na MF em ambos experimentos.

No Exp. 1 foi medida a altura das plantas (ALT) aos 39 dias após a aplicação dos tratamentos de CRAS para avaliar o efeito dos mesmos sobre o crescimento vegetativo. A ALT foi medida com régua da base rente ao solo até topo da planta. No Exp. 2 foi medida a MSF daquelas folhas que perdiam a função biológica e se encontravam em estágio avançado de senescência. Essas folhas coletadas diariamente, foram armazenadas em embalagens de

papel e colocados em estufa de secagem de material vegetal a 70 °C com circulação de ar forçada até massa constante.

Ao final do ciclo foi contado o número de síliquas por planta (NS) e, após, as plantas foram cortadas rente ao solo, acondicionadas em embalagem de papel e colocadas em estufa com circulação forçada de ar a 70 °C até massa constante. A massa da matéria seca total (MST) foi determinada em balança de precisão de 0,1 g.

Após determinação da MST foram separadas 10 síliquas por tratamento em cada bloco para contagem do NG. Em seguida, as plantas foram trilhadas manualmente e os grãos foram separados e pesados para determinar a massa de mil grãos (MSG). Na sequência foram separadas quatro amostras de 100 grãos para determinação da respectiva massa e estimativa da MMG. No CRAS de 20% as plantas não produziram grãos e, portanto, as variáveis associadas a grãos receberam valor zero, uma vez que essa característica foi decorrente do tratamento aplicado. As avaliações foram feitas apenas nas plantas das balanças, e as demais do Exp. 1 foram consideradas bordadura.

Os dados das variáveis quantificadas foram submetidos à análise de variância explorando a interação entre os tratamentos dos fatores avaliados. Quando a interação foi significativa, avaliou-se a resposta dos níveis de CRAS em cada genótipo e quando a interação não foi significativa foram avaliadas as médias dos tratamentos de cada fator, isoladamente. A significância dos tratamentos foi avaliada pelo teste F e a comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, além de terem sido utilizadas regressões não lineares para cada caso de adequabilidade das mesmas.

A regressão não linear foi utilizada para avaliar as respostas das variáveis biofísicas ao CRAS, mediante o ajuste da função logística, com a seguinte parametrização:

$$y = a \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{b - x}{k}\right)} \quad (1)$$

Em que y é a variável ajustada; a é o valor assintótico da variável ajustada; b é o ponto de inflexão, que representa a mudança da concavidade da curva de resposta; k tem relação com a taxa da função, sendo que, quanto maior o

valor de k , mais rapidamente ocorreu a queda do valor da variável em resposta ao CRAS; e x corresponde ao tratamento de CRAS.

Com a função logística ajustada foi determinado o ponto crítico em relação ao CRAS, que apresenta significado biológico importante para compreensão da resposta de y . A definição dos pontos de interesse foi baseada em Passos et al. (2012) e adaptada de acordo com a compreensão do fenômeno estudado. Neste caso, foram calculados os pontos críticos de: estabilidade ($p1$), aceleração máxima da queda (Pam), inflexão da curva (Pi) e desaceleração máxima da queda (Pdm).

Para este estudo o $p1$ descreve a estabilidade de variação da resposta y , ou seja, indica o valor de CRAS a partir do qual os decréscimos de y passam a ser significativos. O ponto Pam , representa o CRAS em que os decréscimos de y se aceleram. Já o ponto Pi é o valor de CRAS em que ocorre 50% da resposta máxima de y e também marca a inversão da concavidade da curva ajustada a y . E o Pdm é o CRAS em que a queda da variável y começa a estabilizar.

Os pontos críticos foram obtidos por derivação matemática da função logística ajustada a cada variável medida, conforme preconizado por Passos et al. (2012) e por Mischan; Pinho (2014). O ponto Pi foi obtido a partir da segunda derivada da função, enquanto o Pam e o Pdm foram pela terceira derivada e o $p1$ foi pelo método da derivada de quarta ordem (Mischan et al., 2011), sendo todas as derivadas igualadas a zero. Por derivarem matematicamente das funções ajustadas, esses pontos críticos mantêm a variabilidade da curva ajustada e possibilitam identificar os CRAS críticos para cada variável estudada.

As análises estatísticas foram realizadas em ambiente do software R, utilizando funcionalidades de diferentes pacotes do mesmo. Tanto na análise de variância, quanto nas análises de regressão não linear foi realizada a análise de resíduos, com base na avaliação da normalidade dos erros pelos testes de Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises, Shapiro-Wilk, Shapiro-Francia e Anderson-Darling. A homogeneidade da variância foi avaliada pelo teste de Breusch-Pagan e pelo teste F. O teste de Durbin-Watson foi utilizado para avaliar a autocorrelação positiva dos erros de primeira ordem e o teste de Breusch-Godfrey para avaliar autocorrelações negativas e positivas de ordem superior a 1. As autocorrelações foram corrigidas quando necessário.

No caso da regressão não-linear foi utilizado o procedimento *gnls*, com ponderação da função de variância, de maneira específica para cada variável analisada. Para cada ajuste de dados foi avaliada a Curvatura de Bates e Watts (1980), seguindo os critérios de Ritz e Streibig (2008). Também foram determinados os intervalos de confiança (IC) dos coeficientes das funções, com 5% de probabilidade de erro. Os ICs dos coeficientes foram utilizados para avaliar as diferenças de resposta entre o Exp. 1 e Exp. 2 para uma mesma variável em função do CRAS, sendo que os coeficientes foram considerados significativamente, diferentes quando as amplitudes dos valores de ICs não se sobrepueram.

A abreviatura das variáveis, com o respectivo nome e unidades de medida, consta no Anexo II.

Resultados e Discussão

Condições micrometeorológicas na casa de vegetação

A radiação solar global incidente (R_g) na casa de vegetação foi semelhante nos experimentos, durante o ciclo da canola, exceto no início em que foi mais elevada no Exp. 2, devido a sementeira ter ocorrido cerca de 20 dias antes do Exp. 1. A diferença média foi inferior a 10%. Por outro lado, o saldo de radiação (R_n) foi menor no Exp. 2, em cerca de 39%, comparado ao Exp. 1, devido às aberturas no teto (lanternim) e das laterais terem ficado sempre abertas, com fechamento apenas em dias de chuva, enquanto no Exp. 1 permaneceram fechadas, exceto em alguns dias de alta T_m no final do ciclo das plantas. Os menores valores de T_m , T_{min} , UR e V e o DS com tendência de ser mais elevado em 2019, especialmente, a partir de 60 DAS, comprovam que o ambiente foi mais ameno durante o Exp. 2, do que no Exp. 1 (Figura 1).

A T_m no interior da casa de vegetação foi de 17,3 °C e 17,6 °C, variando entre a mínima absoluta de 1,5 °C e a máxima absoluta de 35,3 °C no Exp. 1 e entre 0,1 °C e 37,9 °C, no Exp. 2 respectivamente. Apesar dos picos elevados de T_{max} , em momentos que antecederam o acionamento dos exatores, a média da T_{max} , durante os experimentos foi de 24,9 °C e 26,0 °C, valores inferiores aos limites de abortamento de flores de canola, que está entre 27 °C (Wu et al., 2021) e 29,5 °C (Morrison; Stewart, 2002). A UR variou entre 70% e 96% e entre 62% e 94%, com média de 84% e 81% para os Exp. 1 e Exp. 2,

respectivamente. Desta forma, os valores térmicos e hídricos da atmosfera da casa de vegetação ficaram dentro das faixas preconizadas para a cultura (Dalmago et al., 2009).

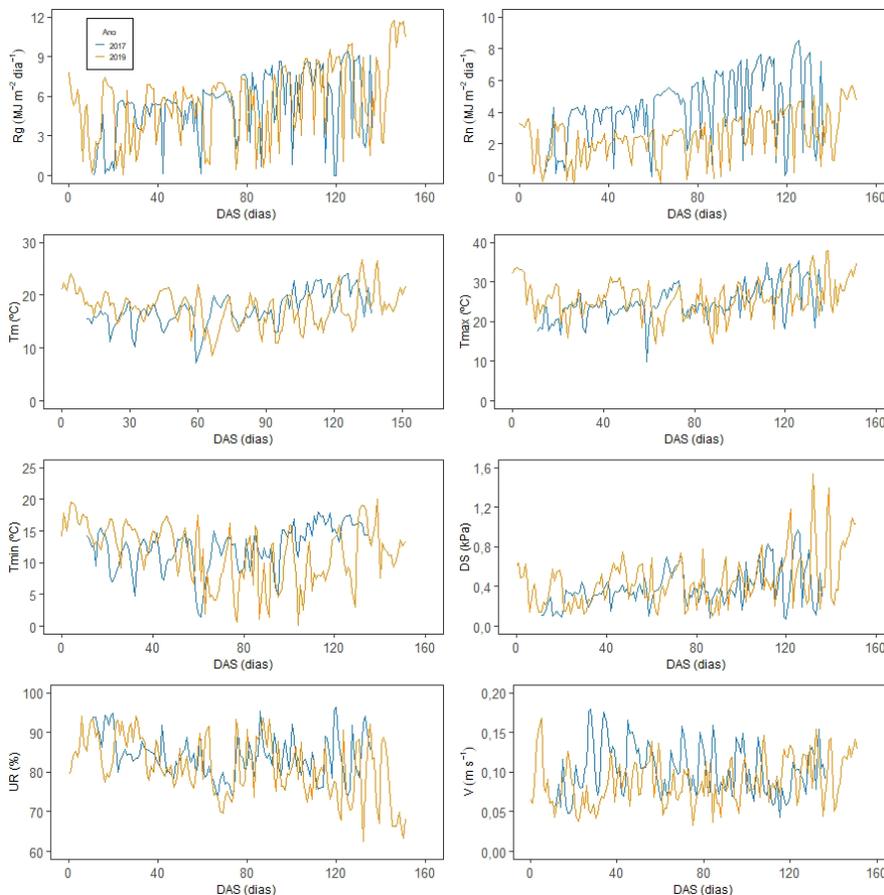


Figura 1. Radiação solar global (R_g), saldo de radiação (R_n), temperatura média do ar (T_m), temperatura máxima do ar (T_{max}), temperatura mínima do ar (T_{min}), déficit de saturação do ar (DS), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento (V), medidas no ambiente interno da casa de vegetação, nos experimentos de 2017 (Exp. 1) e 2019 (Exp. 2), em função do número de dias após a semeadura da canola (DAS). Passo Fundo, RS.

Caracterização da condição hídrica do solo e das plantas durante os tratamentos

Os tratamentos de CRAS foram aplicados dos 59 aos 136 DAS no Exp. 1 (Figura 2a e 2b) e dos 44 aos 152 DAS no Exp. 2 (Figura 2c e 2d), devido às diferenças no desenvolvimento das plantas nos dois experimentos. O CRAS mínimo, que correspondeu àquele do início de cada manhã, obtido por diferença de massa dos vasos entre dois dias consecutivos (base para a irrigação do dia), variou de maneira semelhante entre os genótipos e experimentos. Todos os tratamentos iniciaram com umidade do solo acima do CRAS de 60%, exceto para o de 20% no Diamond no Exp. 1, que iniciou levemente abaixo (Figura 2). Por se tratar do CRAS com déficit hídrico mais severo, essa condição foi desejável e não impactou negativamente os resultados. Zhu et al. (2021), consideraram os CRAS entre 60% e 65% como sendo sem déficit hídrico.

No dia de início (59 e 44 DAS, respectivamente, para Exp. 1 e Exp. 2) dos tratamentos de CRAS, apenas aquele de 100% recebeu a quantidade de água necessária para elevar a umidade do solo até o limite do tratamento, conforme mostra a linha superior da Figura 2. Os demais tratamentos ainda estavam com condição de umidade do solo acima dos limites específicos. É o caso, por exemplo, do CRAS de 60%, o qual demorou entre 10 a 15 dias para atingir CRAS abaixo 60%, para chegar na condição de receber a primeira irrigação. Os CRAS de 20% e 40%, não foram atingidos no Exp. 1. No Exp. 2, o tratamento de 20% se aproximou do limite ao final do ciclo, (Figura 2). A dificuldade em estabelecer os limites críticos nos tratamentos de maior déficit foi devido à redução inicial da umidade do solo paralisar o crescimento das plantas e, com isso, dificultar a extração de água. O CRAS de 20% afetou, severamente as plantas levando-as à morte antes de atingir o limite crítico do tratamento e entrarem na fase reprodutiva.

