

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

Samuel Kovaleski

**CARACTERIZAÇÃO, QUANTIFICAÇÃO E MODELAGEM DE
DANOS PROVOCADOS PELA GEADA NO PERÍODO
REPRODUTIVO DA CANOLA**

Santa Maria, RS
2019

Samuel Kovaleski

**CARACTERIZAÇÃO, QUANTIFICAÇÃO E MODELAGEM DE DANOS
PROVOCADOS PELA GEADA NO PERÍODO REPRODUTIVO DA CANOLA**

Tese, apresentada ao curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Produção vegetal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Agronomia**

Orientador: Prof. Dr. Arno Bernardo Heldwein

Santa Maria, RS
2019

Kovaleski, Samuel

CARACTERIZAÇÃO, QUANTIFICAÇÃO E MODELAGEM DE DANOS
PROVOCADOS PELA GEADA NO PERÍODO REPRODUTIVO DA CANOLA /
Samuel Kovaleski.- 2019.

208 p.; 30 cm

Orientador: Arno Bernardo Heldwein

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Agronomia, RS, 2019

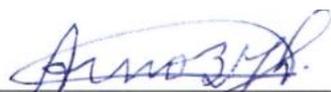
1. Temperatura do ar 2. Congelamento 3. Estruturas
reprodutivas 4. Microclima no dossel I. Heldwein, Arno
Bernardo II. Título.

Samuel Kovaleski

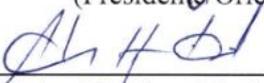
**CARACTERIZAÇÃO, QUANTIFICAÇÃO E MODELAGEM DE DANOS
PROVOCADOS PELA GEADA NO PERÍODO REPRODUTIVO DA CANOLA**

Tese, apresentada ao curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Produção vegetal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Agronomia**

Aprovado em 22 de fevereiro de 2019



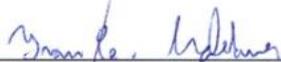
Arno Bernardo Heldwein, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



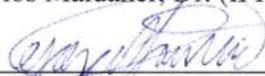
Astor Henrique Nied, Dr. (UFSM)



Genei Antonio Dalmago, Dr. (Embrapa Trigo)



Ivan Carlos Maldaner, Dr. (IFFar – Campus SVS)



Jorge Alberto de Gouvêa, Dr. (Embrapa Trigo)

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho para a minha mãe Maristela Kovalski, meu pai Roque Kovalski, e irmãos Paulo, Marcos, Lucas, Ana Paula e André.

AGRADECIMENTOS

À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA e ao PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA pela oportunidade de cursar o doutorado.

À COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

Ao professor ARNO BERNARDO HELDWEIN e GENEI ANTONIO DALMAGO, pela oportunidade de cursar o mestrado e doutorado junto ao seu grupo de pesquisa, pela dedicação, pelos ensinamentos e pela amizade. Obrigado por oportunizar o meu crescimento pessoal e profissional.

À toda a minha FAMÍLIA, especialmente minha mãe Maristela Kovaleski, meu pai Roque Kovaleski, e irmãos Paulo, Marcos, Lucas, Ana Paula e André.

Aos colegas, amigos e FUNCIONÁRIOS DO DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA e EMBRAPA TRIGO pelo apoio na condução dos experimentos e pelos anos de convivência e amizade. Em especial ao professor Evandro Zanini Righi (*in memorian*), cujo pouco tempo de convivência mostrou um ser humano inigualável.

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO, QUANTIFICAÇÃO E MODELAGEM DE DANOS PROVOCADOS PELA GEADA NO PERÍODO REPRODUTIVO DA CANOLA

AUTOR: Samuel Kovaleski

ORIENTADOR: Arno Bernardo Heldwein

O objetivo deste trabalho foi quantificar os danos provocados por geadas no período reprodutivo da canola e desenvolver modelos para estima-los. Em 2016 e 2017 foram realizados dois experimentos em condições controladas e dois experimentos a campo. Os experimentos em ambiente controlado foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado e arranjo fatorial. As plantas com e sem aclimação ao frio foram expostas à temperatura do ar de -6°C . Em ambiente externo, os experimentos foram conduzidos em delineamento experimental em blocos ao acaso, com parcela subdividida e arranjo fatorial. As avaliações e análises foram realizadas considerando delineamento amostral fatorial dentro dos blocos do experimento original. Foram realizadas avaliações biométricas antes e após as geadas em ambiente controlado e natural. Em ambiente natural avaliou-se a temperatura do ar (Tar) no dossel a 5, 40, 100 e 150 cm do solo e a temperatura de estruturas reprodutivas (Ter). Desenvolveram-se modelos para estimativa da temperatura mínima do ar próximo às estruturas reprodutivas (TnE), da temperatura mínima das estruturas reprodutivas (Tner) e da mortalidade de óvulos em estruturas reprodutivas, por regressão linear simples. A geada provocou a morte de 79% das plantas não aclimatadas e aumentou o abortamento de estruturas reprodutivas de 43 a 120%. A morte de óvulos em Flores (F) e Botões florais (B) iniciou com Tar de 2,4 e $1,9^{\circ}\text{C}$, respectivamente. A morte de todos óvulos ocorreria com Tar de $-6,7$ e $-10,2^{\circ}\text{C}$ em F e B, respectivamente. A Tar de $-4,80^{\circ}\text{C}$ provocou a morte de 70 a 90% dos óvulos em F e em síliquas com menos de 2 cm de comprimento ($S < 2$). A equação que descreve a evolução da mortalidade de óvulos, em noite com geada, indicou que a morte de óvulos inicia com Tar de $0,81^{\circ}\text{C}$ e a morte total ocorreria com Tar de $-6,52^{\circ}\text{C}$. B, F e $S < 2$ apresentaram abortamento 27% maior do que síliquas com mais de 2 cm de comprimento, porém, quando B, F e $S < 2$ não abortaram apresentaram número de grãos 79% maior do que $S > 2$. A menor Tn ocorreu no topo do dossel. O gradiente entre a menor e maior Tn no dossel foi de 1,64, 0,91, 1,22 e $0,75^{\circ}\text{C}$ em geadas fortes, moderadas, fracas e dias frios, respectivamente. É possível estimar a Tner durante o ciclo da canola, em função de dados de estação meteorológica, com o modelo $Tner = 1,21(Tn \text{ Aut}) - 2,77$ e em dias com Tn menor do que 5°C com o modelo $Tner = 1,09(Tn \text{ Aut}) - 3,06$. Danos causados por geadas no período reprodutivo da canola podem ser quantificados a partir de Tn medida em estação meteorológica automática e/ou Tn medida em posição de referência dentro da lavoura.

Palavras-chave: temperatura do ar, congelamento, estruturas reprodutivas, microclima no dossel.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION, QUANTIFICATION AND MODELING OF DAMAGES CAUSED BY THE FROST IN THE REPRODUCTIVE PERIOD OF CANOLA

AUTHOR: Samuel Kovaleski
ADVISOR: Arno Bernardo Heldwein

The objective of this work was to quantify the damage caused by frosts in the reproductive period of canola and to develop models for their estimation. In 2016 and 2017 two experiments were carried out under controlled conditions and two field experiments. The experiments in a controlled environment were conducted in a completely randomized design and factorial arrangement. Plants with and without cold acclimatization were exposed to the air temperature of -6°C . In the field, the experiments were conducted in randomized complete block design, with subdivided plot and factorial arrangement. The analyzes were performed considering a factorial sample design within the blocks of the original experiment. Biometric evaluations were performed before and after frosts in controlled and field environment. In the field environment it was evaluated the air temperature (T_{ar}) in the canopy at 5, 40, 100 and 150 cm of the soil and the temperature of reproductive structures (T_{er}). Models were developed to estimate the minimum air temperature close to the reproductive structures (T_{nE}), minimum temperature of the reproductive structures (T_{ner}) and the ovules mortality in reproductive structures, by linear regression. Ovules death in Flowers (F) and Flower buds (B) begins with T_{ar} of 2.4 and 1.9°C , respectively. Death of all ovules would occur with T_{ar} of -6.7 and -10.2°C in F and B, respectively. T_{ar} of -4.80°C caused the death of 70 to 90% of the ovules in F and siliques with less than 2 cm length ($S < 2$). The equation describing the evolution of ovules numbers in frosty night indicates that ovules death begins with T_{ar} of 0.81°C and total death occurs with T_{ar} of -6.52°C . B, F and $S < 2$ present abortion 27% higher than siliques with more than 2 cm length ($S > 2$). If B, F and $S < 2$ do not abort they present a 79% larger number of grains than $S > 2$. The lowest T_n occurred at the top of the canopy. The mean gradient between the lowest and highest T_n in the canopy is 1.64, 0.91, 1.22 and 0.75°C in severe frosts, moderate frosts, light frosts and cold days, respectively. . It is possible to estimate the T_{ner} during the canola cycle, according to data obtained from the meteorological station, with the model $T_{ner} = 1.21 (T_n \text{ Aut1}) - 2.77$ When T_n less than 5°C it is possible to estimate T_{ner} with the model $T_{ner} = 1.09 (T_n \text{ Aut}) - 3.06$. Damage caused by frost in the reproductive period of canola can be quantified from T_n measured in automatic weather station and/or T_n measured at reference position within the crop.