O manejo hídrico dos tratamentos promoveu oscilações diárias de CRAS que, em média não alcançaram o valor de CRAS do tratamento imediatamente inferior, especialmente após a estabilização dos tratamentos (≈ 78 e 62 DAS em 2017 e 2019, respectivamente), mostrando que a estratégia experimental adotada foi efetiva na distinção dos tratamentos de CRAS. Nos dias em que o teor de água no solo foi inferior ao valor do CRAS dos tratamentos, água foi adicionada na quantidade necessária para repor a massa do vaso e

o solo atingir o conteúdo de água previsto nos tratamentos. Também, as plantas refletiram de maneira esperada (Zhu et al., 2021) as condições hídricas do solo durante o período experimental, conforme pode ser observado nos valores da temperatura da folha (TF) (Figura 3).

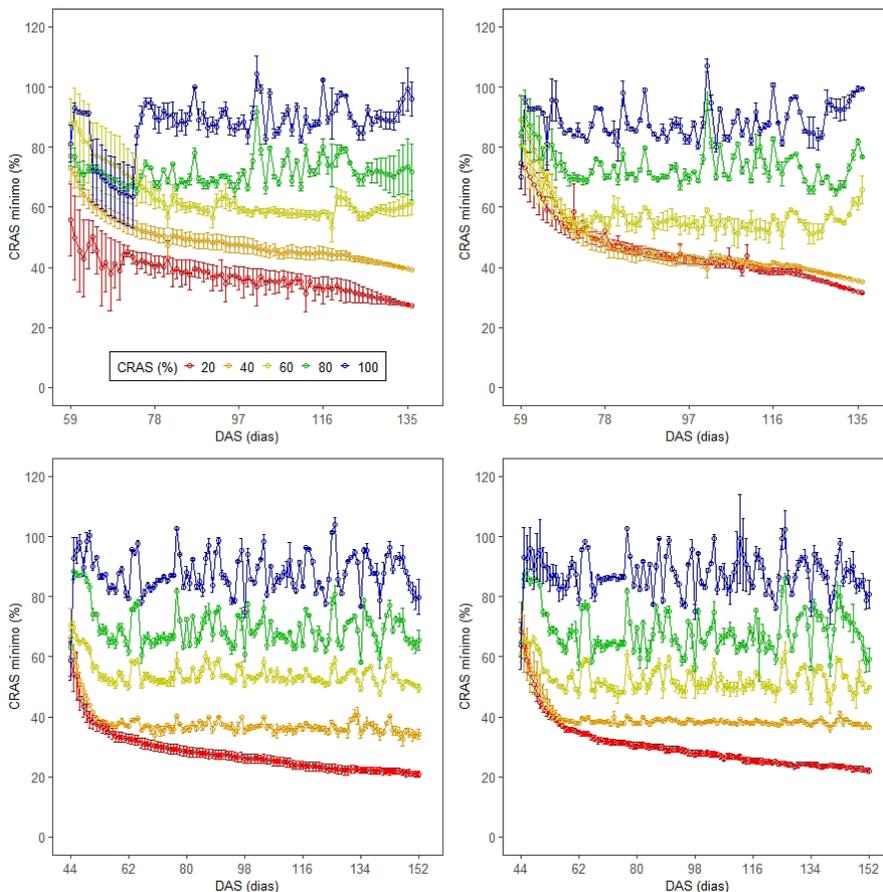


Figura 2. Conteúdo relativo de água no solo (CRAS) mínimo no interior dos vasos, estimado, diariamente, antes da irrigação, em função do número de dias após a semeadura da canola (DAS), nos experimentos de 2017 (Exp. 1) (a, b) e 2019 (Exp. 2) (c, d), para os genótipos Diamond (a, c) e Hyola 61 (b, d), cultivados em casa de vegetação. Passo Fundo, RS.

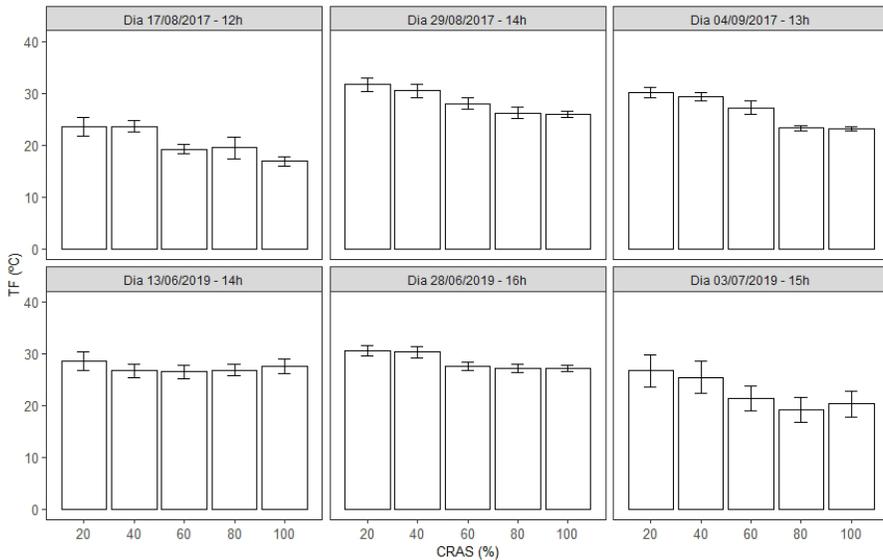


Figura 3. Temperatura da folha (TF) de plantas de canola cultivadas em vaso, submetida a diferentes conteúdos relativos de água no solo (CRAS) em três dias durante os tratamentos de CRAS, nos experimentos de 2017 (Exp.1) e 2019 (Exp. 2), conduzidos em casa de vegetação. As barras verticais representam o erro padrão da média em cada tratamento de CRAS. Passo Fundo, RS. OBS: dados médios dos genótipos Diamond e Hyola 61.

No Exp. 1 a TF foi mais elevada nos CRAS de 20% e 40%, em comparação aos CRAS de 80% e 100%, conforme mostra o erro padrão da média. No CRAS de 60% a resposta foi intermediária, ora diferindo dos CRAS menores ora diferindo dos maiores. Essa tendência foi observada em distintos horários nos três dias avaliados (Figura 3). A TF no CRAS de 20% e 40% foi, em média, de 28,0 °C e nos de 80% a 100% foi de 24,7 °C, com valor médio de 25,2 °C no de 60%. No Exp. 2 nos dias 28/06/2019 e 03/07/2019 a tendência da TF foi a mesma do Exp. 1, com diferença média entre os tratamentos de 20% e 40%, de 5,7 °C, em relação à média dos CRAS de 80% e 100%. Porém, no dia 13/06/2019 não houve diferenças de TF, devido a elevada umidade do solo (Figura 2), pois a leitura foi feita um dia após o início dos tratamentos. Esta resposta é coerente com o esperado, ou seja, o efeito do déficit hídrico sobre as plantas não é instantâneo, pois depende, ao mesmo tempo, das condições de demanda evaporativa da atmosfera (Figura 1) e da redução da umidade do solo (Figura 2).

A TF é frequentemente utilizada como indicador da condição hídrica das plantas ou do dossel, refletindo o estado hídrico do solo (Bergonci et al., 2000; Liu et al., 2011). Assim, nos CRAS de 20% e 40% e, em menor escala, naquele de 60%, devido a menor disponibilidade de água, ocorreu o fechamento dos estômatos (Zhu et al., 2021) e a transpiração foi reduzida (Gao et al., 2018) antes do que nos CRAS de 80% e 100%. Com isso houve menor dissipação da energia pelas folhas e a TF aumentou acima da T_m , fazendo as plantas entrarem em déficit hídrico (Bergonci et al., 2000), comprometendo funções fisiológicas e bioquímicas, relacionadas a produção de MST e da produtividade de grãos (Taiz; Ziger, 2004). Portanto, a associação dos resultados de TF (Figura 3) e a condição hídrica do solo (Figura 2), confirmam que a estratégia experimental foi eficiente no estabelecimento dos gradientes hídricos para identificar os níveis críticos de CRAS para a canola.

Efeito sobre a fenologia da canola

No que tange ao ciclo da canola, não houve interação e também não foi observada diferença significativa entre genótipos, provavelmente, por serem híbridos de ciclos semelhantes. No entanto, entre os tratamentos de CRAS houve diferença significativa. Naquele de 40%, as plantas prolongaram o ciclo em cerca de 13 dias e no de 60% em 8 dias, quando comparados aos de 80% e 100%. Esses resultados divergem de outros estudos, em que o déficit hídrico durante a fase reprodutiva antecipou a maturação dos grãos e reduziu o ciclo da canola (Birunara et al., 2011; Tesfamariam et al., 2010). Há duas razões que podem explicar a divergência dos resultados. A primeira é que a reprodução é a fase de maior sensibilidade da canola ao déficit hídrico (Mohtashami et al., 2020) e também é a fase mais responsiva (Gan et al., 2004). A segunda razão é que, no caso do presente estudo, os tratamentos de CRAS foram aplicados no início do alongamento, o que pode ter favorecido a adaptação das plantas expostas à baixa disponibilidade hídrica dos CRAS de 40% e 60% via ajustes osmóticos (Bianchi et al., 2005; Shahzad et al., 2021; Zhu et al., 2021). Nos CRAS de 80% e 100% não houve diferença significativa no ciclo, o que reforça a hipótese de adaptação, considerando que as plantas têm diversos mecanismos para esse fim na presença de condições estressantes (Waszczak et al., 2018). Além disso, a resposta ao déficit hídrico depende de diversos fatores, como a duração e a intensidade do estresse e o estágio da planta em que ocorre (Hosseini; Hassibi, 2011; Moghaddam et al., 2021). No CRAS de 20% as

plantas não completaram o ciclo, devido à morte das mesmas antes de iniciarem o florescimento (Tabela 1).

Tabela 1. Número de dias da emergência das plantas ao início do florescimento (EM-IF), intervalo em dias entre o início e o final do florescimento (IF-FF), intervalo em dias entre o final do florescimento e a maturação fisiológica (FF-MF) e ciclo completo (Ciclo) de dois genótipos de canola (Diamond e Hyola 61), em distintos conteúdos relativos de água no solo (CRAS) no experimento de 2019 (Exp. 2). Passo Fundo, RS.

Subperíodos e ciclo	Genótipo	CRAS					Média
		20%	40%	60%	80%	100%	
EM-IF (dias)	Diamond	0 a C	86 a A	79 a AB	79 a B	74 a B	64
	Hyola 61	0 a C	71 b A	64 b AB	63 b AB	61 b B	52
	Média	0	79	71	71	68	
CV (%)	5,5						
IF-FF (dias)	Diamond	0 a C	0 a C	54 a A	43 b B	47 b B	29
	Hyola 61	0 a B	0 a B	57 a A	58 a A	60 a A	35
	Média	0	0	55	50	54	
CV (%)	8,8						
FF-MF (dias)	Diamond	0 a B	0 a B	215 a A	24 a A	23 a A	14
	Hyola 61	0 a B	0 a B	25 a A	22 a A	22 a A	14
	Média	0	0	23	23	22	
CV (%)	15,0						
Ciclo (dias)	Diamond	0	157	153	145	144	120 a
	Hyola 61	0	156	151	143	143	119 a
	Média	0 D	157 A	152 B	144 C	144 C	
CV (%)	2,2						

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas na linha e minúscula na coluna, dentro de cada subperíodo e do ciclo completo, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O Subperíodo EM-IF foi mais longo no genótipo Diamond, em comparação ao Hyola 61, em todos os CRAS. Em média, a diferença foi de 12 dias (22%). As principais diferenças ocorreram entre os CRAS de 40% e 100%, com prolongamento do subperíodo no CRAS de 40% (Tabela 1).

O IF-FF no genótipo Diamond foi mais curto em 16 (27%) e 13 (21%) dias nos CRAS de 80% e 100%, diferindo significativamente do Hyola 61. No Diamond o déficit hídrico no CRAS de 60% ampliou a duração do subpe-

ríodo em cerca de 9 dias (16,5%), em relação à média dos CRAS de 80% e 100%, enquanto para o Hyola 61 não houve diferença significativa nos CRAS de 60%, 80% e 100%. Estes resultados diferem daqueles encontrados por Zirgoli e Kahrizi (2015), que relatam antecipação do florescimento em condição de déficit hídrico, provavelmente, porque esses autores aplicaram a restrição hídrica mais perto do florescimento. No CRAS de 40% não foi registrado o término do florescimento (FF).

No subperíodo FF-MF não houve diferença significativa entre os tratamentos, de maneira que houve compensação entre os subperíodos EM-IF e IF-FF, já que os ciclos não diferiram entre genótipos nos CRAS igual ou superior a 60%. Isso sugere que as diferenças na fenologia podem ser apenas devido a variabilidade genética existente na canola (Hosseini; Hassibi, 2011; Rad; Zandi, 2012; Haq et al., 2014; Tan et al., 2020), o que é reforçado pelas diferenças da fase mais crítica da cultura terem acontecido apenas nos CRAS de 80% e 100% (Tabela 1). Porém, o efeito do déficit hídrico sobre a fenologia da canola depende de quando o mesmo acontece. Se ocorrer após o estabelecimento das plantas, o início da floração pode ser antecipado, como uma forma de escape à condição ambiental (Zirgoli; Kahrizi, 2015). Por outro lado, se acontecer no final da floração e início do enchimento de grãos, a maturação dos grãos pode se antecipar, devido a redução da produção e translocação de fotoassimilados (Zirgoli; Kahrizi, 2015). Nesse experimento, provavelmente, o que ocorreu foi uma adaptação às condições estressantes (Hosseini et al., 2015; Waszczak et al., 2018), pelo fato dos tratamentos de CRAS terem sido aplicados precocemente e mantidos durante todo o período experimental. Para Korte et al. (1983) a duração do déficit hídrico é mais importante do que a intensidade na expressão das respostas das plantas de canola.