Keywords: air temperature, freezing, reproductive structures, microclimate in the canopy

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a	Coefficiente linear
Aut	Estação meteorológica automática
Aut1	Estação meteorológica automática em Passo Fundo
B	Botões florais
b	Coefficiente angular
BF	Beginning of flowering
BIAS	Índice BIAS
Cfa	Clima subtropical úmido
cm	Centímetros
cm ²	Centímetros quadrados
d	Índice de concordância
DAE	Dias após a emergência
DF	Dia frio
DN	Dia normal
E	Leste
EAM	Erro absoluto médio
EG	Enchimento dos grãos
F	Flores abertas
FF	Full flowering
FP	Florescimento pleno
G	Fluxo de calor no solo
g	Gramas
GF	Geadas fracas
GM	Geadas moderadas
GT	Geadas fortes
IAF	Índice de área foliar
IF	Início do florescimento
kg	Quilograma
kg ha ⁻¹	Quilograma por hectare
m	Metros
MJ m ⁻² dia ⁻¹	Mega-joule por metro quadrado por dia
mm	Milímetros
m s ⁻¹	Metros por segundo
MSE _a	Erro médio aleatório
MSE _s	Erro quadrático médio sistemático
N	Norte
NPK	Nitrogênio-Fósforo-Potássio
PAR	Photosynthetically active radiation
r	Coefficiente de correlação de Pearson
R ²	Coefficiente de determinação
RS	Rio Grande do Sul
Rn	Saldo de radiação
RQME	Raiz quadrada média do erro
S	Sul
S<2	Síliquas com menos de 2 cm de comprimento
S>4	Síliquas com mais de 4 cm de comprimento
Tar	Temperatura do ar

TarE	Temperatura do ar próximo as estruturas reprodutivas
Ter	Temperatura das estruturas reprodutivas
Tn	Temperatura mínima do ar
TnE	Temperatura mínima do ar próximo as estruturas reprodutivas
Tner	Temperatura mínima das estruturas reprodutivas
W	Oeste
W m ⁻²	Watts por metro quadrado
°C	Graus celsius
2<S<4	Síliquas com 2 a 4 cm de comprimento

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO	19
1.1 INTRODUÇÃO	19
1.2 OBJETIVOS	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 ASPECTOS GERAIS DA CULTURA	22
2.2 DESENVOLVIMENTO E FENOLOGIA DA CANOLA	24
2.3 TEMPERATURA DO AR E CANOLA.....	27
2.4 GEADA.....	31
2.5 ACLIMATAÇÃO AO FRIO	37
2.6 MICROCLIMA EM DOSSEL DE PLANTAS	41
2.7 ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DO AR E ESTIMATIVA DE DANOS POR GEADA EM PLANTAS.....	44
3 ARTIGO 1 - FROST DAMAGE IN THE REPRODUCTIVE PHASE OF CANOLA (BRASSICA NAPUS L.) IN CONTROLLED ENVIRONMENT (*)	45
3.1 ABSTRACT.....	46
3.2 INTRODUCTION	47
3.3 MATERIAL AND METHODS	48
3.3.1 Experimental design.....	48
3.3.2 Plant genotypes and developmental cycles.....	49
3.3.3 Experimental conditions, cold acclimation, and frost simulation.....	50
3.3.4 Data analysis	52
3.4 RESULTS AND DISCUSSION	53
3.4.1 Effects of cold acclimation on plant physiology.....	53
3.4.2 Plant mortality responses in different experimental conditions.....	54
3.4.3 Response of dry matter content to experimental conditions.....	56
3.4.4 Effect of experimental conditions on reproductive structures	57
3.5 CONCLUSIONS.....	59
3.6 ACKNOWLEDGEMENTS	60
3.7 CONTRIBUTIONS OF AUTHORS	60
3.8 REFERENCES	60

4 ARTIGO 2 - VARIAÇÃO E ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DO AR E DAS ESTRUTURAS REPRODUTIVAS DURANTE O PERÍODO REPRODUTIVO DA CANOLA EM NOITES COM GEADA 73

4.1 RESUMO.....	73
4.2 ABSTRACT.....	73
4.3 INTRODUÇÃO.....	74
4.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	77
4.4.1 Caracterização geral.....	77
4.4.2 Implantação do experimento e tratos culturais.....	78
4.4.3 Avaliações biométricas.....	79
4.4.4 Temperatura do ar de referência e estações meteorológicas.....	80
4.4.5 Temperatura do ar no dossel da canola.....	81
4.4.6 Perfil de temperatura mínima do ar no dossel.....	81
4.4.7 Temperatura das estruturas reprodutivas.....	82
4.4.8 Variação vertical da temperatura do ar no dossel.....	83
4.4.9 Variáveis micrometeorológicas.....	84
4.4.10 Geração de modelos para estimativa da temperatura mínima do ar e das estruturas reprodutivas.....	85
4.4.11 Validação dos modelos para estimativa da temperatura mínima do ar, das estruturas reprodutivas e da aclimatação da canola.....	86
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	88
4.5.1 Caracterização ambiental de dias com geada.....	88
4.5.2 Evolução da temperatura do ar no dossel de canola previamente ocorrência de geadas e dias frios.....	93
4.5.3 Perfil de temperatura mínima do ar no período reprodutivo da canola em diferentes intensidades de frio.....	96
4.5.4 Temperatura das estruturas reprodutivas.....	101
4.5.5 Estimativa de temperatura mínima do ar e das estruturas reprodutivas.....	105
4.5.6 Validação dos modelos de estimativa da temperatura mínima do ar e das estruturas reprodutivas.....	110
4.6 CONCLUSÕES.....	121
4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122

5 ARTIGO 3 – QUANTIFICAÇÃO E MODELAGEM DE DANOS CAUSADOS POR GEADA EM ÓRGÃOS REPRODUTIVOS DA CANOLA.....	129
5.1 RESUMO.....	129
5.2 ABSTRACT.....	129
5.3 INTRODUÇÃO.....	130
5.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	132
5.4.1 Caracterização geral.....	132
5.4.2 Implantação do experimento e tratos culturais.....	133
5.4.3 Avaliações fenológicas.....	134
5.4.4 Dados meteorológicos.....	134
5.4.5 Definição das datas com avaliações.....	135
5.4.6 Morte de óvulos provocada pelo frio.....	136
5.4.7 Danos de geada em estruturas reprodutivas após ocorrência de geada.....	139
5.4.8 Temperatura do ar e das estruturas reprodutivas.....	141
5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	141
5.5.1 Caracterização da ocorrência de geadas.....	141
5.5.2 Morte de óvulos após ocorrência de geadas.....	143
5.5.3 Evolução do número de óvulos em estruturas reprodutivas em função da redução da temperatura do ar em noite com geada.....	149
5.5.4 Evolução de estruturas reprodutivas marcadas após ocorrência de geadas....	153
5.6 CONCLUSÕES.....	158
5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	160
6 DISCUSSÃO GERAL.....	165
7 CONCLUSÕES.....	169
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	171
APÊNDICES A – FREQUÊNCIA DECÊNIAL DE OCORRÊNCIA DE GEADAS EM PASSO FUNDO, RS.....	185
APÊNDICE B – ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DA CANOLA.....	186
APÊNDICE E – ALTURA DE PLANTAS DA CANOLA.....	188
APÊNDICE F – ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF) DE CANOLA.....	189
APÊNDICE G - BOX – PLOT ENTRE A DIFERENÇA DA TEMPERATURA DO AR E ESTRUTURAS REPRODUTIVAS.....	190

APÊNDICE H – PERFIL DE TEMPERATURA MÍNIMA DO AR NO DOSSEL DE DIFERNTES GENÓTIPOS DA CANOLA EM DIFERENTES INTENSIDADE DE GEADA	194
APÊNDICE I – MÉDIA, DESVIO PADRÃO, VARIÂNCIA, TEMPERATURA MÍNIMA DO AR MAIS ALTA E BAIXA, ASSIMETRIA E CURTOSE DOS MODELOS 1 A 6	195
APÊNDICE J – MÉDIA, DESVIO PADRÃO, VARIÂNCIA, TEMPERATURA MÍNIMA DO AR MAIS ALTA E BAIXA, ASSIMETRIA E CURTOSE DOS MODELOS 7 A 12	196
APÊNDICE L – MÉDIA, DESVIO PADRÃO, VARIÂNCIA, TEMPERATURA MÍNIMA DO AR MAIS ALTA E BAIXA, ASSIMETRIA E CURTOSE DOS MODELOS 3 A 6 EM FUNÇÃO DE AUT1.....	197
APÊNDICE M – MÉDIA, DESVIO PADRÃO, VARIÂNCIA, TEMPERATURA MÍNIMA DO AR MAIS ALTA E BAIXA, ASSIMETRIA E CURTOSE DOS MODELOS 9 A 12 EM FUNÇÃO DE AUT1.....	198
APÊNDICE N – NÚMERO DE ESTRUTURAS REPRODUTIVAS MARCADAS APÓS AS GEADA3, GEADA5 E GEADA7.....	199
APÊNDICE O – TEMPERATURA MÍNIMA, MÉDIA E MÁXIMA DIÁRIA DO AR EM NOS EXPERIMENTOS DE 2016 E 2017	201
APÊNDICE P – NÚMERO DE DATAS E INTENSIDADE DE GEADAS NOS EXPERIMENTOS DE 2016 E 2017	202
APÊNDICE Q – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE A TEMPERATURA MÍNIMA DO AR NO EXPERIMENTO VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E MICRMETEOROLÓGICAS	203
APÊNDICE R – TEMPERATURA DIÁRIA MÉDIA, MÁXIMA E MÍNIMA DO AR E NÚMERO DE HORAS COM POTENCIAL DE ACLIMATAÇÃO PARA A CANOLA	204
APÊNDICE S – PISTILO DE FLOR DE CANOLA ABERTO APÓS GEADA.....	206
APÊNDICE T - DANO PROVOCADOS POR GEADA.....	207
APÊNDICE U – CHUVA, VELOCIDADE E DIREÇÃO VENTO ANTES DE OCORRÊNCIA DE GEADAS.....	208

1 APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A temperatura do ar e o regime pluviométrico são as principais variáveis climatológicas a influenciar a distribuição geográfica das plantas, por influenciar diversos processos internos de crescimento e desenvolvimento. A canola (*Brassica napus* L.) tem boa adaptabilidade ao frio e por isso apresenta potencial de cultivo em grande parte da América do Sul, que, naturalmente, apresentam períodos com temperatura do ar baixas durante o outono/inverno e início da primavera. A região também apresenta alta probabilidade de ocorrência de geadas em todo o ciclo de desenvolvimento da canola, podendo provocar danos severos no início do ciclo do crescimento, na antese e no enchimento de grãos (McCLINCHEY; KOTT, 2008; DALMAGO et al., 2010; TAKASHIMA et al., 2013; THOMAS, 2014; KOVALESKI, 2015). Entre os principais danos está o abortamento de estruturas reprodutivas (WILEN et al., 1994; McCLINCHEY; KOTT, 2008; THOMAS, 2014), o que pode reduzir significativamente o rendimento de grãos, especialmente se as plantas não passaram por período de aclimação previamente à geada (RAPACZ, 1999; RAPACZ, 2002; HAWKINS et al., 2002; GUSTA et al., 2004; DALMAGO et al., 2010; KOVALESKI, 2015).

Em culturas agrícolas de pequeno porte, em noites com ocorrência de geada, geralmente, o maior resfriamento do ar ocorre no topo do dossel, uma vez que este nível é mais exposto à perda energética (ROSENBERG, 1983). Essa resposta foi verificada para diversas culturas, entre elas, a soja (BALDOCCHI et al., 1983), o milho (JACOBS et al., 1995), a batata (TAZZO et al., 2008), a quinoa (WINKEL et al., 2009) e o girassol (LOOSE et al., 2011), razão pela qual se pode assumir que, em noites com ocorrência de geadas, o topo do dossel das culturas agrícolas é o nível em que ocorrem os menores valores de temperatura do ar.

Para a canola, que é cultivada no período mais frio do ano na região sul do continente americano, essa resposta biofísica tem implicações importantes, pois suas estruturas reprodutivas (botões florais, flores e síliquas) são posicionadas predominantemente no topo do dossel. Consequentemente, em noites com ocorrência de geada, tais estruturas reprodutivas são expostas ao máximo resfriamento possível, com alta perda radiativa, potencializando os danos decorrentes da exposição ao frio. Além disso, distintamente das regiões tradicionais de cultivo da canola, tais como o Canadá e a União

Europeia, onde o inverno é mais rigoroso, mas apresenta menor variabilidade térmica do que na América do Sul. No sul do Brasil a ocorrência de geadas tem como características, elevada irregularidade temporal, grande variabilidade espacial e imprecisão na previsibilidade (SILVA et al., 2008). Assim, em função dessas diferenças, torna-se necessário e importante a caracterização e a quantificação do efeito de geadas em canola, para as regiões tradicionais de cultivo na região sul do Brasil e grande parte do sul da América do Sul (TAKASHIMA et al., 2013; SILVA; MINUZZI, 2016).

A quantificação direta do dano causado pela geada nas estruturas reprodutivas é a forma mais segura para determinar as perdas decorrentes de temperatura baixa do ar. No entanto, essa estratégia é trabalhosa e requer metodologias e, principalmente, limites muito bem estabelecidos para reduzir erros na avaliação. A alternativa, neste caso, é a estimativa do dano causado pela geada a partir da informação da temperatura mínima do ar que ocorre a nível do dossel e/ou das estruturas reprodutivas, a qual pode ser concomitantemente estimada com base em dados meteorológicos medidos em estações meteorológicas convencionais e/ou automáticas. Para isso, é fundamental a caracterização da temperatura do ar no dossel de canola, especialmente próximo às estruturas reprodutivas, em noites com ocorrência de geada, para a avaliação e/ou determinação de valores críticos de temperatura mínima do ar. Essa caracterização pode auxiliar a determinação da relação destes valores críticos com outras variáveis ambientais e micrometeorológicas, e também com variáveis biométricas relacionadas ao dossel. Estabelecidas essas relações, as mesmas podem respaldar o desenvolvimento de parâmetros numéricos para estimativa da temperatura do ar no dossel da canola, principalmente próximo as estruturas reprodutivas, com o objetivo de estimar danos causados pela temperatura baixa do ar em noites com geada.

Neste sentido, em ambiente controlado, Dalmago et al. (2010) observaram que a temperatura do ar de -4°C na antese foi prejudicial à canola, reduzindo o número de síliquas por planta e o número de grãos por síliqua. Os autores atribuíram esse resultado ao abortamento de estruturas reprodutivas e à morte de óvulos. Porém, os danos provocados pela geada em flores e síliquas, não foram detalhados. Na canola de inverno a morte de óvulos provoca redução do número de grãos por síliqua, e a morte de todos os óvulos de um pistilo provoca o abortamento do mesmo (LARDON; TRIBOI-BLONDEL, 1995), reduzindo o número de síliquas. Ainda em canola de inverno, Lardon e Triboi-Blondel (1994) observaram em condições controladas, que os gametas femininos são mais sensíveis ao frio do que os masculinos, e a sensibilidade aumenta desde a meiose até a antese, persistindo após a fertilização até início do desenvolvimento dos grãos, indicando

diversidade de resposta de acordo com estádios de desenvolvimento das estruturas reprodutivas. É provável que o padrão de resposta para a canola de primavera seja o mesmo, considerando que o período de desenvolvimento reprodutivo é o momento mais crítico na grande maioria das espécies vegetais. Faltam estudos, mesmo na literatura internacional, que avaliam o efeito da geada em experimentos conduzidos à campo, no período reprodutivo da canola e que conseguem estabelecer e/ou quantificar, claramente, a extensão dos danos provocados pela geada nas estruturas reprodutivas.

Valores de temperatura do ar de -3°C são comumente verificados no inverno e início da primavera em latitudes superiores 20°S na América do Sul (PEREIRA et al., 2007). No ano de 2017 o rendimento médio de grãos na região Sul do Brasil foi 40% menor do que no ano de 2018, devido a ocorrência de geadas (CONAB, 2018). Desta forma, sendo a geada um fenômeno natural que ocorre na região, de difícil previsibilidade espacial e temporal (SILVA et al., 2008), aliado à expectativa de aumento de danos causados por geadas devido às mudanças climáticas (GU et al., 2008), a caracterização e quantificação dos danos provocados por geadas, no período reprodutivo da canola são importantes para a cultura, que apresenta alto potencial de cultivo no sul do continente americano. Além disso, esses resultados podem auxiliar no refinamento do zoneamento agroclimático da cultura (DALMAGO et al., 2008), na modelagem do efeito do frio em plantas de canola no período reprodutivo e na composição de metodologias de avaliação de danos em sistemas de seguro agrícola.

1.2 OBJETIVOS

- 1) Determinar os danos provocados por geadas na canola em período reprodutivo em plantas com e sem aclimação em ambiente controlado;
- 2) Caracterizar a evolução do perfil vertical da temperatura mínima do ar e das estruturas reprodutivas, em diferentes condições de intensidade de frio em noite de geada, e desenvolver e testar modelos para a estimativa da temperatura mínima do ar para essas condições;
- 3) Quantificar e modelar danos causados por geadas de diferentes intensidades em órgãos reprodutivos da canola.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS GERAIS DA CULTURA

A canola (*Brassica napus* L. var. *oleifera*) é uma espécie anual, oleaginosa, pertencente à família Brassicaceae que é cultivada para a produção de grãos. A espécie *B. napus* L é originada do cruzamento entre as espécies *B. rapa* e a *B. oleraceae*. O centro de origem de *B. napus* L. é o sudeste da Europa (IRIARTE; VALETTI, 2008; THOMAS, 2014). O termo canola é um acrônimo para Canadian oil low acid (óleo canadense com baixo ácido), uma vez que a canola foi desenvolvida no Canadá a partir do melhoramento genético da colza, entre os anos de 1958 e 1974, com intuito de reduzir os teores de ácido erúico e glucosinolatos do óleo extraído dos grãos (TOMM et al., 2009). Portanto, o termo canola foi utilizado para caracterizar a qualidade superior do óleo e para desassociar os novos genótipos da antiga colza (IRIARTE; VALETTI, 2008; THOMAS, 2014).