A resposta fenológica da canola indica que o CRAS de 60% é o centro de uma faixa de transição de sensibilidade hídrica que afeta a duração dos subperíodos e do ciclo da planta. A modulação entre fase vegetativa e reprodutiva, naturalmente varia de acordo com as características e respostas específicas dos genótipos ao fator hídrico (Haq et al., 2014; Moghaddam et al., 2021). Entretanto, parte desta modulação também é associada à temperatura do ar e ao fotoperíodo, uma vez que a canola responde a esses estímulos ambientais (Nanda et al., 1996). Araújo (2020), estudando desempenho agrônômico de genótipos de canola no cerrado brasileiro, ob-

servou menor número de dias para a entrada em florescimento do genótipo Diamond em comparação ao Hyola 61, provavelmente, por causa da diferença de resposta ao fotoperíodo.

Análise de variância das variáveis biofísicas

Para todas as variáveis biofísicas avaliadas, a análise de variância não apresentou interação significativa entre os tratamentos nos dois experimentos. Pereira et al. (2019) também não encontraram efeito de interação entre genótipos (Diamond e Hyola 61) e lâminas de irrigação. Isso indica que os genótipos apresentam resposta similar ao déficit hídrico, como já apontada em outros estudos (Gan et al., 2004). Entretanto, há diferenças significativas em graus de tolerância à falta de água no solo entre genótipos de canola (Bakhtari et al., 2017; Moghaddam et al., 2021).

Neste estudo foram observadas diferenças significativas entre genótipos para o NG e a MMG no Exp. 1 e MSF e MSG no Exp. 2. Para todas as variáveis, o genótipo Diamond não diferiu ou foi superior ao Hyola 61, com destaque na MSG e na MSF, em que a diferença em favor do Diamond foi, em média, de 35% e 31%, respectivamente. Para as variáveis NG e MMG as diferenças significativas entre genótipos foram na ordem de 8,7% e 5,5%, respectivamente (Tabela 2). Resultados semelhantes foram encontrados por Pereira et al. (2019) para estes genótipos cultivados a campo sob irrigação, onde os autores verificaram melhor desempenho do Diamond, em relação ao Hyola 61, em todas as variáveis estudadas e inferiram que o Diamond responde melhor à irrigação. No experimento aqui avaliado, este genótipo foi mais tolerante ao déficit de água no solo, comparado ao Hyola 61.

A maior MSG do genótipo Diamond não foi explicada pela resposta dos componentes da produtividade de grãos, uma vez que estes não apresentaram diferença significativa. Porém, a MSF mais elevada para o Diamond, em comparação ao Hyola 61, indica maior área foliar (El-Shafey; Abdelhalim, 2020) deste genótipo e, portanto, mais produção potencial de fotoassimilados para MSG, mas não aparecendo, significativamente, no NS, NG e MMG. Ou seja, houve uma provável diluição do efeito da MSF entre os componentes que explicam a MSG. No caso do Hyola 61 também não se verificou maior MMG, quando o NG foi menor, comparado ao Diamond, de modo que isso indica alcance do potencial de NG e MMG para os dois genótipos, no contexto dos experimentos (Tabela 2). De acordo com Ahmadi e Bhrani (2009), Rad

e Zandi (2012) e Zirgoli e Kahrizi (2015), o NG e/ou NS tem relação inversa com a MMG em canola sob condições hídricas adequadas, o que não foi verificado nesse estudo.

Tabela 2. Médias das variáveis de evapotranspiração média da cultura (ETc), altura de plantas (ALT), massa da matéria seca de folhas (MSF), massa da matéria seca total (MST), massa da matéria seca de grãos (MSG), número de siliquas por planta (NS), número de grãos por siliquas (NG) e massa de mil grãos (MMG) de dois genótipos de canola cultivados em ambiente de casa-de-vegetação, durante os anos de 2017 e 2019, correspondendo aos experimentos Exp. 1 e Exp. 2. Passo Fundo, RS.

Genótipo	Variáveis biométricas							
	ETc (g planta ⁻¹)	ALT (cm)	MSF (g planta ⁻¹)	MST (g planta ⁻¹)	MSG (g planta ⁻¹)	NS (n°)	NG (n°)	MMG (g)
.....Ano 2017.....								
Diamond	169,7 a	87,8 a	-	34,6 a	9,5 a	271,0 a	11,2 a	1,9 a
Hyola 61	166,9 a	82,3 a	-	34,7 a	6,7 a	195,6 a	10,3 b	1,8 b
Média	168,3	85,1	-	34,7	8,1	233,3	10,8	1,9
CV (%)	18,4	25,7	-	25,2	86,4	26,8	18,9	14,7
.....Ano 2019.....								
Diamond	165,6 a	-	24,6 a	99,4 a	19,6 a	433,7 a	14,6 a	2,8 a
Hyola 61	159,0 a	-	18,8 b	81,4 a	14,5 b	393,0 a	11,8 a	2,8 a
Média	162,3	-	21,7	90,4	17,1	413,4	13,2	2,8
CV (%)	15,3	-	14,3	10,4	15,7	11,7	16,1	8,0

Letras minúsculas iguais na coluna para cada variável, dentro de cada ano, não diferem significativamente pelo teste F a 5% de probabilidade de erro. A variável MSF foi determinada apenas em 2019 e a ALT apenas em 2017. OBS: dados médios dos genótipos Diamond e Hyola 61.

Embora em experimentos de campo o NS, NG e MMG podem variar muito, dependendo dos genótipos, das práticas de manejo adotadas e das condições ambientais de cultivo (Ghobadi et al., 2006; Ahmadi; Bharani, 2009; Birunara et al., 2011; Hosseini; Hassibi, 2011; Zirgoli; Kahrizi, 2015), os valores médios foram semelhantes aqueles encontrados a campo. A campo, o NS pode variar de 137 a 572 (Krüger et al., 2011; Bandeira et al., 2013; Sanches et al., 2014; Pereira et al., 2019), o NG de 10 e 23 (Krüger et al., 2011; Conceição et al., 2016; Pereira et al., 2019) e a MMG de 1,8 g e 3,73 g (Kaefer et al., 2014; Sanches et al., 2014).

Efeito do conteúdo relativo de água no solo – respostas absolutas

Nos dois experimentos, a exemplo de Ibarra et al. (2014), observou-se resposta não linear aos CRAS sobre todas as variáveis avaliadas. De maneira geral, os menores valores ocorreram nos CRAS de 20% e 40% e maiores naqueles de 80% e 100%, enquanto que o CRAS de 60% apresentou condição intermediária, diferindo dos dois extremos, conforme mostra o erro padrão da média. Em geral as funções logísticas ajustadas assumiram valor assintótico entre o CRAS de 80% e 100%, com resposta decrescente entre o CRAS de 80% e 40%. De acordo com o formato da curva logística foi possível separar as variáveis em quatro grupos: o primeiro representado pela ETc, o segundo por MST, MSG e NS, o terceiro pelo NG e MMG e o quarto pela ALT e MSF (Figura 4).

A ETc média diária variou de 23 a 426 g planta⁻¹ no Exp. 1 e de 4 a 320 g planta⁻¹ no Exp. 2, para os CRAS de 20% e 100%, respectivamente. No de 80% a ETc foi, praticamente, idêntica, com valores de 277 e 290 g planta⁻¹, no Exp. 1 e Exp. 2 respectivamente (Figura 4).

No Exp. 1 as diferenças foram significativas entre todos os CRAS acima de 20%. Nos de 80%, 60% e 40%, a redução da ETc foi de 34,9%, 80,8% e 94,5%, respectivamente, em relação ao de 100%. No Exp. 2 os de 80% e 100% não apresentaram diferença significativa e a redução da ETc naqueles de 60% e 40% foi de 45,4% e 77,5%, respectivamente (Figura 4). Decréscimos na transpiração ocorreram em função da menor disponibilidade de água no solo (Figura 2) que aumentou a restrição estomática (Gao et al., 2018). Valores semelhantes de decréscimo da transpiração de canola (39,1% e 53,4%) foram encontrados por Gao et al. (2018) em condições de estresse moderado e severo, equivalente aos potenciais de água no solo de -0,06 MPa e -0,12 MPa, comparado ao solo saturado (0 MPa).

A MSG, a MST e o NS apresentaram formatos semelhantes de evolução das curvas sigmóides em resposta aos CRAS, com valores próximos a zero no de 20% e máximos assintóticos de 18,7 e 33,2 g planta⁻¹ para MSG, 80,0 e 154,4 g planta⁻¹ para MST e 517 e 765 NS naquele de 100%, para os Exp.1 e Exp.2, respectivamente. Entre os CRAS de 80% e 60% houve redução de 65,0%, 52,0% e 46,7% no Exp. 1 e de 38,6%, 46,7% e 36,6%, no Exp. 2 para MST, MSG e NS, respectivamente. Já entre os tratamentos de 60% e

40% o decréscimo foi de 67,1%, 93,4% e 80,7% no Exp. 1 e 61,9%, 100% e 100% no Exp. 2, respectivamente para as mesmas variáveis (Figura 4).

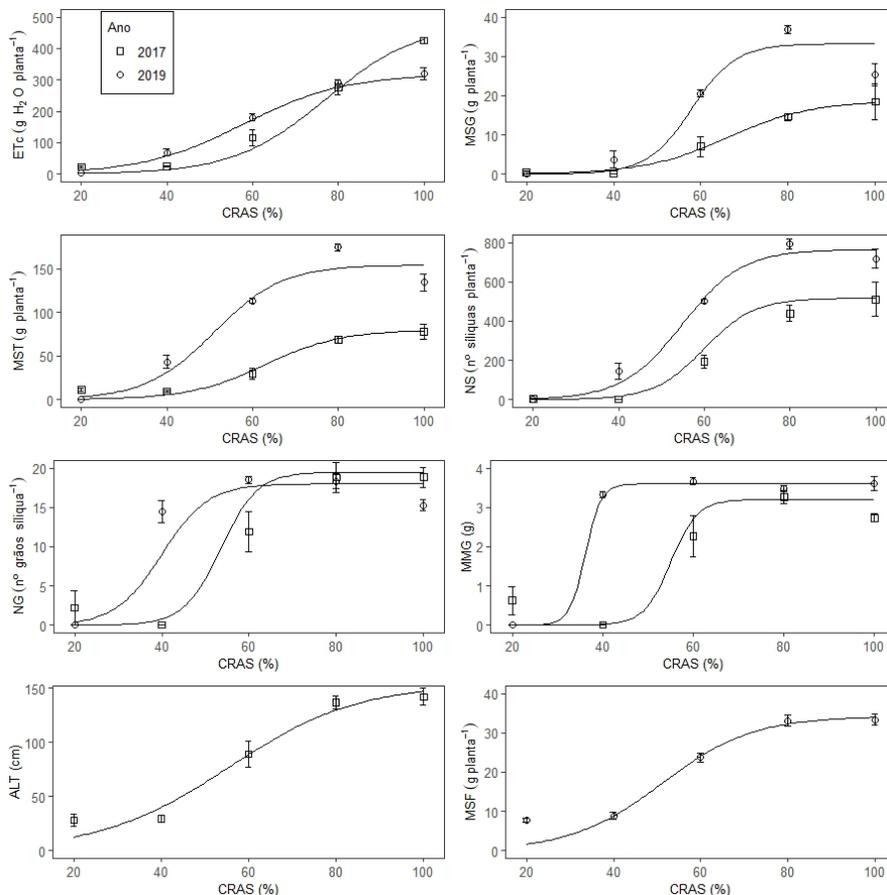


Figura 4. Evapotranspiração da cultura (ETC) da canola durante o ciclo, massa seca de grãos (MSG), massa seca total (MST), número de siliques por planta (NS), número de grãos por siliqua (NG), massa de mil grãos (MMG), altura das plantas (ALT) e massa seca de folhas (MSF) de canola, em função do conteúdo relativo de água no solo (CRAS), em experimentos conduzidos em casa de vegetação, durante os anos de 2017 e 2019. As barras verticais representam o erro padrão da média em cada tratamento de CRAS e as linhas que unem os pontos correspondem ao ajuste do modelo logístico. Passo Fundo, RS. Obs: as variáveis ALT e MSF foram medidas apenas em 2017 e 2019, respectivamente e os dados são valores médios dos genótipos Diamond e Hyola 61.