A canola (*B. napus* L.) tem ciclo anual, com hábito de crescimento indeterminado e sistema radicular pivotante (THOMAS, 2014). As folhas apresentam coloração verde azulada escura, são lisas ou com pilosidades próximas as bordas (KRÜGER et al., 2009). As folhas inferiores são pecioladas e formam a roseta no período vegetativo, as folhas superiores (após a alongação do caule) são lanceoladas e amplexicaules (GULDEN et al., 2008). As ramificações laterais se originam das axilas das folhas e a emissão de ramos é dependente das condições ambientais e do genótipo (KRÜGER et al., 2009), além do nível de competição intraespecífica em função do arranjo de plantas. As flores agrupam-se em inflorescências, do tipo rácimo, localizando-se na extremidade superior dos ramos. As flores apresentaram coloração amarela, com quatro pétalas distribuídas diagonalmente em forma de cruz, com seis estames e um pistilo. Os frutos são siliquis, com forma cilíndrica, e quando completamente desenvolvidas apresentam comprimento médio de 6 cm e largura de 4 mm. O falso septo, originado das duas metades do ovário, divide a siliquis em dois compartimentos, onde são encontrados os grãos. Os grãos são esféricos, pequenos (massa de mil grãos varia de 2,5 a 6 gramas), com coloração marrom avermelhada a preto, quando a cultura atinge a maturação. A maturação das siliquis se inicia na base do rácimo e se desenvolve em direção ao ápice (maturação acropetal), uma vez que as flores da base do rácimo tem sua antese antes que as flores localizadas no ápice do mesmo (JOLY, 1993; IRIARTE; VALETTI, 2008).

A canola pode ser classificada em tipo de inverno e de primavera. Os genótipos de inverno são cultivados em regiões de clima temperado, com semeadura realizada no outono para que as plantas possam ser expostas de 4 a 6 semanas à temperatura média do ar menor que 7°C, no período vegetativo, para serem induzidas ao florescimento, pelo processo de vernalização (IRIARTE; VALETTI, 2008; FRIEDT; SNOWDON, 2009). Os genótipos de inverno são cultivados, predominantemente, na Europa e Ásia (FRIEDT; SNOWDON, 2009). Os genótipos de primavera se diferenciam dos tipos de inverno por não necessitarem de vernalização para que ocorra a indução floral e também apresentam menor sensibilidade ao fotoperíodo (WALTON et al., 1999; TOMM et al., 2009). No Brasil, devido à baixa latitude da região de cultivo (menor que 30 graus) e baixo número de horas de frio, são usados somente cultivares de primavera (DALMAGO et al., 2009; TOMM et al., 2009). Os genótipos de primavera também são utilizados na Austrália, e no Norte da Europa e Canadá em semeadura após o inverno (FRIEDT; SNOWDON, 2009). No sul do continente americano as condições climáticas permitem o uso tanto de cultivares de primavera como de inverno, embora os genótipos de inverno tenham sido implantados recentemente na Argentina (TAKASHIMA et al., 2013)

A canola é a terceira oleaginosa mais produzida no mundo, sendo superada somente pelas culturas de soja e palma. Os maiores produtores de canola são União Europeia, Canadá, China, Índia e Austrália (McCLINCHEY; KOTT, 2008). No Brasil, a área semeada com canola na safra de 2018 foi de 35,5 mil hectares, sendo que toda área de produção se concentrou na região sul do país, nos estados do Rio Grande do Sul e Paraná. O rendimento de grãos médio foi de 1350 kg ha⁻¹, o que corresponde a um acréscimo de 40% em relação à safra de 2017, quando a ocorrência de geadas no período reprodutivo provocou danos às estruturas reprodutivas da canola, o que resultou em redução do rendimento de grãos médio (CONAB, 2018).

O principal destino dos grãos da canola produzida no Brasil é a indústria de óleos vegetais, fabricação de biodiesel e produção de farelo, uma vez que os grãos possuem, em média, de 40 a 45% de óleo e de 24 a 27% de proteína. Para ser utilizado na alimentação humana o óleo proveniente dos grãos da canola deve possuir teor de ácido erúico menor que 2% e para a alimentação animal o farelo seco deve ter menos que 30 micromoles por grama de glucosinolatos. A baixa proporção de ácidos graxos saturados no óleo de canola (7%) em relação aos ácidos graxos insaturados (93%) favorece seu uso na alimentação humana (TOMM et al., 2009; SHARAFIZADEH et al., 2012).

O óleo de canola também pode ser usado como biocombustível, que é obtido após a transesterificação do óleo, sendo considerado uma fonte de energia renovável, pois seu uso em larga escala pode contribuir significativamente na diminuição da emissão de contaminantes na atmosfera. Quanto ao farelo, que é resíduo da extração do óleo dos grãos, pode ser empregado na formulação de ração para animais (IRIARTE; VALETTI, 2008; TOMM et al., 2009).

2.2 DESENVOLVIMENTO E FENOLOGIA DA CANOLA

As escalas fenológicas são usadas para caracterizar o desenvolvimento das plantas, padronizando a linguagem científica, sendo fundamentais para a definição do momento adequado para realização de práticas culturais (DALMAGO et al., 2009). O uso do termo desenvolvimento para as plantas está relacionado à diferenciação celular, iniciação e aparecimento de novos órgãos (STRECK et al., 2010).

Segundo Iriarte e Valetti (2008), a escala fenológica para canola mais utilizada é a desenvolvida pelo Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux et du Chanvre (CETIOM) na França. Também são utilizadas a escala de Harper e Berkenkamp HB (1975), SM de Sylvester – Bradley e Makepeace (1984) e BBCH apresentada por Meier et al. (2001). Embora existam diferenças, estas escalas fenológicas se baseiam na observação de mudanças visuais que ocorrem na haste principal das plantas, dividindo o ciclo da canola em período vegetativo e período reprodutivo. (IRIARTE; VALETTI, 2008; DALMAGO et al., 2009). O período vegetativo se inicia com a germinação da semente, seguido pela emergência das plantas, formação da roseta e se estende até o surgimento dos botões florais. Quando os botões florais são visíveis, no centro da roseta, se considera início do período reprodutivo, que é composto pelo período da alongação do ramo floral, floração, desenvolvimento das síliquas e maturação fisiológica.

Após a sementeira, o período de tempo entre a germinação e a emergência é dependente de fatores como qualidade e tamanho da semente, profundidade de sementeira, temperatura e umidade do solo (IRIARTE; VALETTI, 2008). Após a emergência, desde a exposição do ponto de crescimento e dos cotilédones até o fim do período da roseta, as plantas são suscetíveis a danos provocados por geadas (IRIARTE; VALETTI, 2008; DALMAGO et al. 2010; KOVALESKI, 2015). O período da roseta se estende desde a emissão da primeira folha verdadeira até quando as plantas apresentam 6 a 8 folhas e caule com 6 a 8 mm de diâmetro, sendo que neste período as folhas mais velhas ficam

posicionadas na base das plantas e as folhas mais jovens localizadas no centro (IRIARTE; VALETTI, 2008; EDWARDS; ERTEL, 2011; THOMAS, 2014). No início do ciclo de desenvolvimento da canola, o rápido desenvolvimento foliar permite melhor interceptação da radiação solar, menor perda de água do solo por evaporação e supressão das plantas daninhas (IRIARTE; VALETTI, 2008). A interceptação da radiação solar pelo dossel afeta diretamente a taxa de crescimento e o rendimento de grãos da canola, sendo que existe correlação positiva entre rendimento de grãos e máxima área foliar (NIED, 2013). Além disso, segundo Dalmago et al. (2018), a interceptação, absorção e uso eficiente da radiação fotossinteticamente ativa aumentam com a fertilização de nitrogênio, sendo os coeficientes de interceptação e uso associados com o aumento da matéria seca até o florescimento.

A canola não possui um número final de folhas definido, mas segundo Thomas (2014) as plantas podem apresentar de 9 a 30 folhas desenvolvidas na haste principal. Dalmago et al. (2013), para os genótipos cultivados no Brasil, verificaram que o número médio de folhas na haste principal variou de 12 a 16. O número de folhas por planta é dependente do genótipo, época de semeadura, nutrição e população de plantas (EDWARDS; HERTEL, 2011; DALMAGO et al., 2013). Apesar disso, a temperatura do ar é a principal variável ambiental a influenciar a emissão de folhas, sendo que para os genótipos cultivados no Brasil o filocrono varia de 21 a 53 graus dia (KOVALESKI et al., 2009; DALMAGO et al., 2013).

O índice de área foliar (IAF) máximo da canola ocorre no início do florescimento, variando de 2 a 5. A partir do máximo IAF, em função da senescência das folhas basais, inicia-se o decréscimo do mesmo (EDWARDS; HERTEL, 2011; NIED, 2013). As folhas de estratos superiores são menores que as inferiores (MORRISON et al., 1989; NANDA et al., 1995), de modo a permitir maior penetração de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) no dossel (EDWARDS; HERTEL, 2011; DALMAGO et al., 2018). Além disso, a máxima interceptação de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) pelo dossel ocorre a partir da metade do florescimento, quando hastes, flores e síliquas interceptaram de 70 a 80% da radiação da radiação PAR (NIED, 2013; FOCHESSATTO et al., 2016; DALMAGO et al., 2018).

Após a formação da roseta, quando os botões florais são visíveis no centro da roseta, inicia-se o alongamento da haste principal e a canola entra no período reprodutivo (IRIARTE; VALETTI, 2008). A partir desta fase se inicia também o desenvolvimento de hastes secundárias nas axilas das folhas (MORRISON et al., 1989; IRIARTE; VALETTI, 2008). Segundo Krüger et al. (2011) o número de ramos por planta é dependente da

densidade de plantas e espaçamento entrelinhas. Em lavouras, normalmente são emitidos quatro a seis ramos por planta, enquanto plantas isoladas podem apresentar dois a doze ramos primários (THOMAS, 2014).

A emissão de ramos primários, de flores e da antese nos ramos primários, ocorre no sentido descendente, sendo o ramo abaixo da haste principal o primeiro a ser emitido. Os demais ramos primários se desenvolvem abaixo deste (JULLIEN et al., 2011). A antese se inicia na base da haste principal e se estende até a parte superior. Nos ramos primários a antese se inicia dois a quatro dias após a haste principal. As flores abertas permanecem receptivas ao pólen por três dias, sendo que um dia após a polinização ocorre a fecundação dos óvulos. Após a fecundação, as pétalas das flores caem e a pequena siliqua se torna visível (IRIARTE; VALETTI, 2008; DALMAGO et al., 2009; THOMAS, 2014).

O período de floração da canola se estende, em média, entre 30 e 35 dias, mas pode se estender por 45 dias em genótipos de ciclo longo (IRIARTE; VALETTI, 2008; DALMAGO et al., 2009; THOMAS, 2014). O longo período de florescimento da canola permite, caso as plantas sejam expostas a condições térmicas ou hídricas desfavoráveis, que as plantas compensem eventuais perdas, assim que as condições favoráveis se restabeleçam (DALMAGO et al., 2009). O abortamento de flores da canola ocorre de forma natural, porém, o número total de flores que se desenvolvem em síliquas, na colheita, é maior com ausência de restrições durante o ciclo da cultura (THOMAS, 2014). Battisti et al. (2013) verificaram abortamento de flores variando de 11 a 46% em genótipos de canola cultivados a campo, sendo a variabilidade dependente da temperatura do ar e da demanda evaporativa do ar.

O rendimento de grãos da canola pode ser relacionado diretamente com a duração do ciclo da cultura, pois uma fase vegetativa longa favorece a produção e acúmulo de fotoassimilados que poderão ser usados para o enchimento dos grãos. Associado a isso, a fase reprodutiva longa pode possibilitar um período maior de translocação de fotoassimilados para o enchimento dos grãos (KRÜGER et al., 2009). Nesse sentido, Shamsi et al. (2012) observaram que a duração do período de florescimento apresenta correlação positiva com os componentes do rendimento de grãos.

A modificação do arranjo de distribuição das plantas pode alterar o rendimento de grãos da canola. Krüger et al. (2011) verificaram que com menores espaçamentos entrelinhas o rendimento de grãos foi maior se comparado com espaçamento entrelinhas maiores, sendo que a densidade de plantas não influenciou o rendimento de grãos. Segundo Diepenbrock (2000), com densidade de plantas baixa, ocorre compensação no rendimento

de grãos porque há incremento de área foliar, número de ramos e número de siliquas por planta, se comparado com densidade populacional mais elevada. Além disso, em alta densidade de plantas, o rendimento de grãos é limitado pela maior competição intraespecífica por água, nutrientes e radiação (LEACH et al., 1999).

2.3 TEMPERATURA DO AR E CANOLA

A temperatura do ar é uma das principais variáveis ambientais a influenciar a distribuição geográfica, o crescimento e o desenvolvimento das plantas (PEARCE, 2001; REPO et al., 2008; OULLET; CHARON, 2013). Os processos bioquímicos são definidos pela variação da temperatura do ar nos limites compreendidos entre a mínima, ótima e máxima, afetando diretamente a taxa de desenvolvimento e crescimento das plantas (MASAYA; WHITE, 1991). Segundo Dalmago et al. (2009) a temperatura do ar é a principal variável ambiental a influenciar o crescimento e desenvolvimento da canola, desde que baixos níveis de radiação solar não sejam limitantes. Nesse sentido, Thomas (2014) considera que a faixa de temperatura do ar de 12 a 30°C ideal para o crescimento e desenvolvimento, sendo o valor ideal de 21°C. Existem divergências na literatura em relação à temperatura base da espécie, que de acordo Nanda et al. (1995), Vigil et al. (1997) e Thomas (2014) é de 0°C. No entanto, a temperatura de 5°C vem sendo amplamente utilizada para o cálculo da soma térmica (MORRISON et al., 1989; NANDA et al., 1995; IRIARTE; VALETTI, 2008; DALMAGO et al., 2009; NIED, 2013; DALMAGO et al., 2013; THOMAS, 2014; KOVALESKI, 2015). Luz et al. (2012), em estudo com cultivares de canola de primavera, encontraram valores de temperatura base distintos para o período vegetativo e reprodutivo. No período vegetativo a temperatura base foi de 0°C, no início da floração foi 10°C e no enchimento de grãos foi 7,5°C.

A exposição das plantas à temperatura do ar fora da faixa considerada ótima pode resultar em estresse às mesmas, sendo que a exposição a estresse por temperatura baixa é uma das principais causas de redução de produtividade e qualidade em plantas cultivadas. A maioria das culturas de importância econômica é sensível a temperatura do ar abaixo de 10°C (LARCHER, 1995). Perdas significativas podem ocorrer em função de geadas, principalmente se os eventos com baixas temperaturas ocorrerem em períodos em que as plantas são mais sensíveis a danos por frio (OUELLET; CHARON, 2013). Culturas como algodão, soja, milho e arroz são incapazes de sobreviver quando expostas a temperaturas congelantes (LARCHER, 1995).

As plantas expostas a estresse por frio apresentam sintomas de estresse hídrico, devido ao decréscimo da condutância hidráulica. Com menor condutância hidráulica, o conteúdo de água nas folhas e o turgor reduzem, o que leva a redução e/ou cessação do crescimento. Essa resposta, inicialmente, é reversível, mas dependendo da intensidade e tempo de exposição ao frio, pode se tornar irreversível e provocar a morte celular (FENNELL; MARKHART, 1988; AROCA et al., 2001; TAIZ; ZEIGER, 2017).

O estresse pelo frio diminui a fluidez das membranas, provocando o desacoplamento de diferentes complexos multiproteicos, perturbação do fluxo de elétrons e das reações energéticas, desarticulação da homeostase e da regulação iônica. Além disso, o frio pode superestabilizar estruturas secundárias do DNA e RNA, o que provoca interrupção da transcrição, tradução e reciclagem de RNA. Isso resulta em interferência do funcionamento normal do citoesqueleto e organelas associadas (TAIZ; ZEIGER, 2017).

As plantas que são expostas a temperaturas com potencial de congelamento podem enfrentar formação de cristais de gelo tanto no interior das células quanto no seu entorno. A água no apoplasto é mais diluída do que no simplasto e, portanto, tem um ponto de congelamento mais alto. Por este motivo, cristais de gelo tendem a se formar no apoplasto. Com o congelamento da solução do apoplasto o potencial hídrico diminui, se tornando mais negativo que o potencial hídrico do simplasto. Devido a essa diferença de potencial, a água não congelada do interior da célula se move em direção aos cristais de gelo nos espaços intercelulares. A taxa de perda de água simplástica das células depende do gradiente do potencial da água, da permeabilidade da parede e da membrana celular e da área da superfície celular. Com a saída de água da célula, a membrana plasmática se contrai e afasta-se da parede celular. Durante o processo, devido a temperatura baixa, a membrana plasmática enrijece-se e pode ser danificada. Quanto menor a temperatura, maior o movimento de água do interior para o exterior da célula. As células conseguem manter o equilíbrio com o gelo extracelular, se a taxa de resfriamento não for muito alta. Porém, com resfriamento muito acentuado as células se tornam suscetíveis à formação de gelo intracelular, sendo que a formação de cristais de gelo intracelular geralmente provoca morte celular (LEVITT, 1980; GUY, 1990; TAIZ; ZEIGER, 2017).

Os cristais de gelo não se desenvolvem livremente dentro dos tecidos. A estrutura dos tecidos, as paredes celulares e membranas representam obstáculos para a disseminação do gelo (GUSTA et al., 2013). Nem todas as células dos tecidos das plantas estão expostas, ou em contato direto com o gelo extracelular, sendo que a distribuição desse gelo,

frequentemente, é desigual, e em contato com apenas partes de uma célula (ASHWORTH, 1992).

A distância entre a solução intracelular e o gelo extracelular pode ser de vários diâmetros de célula, o que define se a movimentação da água ocorre na fase líquida ou de vapor. Em tecidos predominantemente secos, nos espaços intercelulares, a água se movimenta do interior para o exterior da célula em forma de vapor, e em tecidos túrgidos a movimentação ocorre na fase líquida. Em função disso, células corticais, geralmente, apresentam danos maiores do que células do periderme, floema e câmbio (ASHWORTH et al., 1988; PEARCE, 2001).