A redução na MST, especialmente, do tratamento de 60% foi maior do que encontrada em outros estudos. Dai et al. (2020) após restrição de irrigação por sete dias em canola cultivada em casa de vegetação, observaram redução de 36,3% na produção de biomassa aérea, valor pouco abaixo daquele encontrado por Khodabin et al. (2020) em condições experimentais semelhantes. Em induções de estresse moderado e severo, Gao et al. (2018) encontraram redução de 21,0% e 26,5% na MST, respectivamente, semelhantes aos observados por Biswas et al. (2019) e também encontrados a campo (Rad; Zandi, 2012). A diminuição da MST pode ocorrer em função da menor absorção de CO₂ (El-Shafey; Abdelhalim, 2020), como consequência do aumento da resistência estomáca, resultando em redução da fotossíntese (Gao et al., 2018).

Para a MSG é reportado na literatura que a variabilidade nas perdas decorrente de déficit hídrico apresenta maior amplitude do que para MST. Nesse sentido, estudos realizados em casa de vegetação indicam que as perdas de MSG variam de 15% a 61,7%, dependendo da intensidade do déficit hídrico durante o florescimento (Bilibio et al., 2011; Birunara et al., 2011; Haq et al., 2014). A campo os decréscimos de produtividade de grãos, por efeito de déficit hídrico, também foram elevados e oscilam entre 26,2% e 64,9% (Pereira et al., 2019; El-Shafey; Abdelhalim, 2020; Mohtashimi et al., 2020), quando comparados à condição adequada de suprimento hídrico.

O NS é o componente da produtividade de grãos da canola mais afetado pelo déficit hídrico (Diepenbrock, 2000; Ghobadi et al., 2006; Bilibio et al., 2011). Nesse estudo as reduções oscilaram entre 36,6% e 47,7% no CRAS de 60% em relação aos níveis mais elevados (CRAS de 80% e 100%). Esses resultados estão dentro da faixa de 8,3% e 58,5% de decréscimo no NS apontada por outros estudos em casa de vegetação (Bilibio et al., 2011; Birunara et al., 2011; Haq et al., 2014). Por sua vez, a campo a faixa de perdas é menor do que no ambiente controlado, oscilando entre 1,2% a 41,5%, (Ahmadi; Bahrani, 2009; Rad; Zandi, 2012; Zirgoli; Kahrizi, 2015; Elferjani; Soolanayakanahally, 2018; Moghadam et al., 2019; El-Shafey; Abdelhalim, 2020). O déficit hídrico durante a floração e início do enchimento de grãos reduz o NS em função da abscisão de flores e síliquas (Sinaki et al., 2007). Porém, quando o déficit hídrico ocorre no florescimento, a redução do NS se deve à diminuição do período de florescimento e a infertilidade de flores e abscisão das mesmas (Wright et al., 1996).

Para o NG e a MMG, as funções logísticas indicaram decréscimo acentuado entre os CRAS de 40% e 60% para NG e entre os de 20% e 60% para MMG, demonstrando atraso na ocorrência da taxa máxima de queda destas variáveis, em comparação às outras variáveis (Figura 4). O CRAS de 60% apresentou diferença significativa em relação ao de 40% para NG e MMG e não diferiu daquele de 80%, exceto para NG no Exp. 1. Entre os CRAS de 80% e 100% a diferença foi significativa somente para MMG no Exp. 1. No Exp. 2, apenas o de 20% não produziu grãos e o de 40% teve NG de 14,5 e MMG de 3,3 g. Em média, o NG e a MMG nos CRAS de 60%, 80% e 100% foram de 18,3 grão e 3,0 g no Exp. 1 e 17,4 grãos e 3,7 g no Exp. 2. No CRAS de 40% do Exp. 2 a redução do NG e MMG foi cerca de 17% e 11%, respectivamente, em relação à média dos demais CRAS.

O NG é afetado por fatores genéticos (Rao; Mendham, 1991) e ambientais, como o déficit hídrico. Birunara et al. (2011) relatam reduções no NG entre 0,9% e 57,6%, em ambiente controlado, de acordo com a severidade do estresse e o estágio de aplicação da restrição hídrica. A campo o NG oscila entre 10,7% e 29,4%, de acordo com a intensidade do déficit e o estágio de desenvolvimento das plantas (Moghadam et al., 2011; Rad; Zandi, 2012; Pereira et al., 2019). Por outro lado, Ahmadi; Bharani (2009) e Eslam (2009) não encontraram diferenças significativas no NG entre as condições com e sem estresse. Embora seja uma característica influenciada geneticamente (Rao; Mendham, 1991), a redução do número de grãos nas síliquas é explicada pela diminuição da fertilização das flores (Rad; Zandi, 2012) e pela restrição do suprimento de fotoassimilados para o enchimento de grãos em condições de déficit hídrico (Bahrani; Pourreza, 2016).

A MMG foi afetada em intensidade menor, principalmente, por CRAS mais restritivos, se comparado com outros componentes ou não da produtividade de grãos. Enquanto os resultados desse estudo apontam redução de 11% na MMG, Gan et al. (2004) encontraram percentuais da ordem de 2,6%, relativos ao déficit hídrico. A campo, sob estresse moderado e alto, as reduções na MMG variaram entre 0,2% e 17,6% (Rad; Zandi, 2012; Zirgoli; Kahrizi, 2015; Pereira et al., 2019; El-Shafey; Abdhalim, 2020). A redução da MMG, normalmente, é consequência da diminuição da produção e translocação de fotoassimilados para os grãos (Haq et al., 2014; Bahrani; Pourreza, 2016),

mas também é afetada pela diminuição da velocidade e do tempo de enchimento dos grãos (Zirgoli; Kahrizi, 2015).

A ALT e a MSF apresentaram valores tendendo a zero no CRAS de 20% e de, aproximadamente, 142 cm de altura e 33 g planta⁻¹, respectivamente, naquele de 100%. Para as duas variáveis, não houve diferença significativa entre os tratamentos de 80% e 100% e entre 40% e 20%, enquanto o CRAS de 60%, diferiu dos demais tratamentos. Neste CRAS houve redução de 36% e 29%, em relação à média dos CRAS mais elevados, enquanto no de 40% a redução foi de 66,9% e 62,9%, respectivamente para ALT e MSF, comparado ao de 60% (Figura 4).

Em tratamentos de déficit hídrico, a ALT é menor do que nos tratamentos que recebem água de maneira adequada, oscilando entre 7,0% e 26,4% (Haq et al., 2014; Khoabin et al., 2020). Por outro lado, Bilibio et al. (2011) não encontraram diferenças significativas entre os tratamentos de déficit hídrico em plantas cultivadas em ambiente controlado. Em condições de campo, Rad e Zandi (2012), Zirgoli e Kahrizi (2015) e El-Shafey e Abdelhalim (2020), também encontraram plantas menores em situação de estresse, comparada a condição de irrigação plena, que variaram entre 3,5% e 10,7%. Na iminência de ocorrer déficit hídrico, as plantas param de investir no crescimento em altura e na produção de folhas (Taiz; Zeiger, 2004), em resposta a atividades enzimáticas e não enzimáticas (Khodabin et al., 2020). Nestas condições, os compostos fotossintéticos são direcionados para reduzir o potencial osmótico das células e compensam esse gasto energético pouco efetivo, com redução de características morfológicas (Khodabin et al., 2020). A MSF é afetada de forma semelhante à ALT pelo déficit hídrico, mas é a paralisação do crescimento em ALT que é tida como um dos mais importantes sinais do efeito do déficit hídrico (Zirgoli; Kahrizi, 2015). Em termos de área foliar, resultados de El-Shafey e Abdhalim (2020) apontam redução da mesma da ordem de 20,3% por efeito de déficit hídrico.

As diferenças nas condições de demanda evaporativa no interior da casa de vegetação (principalmente diferenças no Rn) explicam a variabilidade interanual da ETc, conforme observado por Urrea et al. (2020) a campo. Por outro lado, o déficit hídrico imposto pelos CRAS explica a variação da ETc entre os mesmos e, na maioria dos casos,

a redução concomitante das respostas biológicas (Bilibio et al., 2011; Birunara et al., 2011; Pereira et al., 2019). A ideia principal é que a redução na disponibilidade de água no solo paralisa o crescimento das plantas (Ahmadi; Bahrani 2009; Rad; Zandi, 2012; Haq et al., 2014) e da área foliar (El-Shafey; Abdelhalim, 2020). Paralelamente ocorre a redução do potencial da água na planta (Kumar; Elston, 1992; Zhu et al., 2021) e aumento da restrição estomática (Kauser et al., 2006; Ardestani; Rad, 2012), com redução da transpiração (Kauser et al., 2006; Ardestani; Rad, 2012; El-Shafey; Abdelhalim, 2020) promovendo o aumento da temperatura do dossel (Bergonci et al., 2000; Eslam 2009; Ardestani; Rad, 2012). Nestas condições a fotossíntese total é reduzida (Rad; Zandi, 2012; Sabagh et al., 2019; El-Shafey; Abdelhalim, 2020) e a translocação de fotossintatos é afetada, alterando a relação fonte dreno, o que aumenta a competição entre fase vegetativa e reprodutiva (Rad; Zandi, 2012; Hosseini; Hassibi, 2011; Haq et al., 2014; Zirgoli; Kahrizi, 2015), dependendo de quando o déficit hídrico acontece e da sua intensidade (Korte et al., 1983). A expressão do efeito do déficit hídrico é observada no grau de redução da produtividade de grãos e na mudança das relações dos seus componentes (Ahmadi; Bahrani 2009; Hosseini et al., 2015; Zirgoli; Kahrizi, 2015; Mohtashami et al., 2020).

Os coeficientes da função logística das variáveis biofísicas foram majoritariamente significativos, exceto dois deles que apresentaram $p > 0,10$ e outros três, que ficaram no intervalo de significância entre $p > 0,05$ e $p < 0,10$ de probabilidade de erro. O R^2 foi elevado e o Erro relativo do modelo, na maioria dos casos, foi baixo, o que indica bom ajuste da função logística aos dados das variáveis biofísicas nos dois experimentos (Tabela 3).

O uso do IC associado aos coeficientes das funções logísticas é uma das formas que pode ser utilizada para comparar a resposta de uma mesma variável entre os experimentos (Zeviani et al. 2012). Neste sentido, apenas para o NG todos os coeficientes não apresentaram diferença significativa entre os Exp. 1 e Exp. 2 (Tabela 3). Nas demais variáveis, em pelo menos um dos coeficientes a diferença foi significativa. Para a ETc e a MMG o coeficiente b apresentou diferença significativa, provavelmente, devido ao formato distinto das curvas em seu ponto médio e ao deslocamento entre elas (Figura 4). No caso da MSG, MST e NS, o coeficiente a foi diferente entre os experimentos (Tabela 3). Por outro lado,

o formato das curvas da função logística foi semelhante, descrevendo adequadamente os processos sob o ponto de vista biofísico. Isso indica efeito relativo semelhante dos tratamentos de CRAS entre os experimentos, mesmo com potenciais produtivos diferentes. Conforme já mencionado as respostas distintas entre os anos, em parte, podem ser atribuídas a T_m relativamente mais baixa no Exp. 2, comparado ao Exp. 1 (Figura 1), a qual favoreceu o desenvolvimento produtivo da canola (Dalmago et al. 2018). Entretanto, o Exp. 2 foi conduzido apenas com as plantas dos baldes, sem a presença daquelas de borda que tinham no Exp. 1, o que também pode ter influenciado as respostas.

Efeito da disponibilidade relativa de água – respostas relativas

Os resultados absolutos sugerem a existência de respostas relativas semelhantes entre os dois experimentos. Esta hipótese foi testada utilizando o quociente entre o valor absoluto da variável, em cada CRAS, e o valor do CRAS máximo para aquela variável. Nesta escala de análise não foram encontradas diferenças significativas nos coeficientes da função logística entre os experimentos, indicando aderência à hipótese, exceto para o coeficiente b da ET_c e do NG (dados não apresentados). Com base nisso, a função logística foi ajustada à média dos valores relativos ao CRAS máximo de cada variável (Figura 5), obtendo-se coeficientes médios de ajuste, em função dos tratamentos de CRAS (Tabela 4).

Para as variáveis ET_c , MSG e NS todos os coeficientes foram significativos com $p < 0,05$, enquanto para a MST o coeficiente k teve significância entre $0,05 \geq p \leq 0,10$, e para o NG, a MMG e a ALT, k foi $p > 0,10$ (Tabela 4). Apesar disso, os resultados obtidos com as variáveis relativas foram consistentes com a descrição esperada dos efeitos relativos dos tratamentos de CRAS.