Tais efeitos provocados pela ocorrência de geadas podem ocorrer tanto no período vegetativo quanto no reprodutivo das plantas (NISHIYAMA, 1995). Para a canola, os maiores danos por geada ocorrem na fase de roseta, antese e enchimento de grãos (ROBERTSON; HOLLAND, 2004; McCLINCHEY; KOTT, 2008). No início do ciclo de desenvolvimento, a partir do estágio cotiledonar até quando as plantas têm três a quatro folhas a temperatura do ar de -3 e -4°C pode provocar morte de plantas (McCLINCHEY; KOTT, 2008; EDWARDS; ERTEL, 2011; THOMAS, 2014). Kovaleski (2015) verificou que a temperatura do ar abaixo de -1,3°C, próximo às plantas de canola, provoca a morte das mesmas com uma folha desenvolvida, e que a morte de plantas ocorre quando a temperatura das folhas se situa na faixa de -0,7 a -1,5°C. Segundo Hawkins et al. (2002), plantas de canola aclimatadas com mais de cinco folhas desenvolvidas resistem facilmente a temperatura do ar inferior a -5°C.

No período reprodutivo das plantas cultivadas, o estresse por frio provoca abortamento de flores, esterilidade de pólen, distorções no tubo polínico, morte de óvulos e redução do número final de frutos por planta (THAKUR et al., 2010). Para a canola, a ocorrência de geadas na antese e enchimento de grãos pode provocar o abortamento de flores e siliquas e reduzir a qualidade dos grãos, pela retenção de clorofila nos mesmos (WILEN et al., 1994; McCLINCHEY; KOTT, 2008; THOMAS, 2014;).

Segundo Thakur et al. (2010), o período reprodutivo em plantas pode ser dividido, de forma generalizada, nas seguintes fases: início da floração, diferenciação dos órgãos femininos e masculinos, micro e mega-esporogênese, desenvolvimento de gametófitos masculino e feminino, polinização, micro e mega-gametogênese, fertilização e desenvolvimento da semente. Na literatura, verificou-se discordância sobre em qual destas fases é mais sensível ao frio.

De acordo com Satake e Hayase (1970), Takeoka et al. (1992) e Thakur et al. (2010), os órgãos masculinos são mais sensíveis ao frio do que os órgãos femininos, sendo que o desenvolvimento do gameta masculino é mais sensível ao frio, principalmente na fase de micrósporo jovem. Para a canola, os grãos de pólen apresentam sensibilidade ao frio durante o desenvolvimento, principalmente quando os mesmos se encontram no estágio binucleado (LARDON; TRIBOI-BLONDEL, 1994). Enquanto isso, Brooking (1976) e Lardon e Triboi-Blondel (1994), estes últimos para a canola, sugerem que os gametas femininos são mais sensíveis ao frio, com maior sensibilidade desde a meiose até a antese, e após a fertilização até início do desenvolvimento das sementes. Além disso, Lardon e Triboi-Blondel (1994) verificaram que na antese os grãos de pólen da canola são altamente resistentes a danos por frio, enquanto os óvulos são altamente sensíveis.

Lardon e Triboi-Blondel (1994) verificaram que anteras com grãos de pólen com 20% de viabilidade apresentaram taxa de fertilização de óvulos semelhante a grãos de pólen com viabilidade normal. Essa resposta se deve à elevada quantidade de pólen produzida, sendo que para a canola cada antera pode produzir mais de 60 mil grãos de pólen (CRESSWELL, 1999). Além disso, grãos de pólen maduros podem manter a viabilidade mesmo expostos a temperatura do ar entre 60 e -20°C (BROWN; DYER, 1991; RAO et al., 1992).

Para *Cryptantha flava*, Casper (1990) verificou abortamento irreparável de óvulos, quando, mesmo com presença de grãos de pólen viáveis, não ocorreu fertilização de nenhum óvulo. Segundo Dumas et al. (1984), a viabilidade dos óvulos é essencial para o funcionamento normal do pistilo. O efeito do frio no desenvolvimento de óvulos foi pouco estudado até o momento, mas é provável que a maior sensibilidade ocorra após a megasporogênese ou megagametogênese, uma vez que o frio influencia negativamente os processos de divisão celular (RYMEN et al., 2007).

Em grão de bico, Srinivasan et al. (1999) observaram que o estresse pelo frio reduziu o tamanho do ovário e do estilete, o que aumentou a distância entre as anteras e o estigma, reduzindo a deiscência de anteras e conseqüentemente a carga de pólen no estigma, limitando a fertilização dos óvulos (LOZANO et al., 1998), sendo que, após a fecundação, o estresse por frio afeta o crescimento dos embriões, alterando a divisão e diferenciação celular e a taxa e duração do enchimento dos grãos (THAKUR et al., 2010).

Na cultura do trigo, geadas que ocorrem na antese podem resultar em esterilidade completa da espiga, sendo esses danos irreversíveis (LANGER; OLUGBEMI, 1970;

SILVA et al., 2008). No milho, os óvulos são sensíveis desde o início da antese até o início do enchimento de grãos (WESTGATE; BOYER, 1985).

Para a canola, é incomum ocorrer morte de plantas devido a geadas após a antese, exceto em condições extremas (LARDON; TRIBOI-BLONDEL, 1994), o que não é característico da região sul do Brasil. Segundo Lardon e Triboi-Blondel (1995), flores abertas e localizadas na parte superior do ráncimo floral são as estruturas reprodutivas com maior sensibilidade a danos provocados por geadas. Isso ocorre, provavelmente, devido a menor disponibilidade de fotoassimilados para estas flores da metade superior do ráncimo floral (LARDON; TRIBOI-BLONDEL, 1995), associada a maior troca energética entre topo do dossel e atmosfera em noites com ocorrência de geada, o que resulta em menores valores de temperatura do ar próximo a estas flores (TAZZO et al., 2008).

Para Dalmago et al. (2010) a temperatura do ar de -4°C na antese da canola reduziu o número de síliquas por planta e o número de grãos por síliquas, sendo que os autores atribuíram esse resultado ao abortamento de estruturas reprodutivas e a morte de óvulos. Na canola de inverno, a morte de óvulos provoca redução do número de grãos por síliquas, sendo que se todos os óvulos forem danificados ocorre o abortamento da mesma (LARDON; TRIBOI-BLONDEL, 1995). Lardon e Triboi-Blondel (1994), em condições controladas, em plantas não aclimatadas e expostas a temperatura de -3°C , encontraram morte de óvulos na faixa de 50 a 60% no período de 8 a 2 dias antes da antese (100 a 25 graus dia antes da antese, considerando a temperatura base de 5°C), enquanto para botões florais a 2 dias antes da antese (25 graus dia antes da antese) e flores, a morte de óvulos foi superior a 80%.

A ocorrência de geadas com temperatura do ar de -3°C , após a definição do número de síliquas, pode provocar a interrupção do desenvolvimento dos grãos, quando os mesmos possuem acima de 50 % de umidade. Além da redução no rendimento e qualidade dos grãos, a ocorrência de geadas provoca maturação heterogênea das síliquas entre plantas e na mesma planta, dificultando o processo de colheita. A ocorrência de temperatura do ar baixa, mas não letal (0 a 1°C), provoca desequilíbrio no sistema enzimático, que degrada a clorofila dos grãos por ocasião da maturação, portanto, a clorofila dos grãos não é degradada, ocasionando assim a presença de grãos verdes no momento da colheita (McCLINCHEY; KOTT, 2008; EDWARDS; HERTEL, 2011; THOMAS, 2014).

2.4 GEADA

As definições da ocorrência de geadas na literatura são bastante variáveis. Segundo Rosenberg et al. (1983) e Kalma et al. (1992), as geadas são definidas como a condição em que a temperatura do ar próximo à superfície terrestre é igual ou inferior a 0°C. Snyder e Melo-Abreu (2010) definem geada como a ocorrência de temperatura do ar de 0°C, ou inferior, medida em abrigo meteorológico a altura de 1,25 a 2,0 m do solo. Para Camargo et al. (1993), geada é definida como a ocorrência de temperatura mínima do ar igual ou menor a 2°C no abrigo meteorológico, pois consideram que nesta temperatura do ar iniciam os prejuízos em plantas.

A palavra geada, tecnicamente, se refere à formação de cristais de gelo sobre as superfícies, por congelamento do orvalho e sublimação do vapor de água presente no ar sobre superfícies expostas, em forma de prismas ou agulhas (ramificados ou não), de leque ou escamas. A formação de gelo sobre superfícies inicia com temperatura da superfície de 0°C, ou inferior, dependendo do conteúdo de vapor de água no ar (MOTA, 1981; VAREJÃO-SILVA, 2006). Para a área agrônômica, Pereira et al. (2007) afirmam que geada é qualquer temperatura baixa do ar que provoca a morte de plantas ou de seus órgãos, ocorrendo ou não a formação de gelo em superfície e congelamento de seus tecidos. Os danos podem ser causados por ventos frios que soprem por várias horas ou ainda com o resfriamento radiativo, com ou sem formação de gelo na superfície das plantas, quando as mesmas estão menos frias do que o ar. Para Pereira et al. (2007), a formação de gelo em superfície, geralmente, ocorre quando há um intenso resfriamento da superfície provocado pelo saldo de radiação noturno negativo e quando a temperatura da superfície for mais baixa que a temperatura do ponto de orvalho e abaixo de 0°C.