A função logística ajustada aos valores médios relativos (Figura 5), de maneira geral, apresentou R^2 mais elevado e Erro relativo, consideravelmente, mais baixo (Tabela 4) do que aqueles dos valores absolutos (Tabela 3). O melhor ajuste das curvas logísticas também se observa graficamente, como formato mais harmônico do que aquele dos valores absolutos, representando melhor alguns aspectos importantes das respostas da canola aos CRAS (Figura 5).

Tabela 3. Coeficientes da função logística (a, k e b) ajustada aos dados e respectivos intervalos de confiança (IC), com o coeficiente de determinação (R^2) e o erro relativo do ajuste (Erro) para as variáveis de evapotranspiração média diária da cultura (ETc), massa da matéria seca de folhas (MSF), massa da matéria seca total (MST), massa da matéria seca de grãos (MSG), número de siliquas por planta (NS), número de grãos por síliqua (NG), massa de mil grãos (MMG) e número de ramos por planta (NR) de canola, em experimentos conduzidos em casa de vegetação, durante os anos de 2017 e 2019. Passo Fundo, RS.

Coeficientes/ Estatísticas	Variáveis medidas							
	ETc (g planta ⁻¹)	ALT (cm)	MSF (g planta ⁻¹)	MSG (g planta ⁻¹)	MST (g planta ⁻¹)	NS (n°)	NG (n°)	MMG (g)
.....Ano 2017.....								
IC-2,5%	356,180	110,252	-	15,966	73,414	482,479	18,076	2,419
a	478,414	154,238	-	18,728	80,000	516,957	19,500	3,200
IC-97,5%	600,648	198,221	-	21,490	86,586	551,435	20,924	3,981
IC-2,5%	6,271	4,006	-	5,282	5,246	2,237	2,533	1,626
k	10,695	14,707	-	9,662	8,800	5,802	4,220	2,950
IC-97,5%	15,119	25,408	-	14,043	12,354	9,366	5,907	4,274
IC-2,5%	68,732	41,115	-	60,630	59,543	57,960	50,197	49,661
b	77,125	55,549	-	66,340	63,000	59,939	53,510	55,000
IC-97,5%	85,517	69,983	-	72,050	66,457	61,919	56,823	60,339
R ²	0,997	0,969	-	0,993	0,984	0,997	0,998	0,975
Erro (%)	10,02	14,12	-	12,58	36,61	8,61	6,24	1,19
.....Ano 2019.....								
IC-2,5%	273,717	-	31,893	26,372	118,141	680,083	11,804	3,476
a	318,749	-	34,242	33,221	154,352	764,917	18,000	3,600
IC-97,5%	363,780	-	36,591	40,070	190,564	849,751	24,196	3,724
IC-2,5%	7,183	-	8,956	3,728	0,055	5,057	-21,224	1,289
k	11,771	-	10,405	5,090	7,958	6,989	5,280	1,721
IC-97,5%	16,359	-	11,853	6,451	15,861	8,922	31,784	2,152
IC-2,5%	51,674	-	48,822	53,323	39,947	50,982	28,139	34,868
b	57,948	-	51,128	57,885	51,019	54,823	40,000	36,104
IC-97,5%	64,222	-	53,434	62,446	62,091	58,664	51,861	37,339
R ²	0,992	-	0,997	0,974	0,898	0,992	0,829	0,998
Erro (%)	5,30	-	0,01	2,46	0,009	0,88	36,626	0,02

Obs: Todos os valores dos coeficientes da função logística são significativos a 5% pelo teste t, exceto aqueles marcados em amarelo que são significativos a 10% e aqueles marcados em laranja, que não são significativos pelo mesmo teste. Obs: dados médios dos genótipos Diamond e Hyola 61. IC = é o intervalo de confiança.

Tabela 4. Coeficientes da função logística (a, k e b) ajustada aos dados relativos (%) ao valor máximo de cada variável e respectivos intervalos de confiança (IC), com o coeficiente de determinação (R^2) e o erro relativo do ajuste (Erro) para as variáveis de evapotranspiração média diária da cultura (ETc), massa da matéria seca de folhas (MSF), massa da matéria seca total (MST), massa da matéria seca de grãos (MSG), número de síliques por planta (NS), número de grãos por síliqua (NG), massa de mil grãos (MMG) e altura de plantas (ALT) de canola cultivada em casa de vegetação. Passo Fundo, RS.

Coeficientes/ Estatísticas	Variáveis medidas							
	ETc (%)	MSF (%)	MST (%)	MSG (%)	NS (%)	NG (%)	MMG (%)	ALT (%)
IC-2,5%	98,111	78,949	78,645	89,300	94,967	82,226	89,014	79,577
a	112,838	108,223	94,836	90,760	97,177	94,290	95,000	107,810
IC-97,5%	127,565	137,496	111,028	92,219	99,386	106,354	100,986	136,044
IC-2,5%	11,932	3,731	3,307	3,644	6,389	1,077	1,655	4,113
k	14,138	15,235	9,688	4,829	6,450	6,816	5,800	14,237
IC-97,5%	16,344	26,739	16,069	6,015	6,510	12,554	9,945	24,362
IC-2,5%	63,517	36,672	49,876	59,698	57,477	38,010	37,662	42,167
b	68,907	51,141	57,225	60,106	57,849	44,052	40,000	55,319
IC-97,5%	74,297	65,611	64,574	60,515	58,221	50,094	42,338	68,472
R^2	0,998	0,962	0,983	0,999	0,999	0,983	0,996	0,970
Erro (%)	0,50	16,970	16,107	1,747	0,021	13,000	6,706	16,95

Obs: Todos os valores dos coeficientes da função logística são significativos a 5% pelo teste t, exceto aqueles marcados em amarelo que são significativos a 10% e aqueles marcados em laranja, que não são significativos pelo mesmo teste. Obs: dados médios dos genótipos Diamond e Hyola 61. IC = é o intervalo de confiança.

Para a maioria das variáveis em formato relativo não houve diferença significativa entre os tratamentos de CRAS de 80% e 100%, conforme demonstra o erro padrão da média. Para a ETc o valor mais elevado foi observado no CRAS de 100%. No caso do NG e da MMG a partir daqueles de 60% não houve diferença significativa em relação aos mais elevados, indicando que, de maneira geral estas variáveis foram menos afetadas pelo déficit hídrico, do que as outras, conforme apontado e discutido para os valores absolutos. Entre os CRAS de 20% e 40% não houve diferença significativa para todas as variáveis (Figura 5).

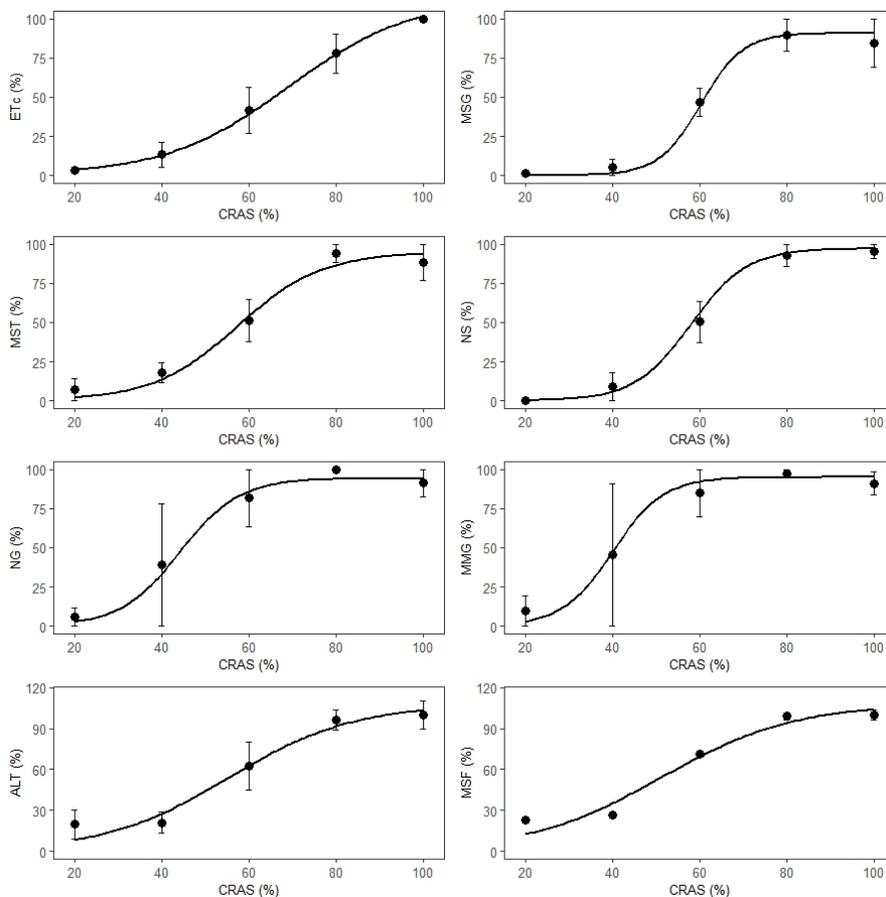


Figura 5. Valores relativos (%), em relação ao valor máximo de evapotranspiração da cultura (Etc) durante o ciclo das plantas de canola, massa seca de grãos (MSG), massa seca total (MST), número de síliques por planta (NS), número de grãos por síliques (NG), massa de mil grãos (MMG), altura de planta (ALT) e massa seca de folhas (MSF) de canola, em função do conteúdo relativo de água no solo (CRAS), em experimentos conduzidos em casa de vegetação (média dos Exp. 1 e Exp. 2). Passo Fundo, RS. OBS: dados médios dos genótipos Diamond e Hyola 61.

Os pontos críticos da função logística ajustada aos dados (Passo et al., 2012; Mischan; Pinho, 2014) podem ser observados na Tabela 5. Estes indicadores possibilitam ampliar a compreensão das respostas ao fator hídrico, identificando os níveis de CRAS a partir dos quais a redução na resposta da variável estudada passa a ser significativa (Silva et al., 2021). Os pontos $p1$ e

o *Pdm* apresentaram valores distintos para as variáveis analisadas. Isso indica que os processos de crescimento e produção biológica e, por conseguinte, da formação da produtividade de grãos foram afetados por diferentes CRAS, conforme sinalizado por (Sinaki et al., 2007). Essa mesma constatação já é conhecida para diferentes espécies (Zhang et al., 2019; Huang et al., 2020), mas ainda é pouco quantificada para a canola.

A ETc foi a primeira variável a ser afetada pela redução do CRAS, conforme indicam os pontos críticos, os quais foram os mais elevados de todos. O ponto *p1* ficou acima de 100%, evidenciando que as perdas de ETc foram significativas em pequenas reduções de CRAS. A redução na ETc foi mais abrupta no CRAS de 88,6%, no ponto crítico *Pdm*, e foi reduzida pela metade no CRAS 69,7% no ponto crítico *Pi*. Ao atingir o *Pam*, com CRAS de 50,9%, a canola já tinha consumido cerca de 75% da água disponível no solo. A redução da transpiração foi a primeira estratégia da canola ao ser submetida às restrições dos CRAS (Taiz; Zeiger, 2004).

Após a ETc, a restrição hídrica afetou, de maneira mais significativa, variáveis de crescimento das plantas, como a ALT e a MSF. O *p1* para essas variáveis indicou que a canola paralisou, significativamente, o crescimento e a produção de folhas com CRAS de 88,0% e 86,1%, respectivamente. Nestes CRAS as plantas deixam de translocar fotoassimilados para os pontos de crescimento e produção de folhas e passam a investir em funções bioquímicas (Khodabin et al., 2020) e em estruturas reprodutivas que tiveram *p1* mais baixos. A MSF tem relação estreita com a área foliar (Raman et al. 2020), de maneira que é possível inferir que a ALT e a AF foram os primeiros processos biológicos afetados pela redução do CRAS. As perdas mais abruptas para essas variáveis foram com CRAS de 74,1% e 71,2%, respectivamente, conforme mostra o ponto crítico *Pdm* (Tabela 5).

A MST, o NS e a MSG foram significativamente afetadas a partir dos CRASs de 79,4%, 72,6 e 71,2%, respectivamente, conforme indicou o *p1*. Isso mostra que, em condição de déficit hídrico a canola restringiu a produção biológica, antes de penalizar a produtividade de grãos, a qual foi mantida, inicialmente, pela translocação de fotoassimilados e, principalmente, pela fotossíntese produzida pelas síliquas (Fochesatto et al., 2016). O NS foi o componente da produtividade de grãos mais sensível a redução do CRAS, por ter sido o primeiro a ser afetado, conforme apontado por Ahmadi e Bahrani

(2009), sendo o componente que modulou a produtividade de grãos final por planta (MSG) (Diepenbrock, 2000; Ahmadi; Bahrani, 2009). Essa observação está de acordo com resultados de outros estudos que mostram a alta emissão de flores pela canola, modulando a fixação das mesmas de acordo com as condições ambientais durante o ciclo (Battisti et al., 2013). O *pdm* destas variáveis ficou entre CRAS de 66% e 70%, sendo esses os pontos em quem houve queda mais acentuada, com o aumento de restrição hídrica. O *Pi* ocorreu entre os CRAS de 57% e 60% e as perdas estabilizaram com CRAS na faixa entre 44% e 54%.