Segundo Snyder et al. (1987) e Kalma et al. (1992) as geadas são classificadas em geadas de advecção e geadas de radiação. As geadas de advecção estão associadas com a incursão de massas de ar frio de grande escala, de origem polar, com ocorrência de ventos moderados a fortes e temperatura do ar abaixo de 0°C, inclusive durante o dia. Geadas de advecção são problemáticas para a agricultura em latitudes e altitudes elevadas. As geadas de radiação ocorrem devido ao resfriamento da superfície pela perda elevada de radiação de onda longa, em noites com céu claro, sem vento e baixa umidade no ar. Devido ao resfriamento da superfície, e à estabilidade atmosférica, ocorre formação de inversão térmica (temperatura do ar diminui em direção a superfície a partir do nível do topo da inversão) porque é a superfície que se resfria mais que o ar. Segundo Sentelhas e Angelocci (2012), geadas de radiação são caracterizadas por ocorrerem em noites de céu sem

nebulosidade, sem vento, com baixa concentração de vapor d'água no ar e sob domínio de massa de ar polar, associado à perda de radiação terrestre.

Frequentemente a ocorrência de geadas está associada com o processo advectivo e radiativo atuando associados, uma vez que a advecção de ar frio, inicialmente, reduz a temperatura do ar e é seguida pelo aumento da estabilidade atmosférica. Com redução da velocidade do vento e umidade do ar, ocorre intensa perda de energia pela superfície pelo processo de radiação e conseqüentemente o resfriamento do ar (KALMA et al., 1992; SNYDER; MELO-ABREU, 2010).

No sul do continente americano, a ocorrência de geadas está relacionada a invasão de frentes frias, associadas a anticlone de origem polar. Previamente a chegada da frente fria, ocorre advecção de ar de origem tropical, sob ação do anticlone subtropical do Atlântico Sul. Nessa situação, ocorre vento de predomínio do quadrante norte e pressão atmosférica alta, mas em gradativo decréscimo, o que provoca aquecimento do ar (aquecimento pré-frontal). Com essas condições atmosféricas, por um a vários dias, e a evolução para uma condição de depressão barométrica, a chegada da frente fria provoca aumento da turbulência atmosférica, o céu torna-se encoberto e ocorrem chuvas moderadas a intensas. Após a passagem da frente fria a pressão atmosférica aumenta, a temperatura do ar reduz e a direção do vento passa a ser dos quadrantes sudoeste a sul. Com o afastamento da frente fria, e domínio do anticlone polar, a turbulência diminui, o ar torna-se seco com céu límpido, favorecendo a intensa perda radiativa da superfície durante a noite, em função da menor contrarradiação da atmosfera, provocando o resfriamento do ar (NIMER, 1989; SARTORI, 2003; AGUIAR; MENDONÇA, 2004) e formação de forte inversão térmica junto superfície da vegetação (HELDWEIN et al., 1988). A temperatura do ar se mantém nos níveis mínimos, normalmente, por dois dias seguidos, uma vez que o anticlone polar é absorvido pelo anticlone subtropical do Atlântico Sul e na retaguarda do anticlone polar existe avanço de nova frente fria. Aliado a isso, a baixa nebulosidade sob domínio do anticlone polar, favorece o aquecimento pela incidência de radiação solar, o que provoca o retorno de ventos do quadrante Norte do anticlone subtropical do Atlântico Sul, e, conseqüentemente, um novo aquecimento pré-frontal, renunciando a chegada de nova frente fria (NIMER, 1989; SARTORI, 2003; AGUIAR; MENDONÇA, 2004).

Segundo Kalma et al. (1992) e Pereira et al. (2007), entre as latitudes de 15° e 40°S é comum a ocorrência de geadas de curta duração no inverno que promovem significativas perdas agrícolas. Entre essas latitudes se insere a região de cultivo da canola no continente sul americano, abrangendo o centro sul do Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai. As

diferentes espécies cultivadas nessa região frequentemente são expostas à estresse provocado pela ocorrência de geadas, sendo os danos provocados devido à exposição à temperatura do ar baixa por período prolongado, ou então devido à exposição por curto período de tempo (KALMA et al., 1992). Além disso, a suscetibilidade das culturas agrícolas a geadas depende da espécie e estágio fenológico das plantas. Para Mota (1981), em espécies mais sensíveis ao frio, como banana, mamão e girassol, os danos se iniciam com temperatura das folhas de -2°C . Em espécies menos sensíveis, como a cana-de-açúcar e citrus, os danos em plantas se iniciam com a temperatura das folhas de -4°C . Segundo Pinto et al. (1977), a temperatura das folhas de -2 e -4°C correspondem, aproximadamente, à temperatura do ar de 4 e 2°C no abrigo meteorológico, respectivamente. Esses gradientes são próximos à variação entre a temperatura do ar no abrigo meteorológico e a temperatura mínima na relva, uma vez que vários autores verificaram que em datas com ocorrência de geada o gradiente entre a temperatura do abrigo meteorológico supera em 4°C a temperatura mínima na relva (HELDWEIN et al., 1988; GRODZKI et al., 1996; OLIVEIRA et al., 1997; SILVA; SENTELHAS, 2001; WREGE et al., 2005; CARAMORI et al., 2008).

O gradiente de temperatura entre o abrigo meteorológico e a relva é dependente da intensidade de frio e da velocidade do vento (HELDWEIN et al., 1988), sendo que, geralmente, quanto maior a intensidade de frio, maior o gradiente. A intensidade e o número de ocorrência de geadas, em macroescala, são definidos pela altitude, latitude e continentalidade. Em microescala, a vegetação, natureza da superfície, o relevo e a orientação do relevo são fatores que se revestem de importância, uma vez afetam o saldo de radiação, as perdas de energia e a drenagem do ar frio (KALMA et al., 1992; GRODZKI et al., 1996; MASSIGNAM; DITTRICH, 1998). A maior densidade do ar frio faz com que o mesmo tenda a acumular-se junto à superfície e escoar pelas encostas, principalmente pelas partes côncavas do relevo até as partes mais baixas deste. Assim, nas áreas côncavas das encostas e nas depressões no terreno, presentes em regiões com relevo ondulado, a probabilidade de ocorrência de danos às plantas por geada radiativa é maior, devido a drenagem ou acúmulo de ar mais frio em tais locais (VAREJÃO-SILVA, 2006; SILVA; MINUZZI, 2016).

A intensidade de resfriamento em noites com ocorrência de geada pode ser definida e estimada pelo balanço de energia. O método do balanço de energia de uma superfície vegetal é definido pela relação da energia que entra e a energia que sai do sistema, baseando-se no princípio da conservação da energia. Apesar das limitações impostas pelos equipamentos de medida, pelos erros provocados pela advecção de energia e nas suposições

teóricas da razão de Bowen, a praticidade e precisão oferecida pelo método fazem com que seja amplamente utilizado na estimativa de partição energética. A equação geral do balanço de energia considera o saldo de radiação, o fluxo de calor sensível para o solo e os fluxos de calor sensível e calor latente na atmosfera, desconsiderando os fluxos de energia no sentido horizontal e a energia consumida em processos como a fotossíntese e a respiração, além da energia armazenada pelo dossel de plantas (FUCHS; TANNER, 1970; VILLA NOVA, 1973; CUNHA; BERGAMASCHI, 1994; GALVANI et al., 2001; PILAU et al., 2007). Desta forma, a equação geral do balanço de energia é assim simplificada:

$$R_n + LE + H + S = 0$$

Onde:

R_n = Saldo de radiação; LE = Fluxo de calor latente; H = Fluxo de calor sensível;
 S = Fluxo de calor para o solo;

Durante o dia, parte da radiação solar transmitida pela atmosfera, e que chega à superfície é absorvida ou transmitida pela mesma, promovendo o seu aquecimento, o restante da radiação é refletida. A energia excedente da superfície é irradiada em forma de radiação de ondas longas, sendo a quantidade de radiação emitida pela superfície determinada pela sua temperatura e emissividade. A emissão de radiação de ondas longas pela superfície é dada pela equação de Stefan-Boltzman, a qual é função da temperatura instantânea elevada na quarta potência (KALMA et al., 1992; SNYDER; MELO-ABREU, 2010).

A contrarradiação que a superfície terrestre recebe da atmosfera é determinada pela temperatura e emissividade dos constituintes da atmosfera, principalmente pelos constituintes das nuvens, do vapor de água e dióxido de carbono. A emissividade da atmosfera é altamente variável no espaço e tempo, uma vez que, principalmente, o conteúdo de vapor de água no ar é altamente variável, sendo que condições de nebulosidade podem até impedir o resfriamento da superfície (KALMA et al., 1992; FONTANA et al., 1991; SNYDER; MELO-ABREU, 2010).