Tabela 5. Pontos críticos (*Pam*, *Pi*, *Pdm*, *p1*) relacionados ao conteúdo relativo de água no solo (CRAS), obtidos da derivação matemática da função logística ajustada aos dados das variáveis evapotranspiração média diária da cultura (ETc), massa da matéria seca de folhas (MSF), massa da matéria seca total (MST), massa da matéria seca de grãos (MSG), número de siliquas por planta (NS), número de grãos por siliqua (NG), massa de mil grãos (MMG) e altura de plantas de canola, cultivada em ambiente de casa de vegetação. Passo Fundo, RS.

Pontos Críticos	Variáveis medidas							
	ETc	MSF	MST	MSG	NS	NG	MMG	ALT
Pam (%)	50,9	31,1	44,5	53,7	49,4	35,1	32,4	36,6
Pi (%)	69,7	51,1	57,2	60,1	57,8	44,1	40,0	55,3
Pdm (%)	88,6	71,2	69,7	66,5	66,3	53,0	47,6	74,1
P1 (%)	102,5	86,1	79,4	71,2	72,6	59,7	53,3	88,0

Pam = ponto de aceleração máxima; *Pi* = ponto de inflexão; *Pdm* = ponto de desaceleração máxima; *P1* = ponto de estabilidade. OBS: dados médios dos genótipos Diamond e Hyola 61.

O NG e a MMG apresentaram *p1* de 59,7% e 53,0%, respectivamente, indicando que ambos componentes da produtividade de grãos foram menos sensíveis ao estresse do que os outros e também em relação às variáveis de crescimento das plantas (MSF e ALT). Pelo valor de *p1*, o NG foi afetado antes do que a MMG e isso afetou a MMG. Quando o NG é reduzido, a MMG tende a se elevar, uma vez que aumenta a força de dreno dos grãos que ressam nas siliquas, sincronizando uma nova relação fonte dreno (Diepenbrock, 2000). A campo também se espera essa relação, no entanto, ela pode ser diferente em termos de intensidade, porque o déficit hídrico, na maioria das vezes, não é controlado e pode atingir os limites críticos em momentos distintos durante o desenvolvimento das plantas (Sinaki et al., 2007). Isso pode ser constatado pela variabilidade dos resultados observados a campo para essas

duas variáveis (Ahmadi; Bharani, 2009; Eslam, 2009; Moghadam et al., 2011; Zirgoli; Kahrizi, 2015; El-Shafey; Abdhalim, 2020). Os demais pontos críticos (*P_{dm}*, *P_i*, *P_{am}*) para NG e MMG também foram mais baixos, em relação às outras variáveis. O *P_i* ocorreu entre CRASs de 40% a 45%, com estabilização das perdas entre a faixa de CRAS de 32% a 36% (Tabela 5).

Teor de óleo nos grãos de canola

A análise de variância mostrou interação significativa entre genótipos e CRAS para o teor de óleo (TO) de canola. Para o genótipo Diamond o TO variou entre 36,9% e 47,0%, valores maiores do que para o Hyola 61, que foi entre 37,6% e 43,1%, porém, são valores dentro da média normalmente encontrada para a cultura, que é de 40% a 45% (El-Shafey; Abdelhalim, 2020).

Em relação aos tratamentos de CRAS a variação seguiu a forma sigmoide, com diferença maior entre genótipos no CRAS de 40%, em função do Hyola 61 não ter produzido grãos neste tratamento (Figura 6). Para ambos genótipos não houve diferença significativa entre os CRAS de 80% e 100%, conforme mostra o erro padrão da média. Nestes o TO médio foi de 42,1% e 46,3%, com diferença significativa entre o genótipo Hyola 61 e Diamond, respectivamente (Figura 6). No CRAS de 60% não houve diferença entre os genótipos e também não teve diferença em relação ao de 40% para o Diamond. O TO médio para o CRAS mais restritivo foi de 37,6% (CRAS de 40% para o Diamond). Isso significa que o déficit hídrico resultou em redução de 4,5 e 8,7 pontos percentuais no Hyola 61 e Diamond, respectivamente.

Em casa de vegetação, Bilibio et al. (2011) encontraram redução de 4,3 pontos percentuais no tratamento de 60% da ETc, em relação àquele de irrigação completa, enquanto que Hosseini e Hassibi (2011) observaram redução média de 69,8% na quantidade de óleo produzido pelas plantas em déficit hídrico, em relação àquelas sem estresse. No cultivo a campo, normalmente, são relatadas reduções do TO entre 1,0 e 14,6 pontos percentuais (Sinaki et al., 2007, Rad; Zandi, 2012; Bahrani; Pourreza, 2016; El-Shafey; Abdhalim, 2020) como efeito do déficit hídrico. Com a redução do TO ocorre aumento no teor de proteína (Ghobadi et al., 2006; Sinaki et al. 2007), devido a relação inversa entre eles (Hossain et al., 2019) e alterações na qualidade do óleo pelo aumento dos teores de ácido erúico e diminuição de ácido oleico (Ulhan et al., 2012). Diversos fatores podem estar associados à relação TO e proteína nos grãos de canola, bem como na composição do óleo (Rathke et al., 2006).

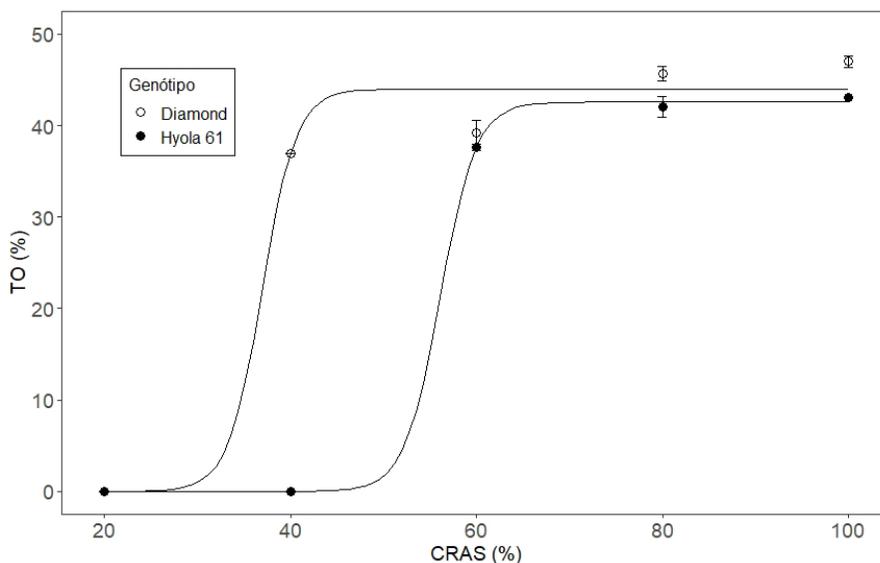


Figura 6. Teor de óleo nos grãos (TO) de dois genótipos de canola, cultivados em casa de vegetação, em função do conteúdo relativo de água no solo (CRAS) e o erro padrão da média (barra de erros). Passo Fundo, RS.

A função logística ajustada aos dados de TO apresentou R^2 de 0,98 e 0,99 e Erro de ajuste de 0,006 e 0,010, respectivamente para o híbrido Diamond e Hyola 61 (Figura 6). Os coeficientes da função logística não apresentaram diferenças significativas no valor assintótico (a), ou seja, no TO para os CRAS máximos, ao contrário do que mostrou o erro padrão da média. Isso ocorreu porque o valor assintótico foi influenciado também pelo TO do CRAS de 60%, ao contrário do erro padrão, que foi apenas função da variabilidade dentro dos CRAS. O $p1$ indicou que o incremento no TO deixou de ser significativo a partir dos CRAS estimados de 41,2% e 60,5% para Diamond e Hyola 61, respectivamente, valores estimados pela equação ajustada. Imediatamente após esses valores, evidenciou-se queda brusca da curva de produção de óleo a partir do ponto de Pdm (Tabela 6).

Também não se verificou diferença significativa para o coeficiente k , relacionado com a taxa de variação do TO, em função dos CRAS, conforme mostra o IC. Diferenças significativas foram observadas apenas para o coeficiente b , o qual corresponde ao ponto crítico Pi (Tabela 6). Enquanto para

o Diamond, o P_i aconteceu no CRAS de 37,0%, para o genótipo Hyola 61 foi em 56,1%. Isso se deve a não produção de grãos pelo Hyola 61 nos CRAS inferiores a 60%. Em função disso, o P_{am} indicou aceleração da curva de TO em momentos distintos para os genótipos, iniciando primeiro no Diamond e depois no Hyola 61. Apesar disso, se tivesse havido produção de grãos no tratamento de CRAS de 40% pelo Hyola 61, seria esperado que não houvesse diferença significativa entre os genótipos, considerando que não houve diferença significativa nos coeficientes a e k entre as funções logísticas ajustadas aos dados de TO dos dois híbridos de canola (Tabela 6).

Tabela 6. Coeficientes da função logística (a , k e b) ajustada aos dados de teor de óleo nos grãos (%), em função de níveis de disponibilidade de água no solo (CRAS) e respectivos intervalos de confiança (IC), com os pontos críticos (P_{am} , P_i , P_{dm} , p_1) associados ao conteúdo relativo de água no solo, obtidos da derivação da função logística ajustada aos dados, para dois genótipos de canola. Passo Fundo, RS.

Genótipo	Coeficientes da função logística/Intervalo de confiança (IC)								
	a			k			b		
	valor	IC-2,5%	IC-97,5%	valor	IC-2,5%	IC-97,5%	valor	IC-2,5%	IC-97,5%
Diamond	43,97	38,60	49,34	1,83	1,33	2,34	36,96	35,28	38,65
Hyola 61	42,57	41,69	43,45	1,92	1,52	2,31	56,12	55,24	57,00
Genótipo	Pontos críticos da função logística								
	P_{am}	P_i	P_{dm}	p_1					
Diamond	34,5	37,0	39,4	41,2					
Hyola 61	53,6	56,1	58,6	60,5					

Considerações finais

As diferenças entre genótipos (Tabela 2) foram decorrentes das características intrínsecas dos mesmos, basicamente, genéticas (Haq et al., 2014; Moghaddam et al., 2021), uma vez que não houve um padrão consistente de variabilidade nos dois experimentos. Essa constatação é corroborada pelos resultados observados nos subperíodos fenológicos, em que houveram diferenças significativas entre genótipos quanto ao EM-IF e quanto a duração do IF-FF, mas não no FF-MF. O genótipo Hyola 61 antecipou a floração, apresentando maior período do IF-FF nos CRAS mais elevados, enquanto que o

contrário foi observado com o Diamond. Essa compensação não teve reflexo sobre as produtividades de grãos e tampouco sobre os componentes da produção. No caso da fenologia, o CRAS de 60%, de maneira geral, parece ser o limite em que ocorrem diferenças significativas no florescimento da canola (Tabela 1).

Os valores absolutos apresentados na Tabela 3 e Figura 4 são restritos ao ambiente de casa de vegetação. Já aqueles da Tabela 4 e Figura 5, têm uma amplitude de utilização maior, uma vez que são apresentados de maneira relativa. Esses resultados evidenciam que os efeitos dos CRAS não diferiram entre os experimentos, apesar de terem sido anos com potenciais produtivos diferentes (Figura 1). O ponto crítico $p1$, da função logística, indicou que o risco de perda de produtividade de grãos da canola aumenta, significativamente, próximo a 60% do CRAS máximo. A redução do potencial produtivo, representado pela ETc, produção de folhas (MSF) e de biomassa (MST) foi afetado primeiro, em CRAS estimados, de cerca de 89%, 86% e 80%, respectivamente. Por outro lado, o componente NS foi o primeiro a ser afetado, com $p1$ de 72,6% e os componentes da produtividade de grãos, como NG e MMG foram afetados mais tardiamente, com CRAS na faixa de 60% e 50%, respectivamente.

Para o TO a interação significativa indicou que os genótipos de canola tiveram respostas distintas aos CRASs. No entanto, o ajuste da função logística (Figura 6) e seus pontos críticos (Tabela 6), demonstrou que esse efeito foi devido, unicamente, ao fato do genótipo Hyola 61 não ter produzido grãos no CRAS 40%, ao contrário do genótipo Diamond. O TO variou na faixa entre 42% e 44%.

Para a canola, Bilibio et al. (2011) encontraram relação linear de redução das variáveis avaliadas em função dos níveis de ETc utilizados como tratamento (mínimo de 60% da ETc) e não conseguiram estabelecer níveis críticos, devido utilizar apenas três tratamentos. Da mesma forma, Zhu et al. (2021) trabalharam com CRAS inferiores a 65%, limitando a estimativa dos níveis críticos. Em condições de campo, Pereira et al. (2019) encontraram a máxima eficiência técnica para a irrigação, baseada na evapotranspiração de referência (ETo), como sendo entre 50% e 100% da ETo para NS, 91% da ETo para NG, entre 80% e 100% da ETo para MMG e entre 116% e 125% da ETo para MSG. Esses valores são distintos daqueles encontrados no pre-

sente estudo, mas sinalizam para diferenças similares entre produtividade de grãos e componentes da produtividade de grãos.

Para outras culturas os limites de CRAS no solo também são bem diversos. Para o trigo na China, o CRAS de 75% da capacidade de campo foi apontado como o limite de melhor produtividade de grãos e melhor eficiência de uso da água (Zhang et al., 2019). Para o milho, Costa et al. (2008) encontraram diferença significativa a partir de 75% da água disponível no solo para produção e MST, mas não observaram diferença para produtividade de grãos. No caso da soja, diferenças significativas no número de legumes por planta, número de grãos por planta e peso de grãos por planta foram observados a partir de estresse leve de 70% da água disponível máxima e não foram encontradas diferenças para altura de inserção do primeiro legume e na MMG em um dos anos experimentais, enquanto no segundo ano diferenças ocorreram apenas para altura de inserção do primeiro legume (Báez et al., 2020)..

Conclusões

Os genótipos de canola Diamond e Hyola 61 não diferem na resposta à disponibilidade relativa de água no solo.

O efeito do conteúdo relativo de água no solo é distinto de acordo com a variável analisada.

A evapotranspiração da cultura é a primeira variável biofísica afetada pelo déficit hídrico, com limite crítico próximo a CRAS de 100%.

A altura de plantas e massa seca de folhas são afetadas, significativamente, por limites críticos na faixa entre 80% e 100% de conteúdo relativo de água no solo, enquanto os limites críticos para a matéria seca total, matéria seca de grãos e o número de siliquas está entre 70% e 80%.

Os componentes da produtividade, como o número de grãos por siliqua e a massa de mil grãos, apresentam limites críticos induzidos por conteúdo relativo de água no solo na faixa entre 50% e 60%, menores do que aqueles relativos à produção biológica.

O teor de óleo nos grãos é menos afetado pela redução no conteúdo relativo de água no solo do que outras variáveis biofísicas, apresentando limite

crítico próximo a 40%, quando há produção de grãos neste nível de disponibilidade hídrica.

Agradecimentos

Os autores agradecem, em especial, aos empregados da Embrapa Trigo Elisson Stéphânio Savi Pauletti e Cristian Maicol Plentz e a todos os empregados da Casa de Apoio, pelo auxílio na condução dos experimentos.

Referências

- AHMADI, M.; BAHRANI, M. J. Yield and yield components of rapeseed as influenced by water stress at different growth stages and nitrogen levels. **American Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 5, n. 6, p. 755–761, 2009.
- AKRAM, N. A.; IQBAL, M.; MUHAMMAD, A.; ASHRAF, M.; AL-QURAINY, F.; SHAFIQ, S. Aminolevulinic acid and nitric oxide regulate oxidative defense and secondary metabolisms in canola (*Brassica napus* L.) under drought stress. **Protoplasma**, v. 255, n. 2, p. 163-174, 2018.
- ARAÚJO, L. N. de. **Desempenho de genótipos de canola no núcleo do cerrado**. Brasília, 2020. 51 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade de Brasília, 2020.
- ARDESTANI, H. G.; HOSSEIN, A.; RAD, S. Impact of regulated deficit irrigation on the physiological characteristics of two rapeseed varieties as affected by different potassium rates. **African Journal of Biotechnology**, v. 11, n. 24, p. 6510–6519, 2012.
- BÁEZ, M. S. A.; PETRY, M. T.; CARLESSO, R.; BASSO, L. J.; ROCHA, M. R. da; RODRIGUEZ, G. J. Balanço hídrico e produtividade de soja cultivada sob diferentes níveis de déficit hídrico no Sul do Brasil. **Investigación Agraria**, v. 22, n. 1, p. 03-12, 2020.
- BAHRANI, A.; POURREZA, J. Effect of alternate furrow irrigation and potassium fertilizer on seed yield, water use efficiency and fatty acids of rapeseed. **Idesia**, v. 34, n. 2, p. 35-41, 2016.
- BAKHTARI, B.; RAZI, H.; KAZEMEINI, S. A. Screening drought tolerant rapessed cultivars using yield and physiological indices. **Annual Research & Review in Biology**, v. 13, n. 1, p. 1-10, 2017.
- BANDEIRA, T. P.; CHAVARRIA, G.; TOMM, G. O. Desempenho agrônômico de canola em diferentes espaçamentos entre linhas e densidade de plantas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 10, p. 1332-1341, 2013.
- BATES, D.; WATTS, D. Relative curvature measures of non-linearity. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 42, n. 1, p. 1–25, 1980.
- BATISTI, R.; PILAU, F. G.; SCHWERZ, L.; SOMAVILLA, L.; TOMM, G. O. Dinâmica floral e abortamento de flores em híbridos de canola e mostarda castanha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 2, p. 174-181, 2013.
- BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G.; SANTOS, A. O. Condutância foliar como um indicador de déficit hídrico em milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 1, p. 27-24, 2000.

- BIANCHI, C. A. M.; BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A. Ajuste osmótico em milho cultivado em diferentes sistemas de manejo de solo e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 7, p. 645-651, 2005.
- BILIBIO C.; CARVALHO, J. A.; HENSEL, O.; RICHTER, U. Effect of different levels of water deficit on rapessed (*Brassica napus* L.) crop. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 4, p. 672-684, 2011.
- BIRUNARA, A.; SHEKARI, F.; HASSANPOURAGHDAM, M. B.; KHORSHIDI, M. B.; ESFANDYARI, E. Effects of water deficit stress on yield, yield components and phenology of canola (*Brassica napus* L.) at different growth stages. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 9, n. 3-4, p. 506-509, 2011.
- BISWAS, D. K.; MA, B. L.; MORRISON, M. J. Changes in leaf nitrogen and phosphorus content, photosynthesis, respiration, growth, and resource use efficiency of a rapeseed cultivar as affected by drought and high temperatures. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 99, n. 4, p. 488-498, 2019.
- CONCEIÇÃO, C. G. da; SOARES, F. C.; PARIZI, A. R. C.; RODRIGUES, S. A.; PEITER, M. X.; ROBAINA, A. D.; GIRARDI, L. B.; BEN, L. H. Análise dos componentes do rendimento da canola irrigada na região Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 10, n. 1, p. 40-45, 2016.
- COSTA, J. R. da; PINHO, J. L. D. de; PARRY, M. M. Produção de matéria seca de cultivares de milho sob diferentes níveis de estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 5, p. 443-450, 2008.
- DAI, L.; LI, J.; HARMES, H.; ZHENG, X.; ZHANG, C. Melatonin enhances drought resistance by regulating leaf stomatal behaviour, root growth and catalase activity in two contrasting rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 149, p. 86-95, 2020.
- DALMAGO, G. A.; CUNHA, G. R. da; TOMM, G. O.; SANTI, A.; PIRES, J. L. F. Canola. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Org.) **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. p. 131-150.
- DALMAGO, G. A.; PINTO, D. G.; FONTANA, D. C.; GOUVÊA, J. A. de; BERGAMASCHI, H.; FOCESATTO, E.; SANTI, A. Use of solar radiation in the improvement of spring canola (*Brassica napus* L.; Brassicaceae) yield influenced by nitrogen topdressing fertilization. **Agrometeoros**, v. 26, n. 1, p. 223-237, 2018.
- DIEPENBROCK, W. Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. **Field Crops Research**, v. 67, n. 1, p. 35-49, 2000.
- ELFERJANI, R.; SOOLANAYAKANAHALLY, R. Canola responses to drought, heat, and combined stress: shared and specific effects on carbon assimilation, seed yield, and oil composition. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 1224, 2018.
- EL-SHAFFEY, A. L.; ABDELHALIM, A. K. Impact of potassium fertilization on growth, yield and water productivity of canola under water stress condition. **Plant Archives**, v. 20, n. 2, p. 8389-8402, 2020.
- ESLAM, B. P. Evaluation of physiological indices, yield and its components as screening techniques for water deficit tolerance in oilseed rape cultivars. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 11, n. 4, p. 413-422, 2009.
- FOCHESATTO, E.; NIED, A. H.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; PINTO, D. G.; KOVALESKI, S.; CUNHA, G. R. da; GOUVEA, J. A. Interception of solar radiation by the productive structures of spring canola hybrids. **Ciência Rural**, v. 46, n. 10, p. 1790-1796, 2016.

- GAN, Y.; AGANDI, S. V.; CUTFORTH, H.; POTTS, D.; ANGADI, V. V.; McDONALD, C. L. Canola and mustard response to short periods of temperature and water stress at different developmental stages. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 84, n. 3, p. 697-704, 2004.
- GAO, L.; CALDWELL, C. D.; JIANG, Y. Photosynthesis and growth of camelina (*Camelina sativa*) and canola (*Brassica napus*) in response to water deficit and applied nitrogen. **Crop Science**, v. 58, n. 1, p. 393-401, 2018.
- GHOBADI, M.; BAKHSHANDEH, M.; FATHI, G.; GHARINEH, M. H.; ALAMISAEED, K.; NADERI, A.; GHOBADI, V. Short and long periods of water stress during different growth stages of canola (*Brassica napus* L.). Effect on yield, yield components, seed oil and protein contents. **Journal of Agronomy**, v. 5, n. 2, p. 336-341, 2006.
- HAQ, T. U.; NADEEM, S.; MAQBOOL, M. M.; IBRAHIM, M. Performance of canola cultivars under drought stress induced by withholding irrigation at different growth stages. **Soil and Environment**, v. 33, n. 1, p. 43-50, 2014.
- HERGERT, G. W.; MARGHEIM, J. F.; PAVLISTA, A. D.; MARTIN, D. L.; SUPALLA, R. J.; ISBELL, T. A. Yield, irrigation response, and water productivity of deficit to fully irrigated spring canola. **Agricultural Water Management**, v. 168, p. 96-103, 2016.
- HOSSAIN, Z.; JOHNSON, E. N.; WANG, L.; BLACKSHAW, R. E.; GAN, Y. Comparative analysis of oil and protein content and seed yield of five Brassicaceae oilseeds on the Canadian Prairie. **Industrial Crops & Products**, v. 136, p. 77-86, 2019.
- HOSSEINI, S. M.; HASANLOO, T.; MOHAMMADI, S. Physiological characteristics, antioxidant enzyme activities, and gene expression in 2 spring canola (*Brassica napus* L.) cultivars under drought stress conditions. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 39, n. 3, p. 413-420, 2015.
- HOSSEINI, S. M.; HASSIBI, P. Effects of water deficit stress on several quantitative and qualitative characteristics of canola (*Brassica napus* L.) cultivars. **Notulae Scientia Biologicae**, v. 3, n. 3, p. 120-125, 2011.
- HUANG, Z.; LIU, Y.; TIAN, F. P.; WU, G. L. Soil water availability threshold indicator was determined by using plant physiological responses under drought conditions. **Ecological Indicators**, v. 118, 106740, 2020.
- IBARRA, M. A. I.; CATALÁN-VALENCIA, E. A.; VILLA-CASTORENA, M. M.; SÁNCHEZ-COHEN, I. SIFUENTES-IBARRA, E.; ROMÁN-LÓPEZ, A. Modelos de predicción de rendimiento de canola en función del contenido de humedad disponible en el suelo. **Revista Fitotecnica Mexicana**, v. 37, n. 1, p. 49-58, 2014.
- IRIARTE, L. B.; VALETTI, O. E. **Cultivo de Colza**. 1ed. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuária – INTA, Buenos Aires, Argentina, 2008. 156 p.
- KAEFER, J. E., GUIMARÃES, V. F.; RICHART, A.; TOMM, G. O.; MÜLLER, A. L. Produtividade de grãos e componentes de produção da canola de acordo com fontes e doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 4, p. 273-280, 2014.
- KAUSER, R.; ATHAR, H. U. R.; ASHRAF, M. Chlorophyll fluorescence: A Potential indicator for rapid assessment of water stress tolerance in canola (*Brassica napus*, L.). **Pakistan Journal of Botany**, v. 38, n. 5, p. 1501-1509, 2006.
- KHAN, M. N.; ZHANG, J.; LUO, T.; LIU, J.; NI, F.; RIZWAN, M.; FAHAD, S.; HU, L. Morpho-physiological and biochemical responses of tolerant and sensitive rapessed cultivars to drought stress during early seedling growth stage. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, n. 25, 2019.