O resfriamento da superfície durante a noite ocorre devido à emissão de radiação de ondas longas para o espaço, o que provoca o resfriamento do ar adjacente. Assim, o resfriamento do ar ocorre de baixo para cima, sendo a transferência de calor das camadas de ar superiores para as inferiores feita por convecção, e em menor grau, por condução. Por

isso, em noites calmas e com céu límpido, a temperatura do ar é mais baixa próximo à superfície (KALMA et al., 1992; SNYDER; MELO-ABREU, 2010). Segundo Pezzopane et al. (1995), quando o saldo de radiação é negativo, as superfícies atuam como um sumidouro de energia. Assim, quanto mais negativo o saldo de radiação, mais a superfície pode resfriar o ar adjacente e o solo, com o propósito de equilibrar o balanço energético. Em noites com geada de radiação, as perdas radiativas fazem com que o saldo de radiação seja ainda mais negativo, devido a baixa contra-radiação, contribuindo para a diminuição da temperatura do ar.

O fluxo de calor noturno no solo e o calor sensível do ar são ambos positivos, pois ocorre transferência de energia no sentido de atenuar as perdas de radiação da superfície para o espaço. Como a magnitude de energia do calor sensível do solo e do ar é menor do que as perdas por radiação da superfície, a temperatura do ar, do dossel de plantas e do solo diminui (SNYDER; MELO-ABREU, 2010).

O fluxo de calor sensível depende da diferença entre a temperatura da superfície e o ar, e do grau de turbulência atmosférica, que por sua vez, depende da estabilidade atmosférica, da velocidade do vento e da rugosidade e da natureza da superfície. Assim, em uma noite com vento ocorre mistura das camadas de ar, portanto, fortes gradientes verticais de temperatura do ar são raros, porque a advecção, e convecção, promovida pelo vento, substitui rapidamente a energia perdida pela superfície. Em noites com pouco vento a convecção é incapaz de substituir a energia perdida pela superfície, predominando a transferência de energia por condução, que é pouco eficiente. Desta forma, tanto a superfície como as camadas de ar adjacentes se esfriam. Devido à reduzida velocidade do vento, o calor perdido pelas camadas de ar próximo à superfície não é suprimido pelo calor das camadas de ar acima. A advecção de calor latente e sensível, em grande escala, em noites sem vento e céu límpido é insignificante, ou então nula (KALMA et al., 1992; SNYDER; MELO-ABREU, 2010).

O fenômeno da formação de gelo em superfície ocorre em noites com céu límpido e ausência de vento, quando a temperatura da superfície estiver abaixo de 0°C tanto como abaixo da temperatura do ponto de orvalho do ar. Assim, a temperatura da superfície em que se inicia a formação de cristais de gelo é dependente da concentração de vapor de água no ar. Quanto menor a quantidade de vapor de água no ar, menor é a temperatura da superfície na qual se inicia a deposição de gelo. Assim, a deposição de cristais de gelo sobre as plantas pode ocorrer abaixo da temperatura letal, fenômeno que é denominado de geada negra, uma vez que ocorrem injúrias às plantas, provocadas pelo frio, sem deposição de

gelo em superfície (WEXLER, 1965; VAREJÃO-SILVA, 2006; SNYDER; MELO-ABREU, 2010).

As geadas negras, normalmente, provocam danos mais severos às culturas agrícolas do que as geadas brancas (com formação de gelo nas superfícies expostas), pois com a mudança de estado físico da água de vapor para gelo (ou orvalho), ocorre liberação de calor sensível, o que atenua o resfriamento próximo à superfície durante as geadas brancas, evitando muitas vezes que a temperatura letal para as plantas seja alcançada. Previamente à formação de gelo, as superfícies podem atingir a temperatura do ponto de orvalho, fazendo com que o vapor de água do ar deposite-se em forma líquida nas superfícies expostas, processo no qual também ocorre liberação de calor latente e atenuação do resfriamento. Em havendo o contínuo decréscimo de temperatura ($\leq 0^{\circ}\text{C}$), o orvalho se solidificará (VAREJÃO-SILVA, 2006; SNYDER; MELO-ABREU, 2010).

2.5 ACLIMATAÇÃO AO FRIO

A aclimação ao frio é a capacidade que as plantas possuem de aumentar a tolerância ao frio quando expostas por um período à temperatura do ar baixa (LEVITT, 1980). Na natureza, as plantas são submetidas a uma gama de condições ambientais que resultam em uma resposta integrada que leva à aclimação a frio (GUSTA et al., 2013). Os mecanismos envolvidos na aclimação são bastante diversificados, abrangendo desde nível estrutural (planta inteira) até adaptações bioquímicas em células específicas. A aclimação ao frio é um processo multigênico quantitativo que abrange mudanças bioquímicas e estruturais que tem forte efeito na fisiologia das plantas (LEVITT, 1972; RAPACZ, 1999; GUSTA et al.; 2004).

Com a aclimação, dentre outras alterações, se desenvolve a estabilização de membranas celulares, que são os primeiros sítios danificados em eventos de congelamento causados por geadas. A estabilização das membranas celulares ocorre pelo aumento da proporção de ácidos graxos insaturados e poli-insaturados nas bicamadas lipídicas da membrana celular, o que resulta em maior fluidez das membranas, garantindo a funcionalidade metabólica e estrutural das células em temperatura do ar mais baixa. Além disso, o processo de aclimação ativa mecanismos que permitem a plena atividade de enzimas associadas as membranas celulares durante a ocorrência de geadas (UEMURA; STEPONKUS, 2003; VOGG et al., 1998; UEMURA et al. 2006). Segundo Ouellet e

Charron (2013), os genes responsáveis pelo aumento da tolerância ao frio são responsivos também ao estresse hídrico, ácido abscísico e salinidade do solo, e ainda não foi estabelecido como esses diferentes estímulos convergem para induzir a expressão destes genes.

A tolerância ao frio pode variar entre os diferentes órgãos das plantas, uma vez que os mecanismos envolvidos na aclimatação ao frio, frequentemente, diferem entre os órgãos em uma mesma planta, e em alguns casos entre células adjacentes. Além disso, o mecanismo para aumentar a tolerância ao frio de curta duração é diferente do mecanismo para aumento da tolerância ao frio por um período prolongado (GUSTA; WISNIESKI, 2013). Estes diferentes mecanismos diferenciam a tolerância ao frio entre cereais de inverno e de primavera.

Segundo Hu et al. (2001), quando cereais de inverno são expostos à temperatura do ar com potencial de aclimatação, as plantas apresentam crescimento prostrado, o que favorece o acúmulo de carboidratos. Enquanto isso, os cereais de primavera, com mesma temperatura do ar, apresentam crescimento ereto e são suscetíveis à fotoinibição, que é induzida pela temperatura do ar baixa (HÜNER et al., 1993; DAHAL et al., 2012). Segundo Rapacz (1999), o aumento da tolerância ao frio está diretamente ligado com a capacidade das plantas manterem taxa fotossintética alta com temperatura do ar baixa.

Assim, Gusta et al. (2009) relatam que cereais de inverno podem desenvolver tolerância a temperatura do ar de até -25°C , enquanto cereais de primavera toleram temperatura do ar de até -9°C , porém em curto período de tempo. Segundo Schilling (2004), a principal diferença na capacidade de aumentar a tolerância ao frio entre cereais de inverno e primavera se deve a maior capacidade dos cereais de inverno acumularem açúcares durante a aclimatação, uma vez que existe forte correlação entre o desenvolvimento da tolerância ao congelamento e o acúmulo de açúcares (ÖQUIST et al., 1993, HURRY et al. 1994, DAHAL et al. 2012). As plantas não se aclimatam ao frio no escuro (WANNER; JUNTILA, 1999). Além disso, o aumento de diversas proteínas, em resposta à exposição a baixas temperaturas, se correlaciona com algum nível de tolerância ao congelamento. A função destas proteínas não foi totalmente estabelecida, mas de acordo com a estrutura e composição, acredita-se que estas desempenham funções de crioproteção e previnem a desnaturação de vários componentes celulares (BURCHETT et al., 2006).

O nível de açúcares acumulados tem correlação com o nível de tolerância ao frio das plantas porque esse acúmulo diminui o potencial osmótico celular, e conseqüentemente, diminui o ponto de congelamento do citoplasma, impedindo a formação de cristais de gelo

intracelulares (BURG; FERRIS, 2005; OUELLET; CHARRON, 2013). Além disso, a redução do potencial osmótico citoplasmático pode reduzir a taxa de deslocamento de água do citoplasma para os espaços intercelulares, durante ocorrência de geadas em que ocorre formação de cristais de gelo extracelulares, e impede que ocorram danos provocados pela dessecação celular. Em dias com geada a presença de cristais de gelo nos espaços intercelulares favorece a transferência de água do interior para o exterior da célula, devido a menor pressão de vapor de água na superfície do gelo, do que a pressão de vapor da água líquida no citoplasma. Devido ao acúmulo de solutos no citoplasma, em decorrência da aclimação, ocorre redução do potencial osmótico do mesmo, o que desfavorece o deslocamento de água do citoplasma para os espaços extracelulares durante dias com ocorrência de geada (LEVITT, 1980; PEARCE, 2001).

O processo de