KHODABIN, G.; TAHMASEBI-SARVESTANI, Z.; RAD, A. H. S.; MODARRES-SANAVY, S. A. M. Effect of drought stress on certain morphological and physiological characteristics of a resistant and a sensitive canola cultivar. **Chemistry & Biodiversity**, v.17, n. 2, e1900399, 2020.

KORTE, L. L.; SPECHT J. E.; WILLIAMS, J. H.; SORENSON, R. C. Irrigation of soybean genotypes during reproductive ontogeny: II. Yield component responses. **Crop Science**, v. 23, n. 3, p. 528–533, 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.

KUMAR, A.; ELSTON, J. Genotypic differences in leaf water relations between *Brassica juncea* and *B. napus*. **Annals of Botany**, v. 70, n. 1, p. 3-9, 1992.

LIU, Y.; SUBHASH, C.; YAN, J.; SONG, C.; ZHAO, J.; LI, J. Maize leaf temperature responses to drought: thermal imaging and quantitative trait loci (QTL) mapping. **Environmental and Experimental Botany**, v. 71, n. 2, p. 158-165, 2011.

MISCHAN, M. M.; PINHO, S. Z. de. **Modelos não lineares [recurso eletrônico]: funções assintóticas de crescimento**. 1.ed. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2014. 187 p.

MISCHAN, M. M.; PINHO, S. Z. de; CARVALHO, L. R. de. Determination of a point sufficiently close to the asymptote in nonlinear growth functions. **Scientia Agricola**, v.68, n. 1, p.109-14, 2011.

MOGHADAM, H. R. T.; GHOOSHCHI, F.; ZAHEDI, H. Effect of UV radiation and evaluated CO₂ on morphological traits, yield and yield components of canola (*Brassica napus* L.) grown under water deficit stress. **Notulae Scientia Biologicae**, v. 39, n. 1, p. 213-219, 2011.

MOHTASHAMI, R.; DEHNAVI, M. M.; BALOUCHI, H.; FARAJI, H. Improving yield, oil content and water productivity of dryland canola by supplementary irrigation and selenium spraying. **Agricultural Water Management**, v. 232, 106046, 2020.

MORRISON, M. J.; STEWART, D. W. Heat stress during flowering in summer *Brassica*. **Crop Science**, v. 42, n. 3, p. 797-803, 2002.

NANDA, R.; BHARGAVA, S. C.; TOMAR, D. P. S.; RAWSON, H. M. Phenological development of *Brassica campestris*, *B. juncea*, *B. napus* and *B. carinata* grown in controlled environments and from 14 sowing dates in the field. **Field Crops Research**, v. 46, n. 1-3, p. 93-103, 1996.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 2 – Fome zero e agricultura sustentável**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/2>. Acesso em: 15 dez. 2021.

PASSOS, J. R. S.; PINHO, S. Z. de; CARVALHO, L. R. de; MISCHAN, M. M. Critical points in logistic growth curves and treatment comparisons. **Scientia Agricola**, v. 69, n. 5, p. 308-312, 2012.

PEREIRA, A. C.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; LOREGIAN, V.; KIRCHNER, J. H.; MEZZOMO, W.; BEN, L. H. B.; PIMENTA, B. D.; TORRES, R. R. Aspectos produtivos e eficiência no uso da água em cultivares de canola irrigada. **Cultura Agrônômica**, v. 28, n. 2, p. 166-178, 2019.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

- RAD, A. H. S.; ZANDI, P. The effect of drought stress on qualitative and quantitative traits of spring rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars. **Žemdirbystė=Agriculture**, v. 99, n. 1, p. 47-54, 2012.
- RAHIMI-MOGHADDAM, S.; EYNI-NARGESEH, H.; AHMADI, S. A. K.; AZIZI, K. Towards withholding irrigation regimes and drought-resistant genotypes as strategies to increase canola production in drought-prone environments: A modeling approach. **Agricultural Water Management**, v. 243, n. 1, 106487, 2021.
- RAMAN, H.; RAMAN, R.; McVITTIE, B.; BORG, L.; DIFFEY, S.; YADAV, A. S.; BALASUBRAMANIAN, S.; FARQUHAR, G. Genetic and physiological bases for variation in water use efficiency in canola. **Food and Energy Security**, v. 9, n. 4, e237, 2020. DOI: 10.1002/fes3.237
- RAO, M. S. S.; MENDHAM, N. J. Comparison of chinoli (*B. campestris* subsp. *oleifera* × subsp. *Chinensis*) and *B. napus* oilseed rape using different growth regulators, plant population densities and irrigation treatments. *Journal of Agricultural Science*, v. 177, n. 2, p. 177-187, 1991.
- RATHKE, G. W.; BEHRENS, T.; DIEPENBROCK, W. Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 117, n. 2-3, p. 80-108, 2006.
- RIGHI, E. Z.; VAZATA, S.; DALMAGO, G. A.; MULLER, A. L.; CARVALHO, L. Z. G. de; DAGA, J. Sowing times influence canola grain yield and oil quality. **Agrometeoros**, v. 25, n. 2, p. 415-425, 2017.
- RITZ, C.; STREIBIG, J. C. **Nonlinear Regression with R**. 1. ed. Springer, 2008. 150 p.
- SABAGH, A. E.; HOSSAIN, A.; BARUTÇULAR, C.; ISLAM, M. S.; RATNASEKERA, D.; KUMAR, N.; MEENA, R. S.; GHARIB, H. S.; SANEOKA, H.; SILVA, J. A. T. da. Drought and salinity stress management for higher and sustainable canola (*Brassica napus* L.) production: a critical review. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 1, p. 88-97, 2019.
- 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.
- SHAHZAD, A.; QIAN, M.; SUN, B.; MAHMOOD, U.; LI, S.; FAN, Y.; CHANG, W.; DAI, H.; LI, J.; QU, C.; LU, K. Genome-wide association study identifies novel loci and candidate genes for drought stress tolerance in rapeseed. **Oil Crop science**, v. 6, n. 1, p. 12-22, 2021.
- SILVA, E. M. da; FRUHAUF, A. C.; SILVA, E. M.; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J.; SILVA, V. F. da. Evaluation of the critical points of the most adequate nonlinear model in adjusting growth data of 'green dwarf' coconut fruits. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 43, n. 1, e-726, 2021.
- SINAKI, J. M.; HERAVAN, E. M.; RAD, A. H. S.; NOURMOHAMMAD, G.; ZAREI, G. The effects of water deficit during growth stages of canola (*Brassica napus* L.). **American Eurasian Journal of Agricultural and Environment Science**, v. 2, n. 4, p. 417- 422, 2007.
- STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S.; FLORES, A. F.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. 3. ed. Rev e Ampl. Porto Alegre: Emater/RS, 2018. 251 p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

- TAN, X.; LI, S.; HU, L.; ZHANG, C. Genome-wide analysis of long non-coding RNAs (lncRNAs) in two contrasting rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes subjected to drought stress and re-watering. **BMC Plant Biology**, v. 20, n. 81, 2020.
- TESFAMARIAM, E. H.; ANNANDALE, J. G.; STEYN, J. M. Water stress effects on winter canola growth and yield. **Agronomy Journal**, v. 102, n. 2, p. 658-666, 2010.
- TOMM, G. O.; WIETHOLTER, S.; DALMAGO, G. A.; SANTOS, H. P. dos. **Tecnologia para produção de canola no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. 41 p. html. (Embrapa Trigo. Documentos Online, 113). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPT-2010/40772/1/p-do113.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2022
- ULLAH, F.; BANO, A.; NOSHEEN, A. Effectes of plant growth regulators on growth and oil quality of canola (*Brassica napus* L.) under drought stress. **Pakistan Journal of Botany**, v. 44, n. 6, p. 1873-1880, 2012.
- ULLAH, I.; KHAN, B.; DIN, M.; SIDDIQ, M.; KHAN, A. A.; MUNIR, A.; AZEEM, K.; HAQ, G. U. Effect of various seed rates and nitrogen levels on the productivity of late sown brassica. **Sarhad Journal of Agriculture**, v. 29, n. 4, p. 503-509, 2013.
- URREA, R. L.; SÁNCHEZ, J. M.; CRUZ, F. de la; GONZÁLEZ-PIQUERAS, CHÁVEZ, J. L. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements for sprinkler-irrigated canola. **Agricultural Water Management**, v. 239, 106260, 2020.
- WASZCZAK, C.; CARMODY, M.; KANGASJÄRVI, J. Reactive oxygen species in plant signaling. **Annual Review of Plant Biology**, v. 69, p. 209–236, 2018.
- WITTKOP, B.; SNOWDON, R. J.; FRIEDT, W. Status and perspectives of breeding for enhanced yield and quality of oilseed crops for Europe. **Euphytica**, v. 170, n. 1-2, p. 131-140, 2009.
- WRIGHT, P. R.; MORGAN, J. M.; JESSOP, R. S.; CASS, A. Comparative adaptation of canola (*Brassica napus*) and Indian mustard (*B. Juncea*) to soil water deficits: yield and yield components. **Field Crops Research**, v. 42, n. 1, p. 1-13, 1995.
- WU, W.; DUNCAN, R. W.; MA, B. L. The stage sensitivity of short-term heat stress to lodging-resistant traits and yield determination in canola (*Brassica napus*, L.). **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n. 1, p. 74-87, 2021.
- ZEVIANI, W. M.; SILVA, C. A.; CARNEIRO, W. J. O. de; MUNIZ, J. A. Modelos não lineares para a liberação de potássio de esterco animal em latossolos. **Ciência Rural**, v. 42, n. 10, p. 1789-1796, 2012.
- ZHANG, Y.; YU, Z.; SHI, Y.; GU, S.; ZHANG, Y. Effects of supplemental irrigation based on soil water content on water consumption, dry matter and yield of wheat. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 79, n. 2, p. 190-201, 2019.
- ZHU, J.; CAI, D.; WANG, J.; CAO, J.; WEN, Y.; HE, J.; ZHAO, L.; WANG, D.; ZHANG, S. Physiological and anatomical changes in two rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes under drought stress conditions. **Oil Crop Science**, v. 6, n. 2, p. 97-104, 2021.
- ZIRGOLI, M. H.; KAHRIZI, D. Effects of end-season drought stress on yield and yield components of rapeseed (*Brassica napus* L.) in warm regions of Kermanshah Province. **Biharean Biologist**, v. 9, n. 2, p. 133-140, 2015..

ANEXO I – Ilustração dos principais aspectos de condução experimental dos ensaios com déficit hídrico em canola em 2017 e 2019, em casa de vegetação.



Fotos: Aldemir Pasinato

ANEXO II – Relação de variáveis, com respectivas abreviações e/ou unidades de medida, utilizadas no texto.

Sigla	Nome da variável	Unidade de medida
CRAS	Conteúdo relativo de água no solo	% em relação à CC
ALT	Altura de plantas	cm
AF	Área foliar	cm ² planta ⁻¹
MST	Massa da matéria seca total	g planta ⁻¹
MSF	Massa da matéria seca de folhas	g planta ⁻¹
MSG	Massa da matéria seca de grãos	g planta ⁻¹
NS	Número de síliques por planta	n° síliques planta ⁻¹
NG	Número de grãos por síliqua	n° grãos síliqua ⁻¹
MMG	Massa da matéria seca de mil grãos	g
TO	Teor de óleo nos grãos	%
Rg	Radiação solar global incidente	MJ m ⁻² dia ⁻¹
Rn	Saldo de radiação	MJ m ⁻² dia ⁻¹
V	Velocidade do vento	m s ⁻¹
Tm	Temperatura média do ar	°C
UR	Umidade relativa do ar	%
DS	Déficit de saturação do ar	kPa
Tmax	Temperatura máxima do ar	°C
Tmin	Temperatura mínima do ar	°C
ETo	Evapotranspiração de referência	s/u
ETc	Evapotranspiração da cultura em casa de vegetação	g de água por planta ⁻¹
TF	Temperatura da folha	°C
EM	Emergência das plantas	dias
IF	Início do florescimento	dias
FF	Final do florescimento	dias
MF	Maturação fisiológica	dias
DAS	Dias após a sementeira	dias
CC	Capacidade de campo	cm ³ de água cm ⁻³ de solo
Exp. 1	Experimento realizado em 2017	s/u
Exp. 2	Experimento realizado em 2019	s/u
a, k, b	Coefficientes da função logística	conforme variável

Sigla	Nome da variável	Unidade de medida
IC	Intervalo de confiança	conforme variável
<i>p1</i>	Ponto crítico de estabilidade	%
<i>Pam</i>	Ponto crítico de aceleração da queda	%
<i>Pi</i>	Ponto de inflexão da curva	%
<i>Pdm</i>	Ponto de desaceleração da queda	%

s/u = sem unidade definida no contexto deste estudo.

Embrapa

Trigo

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL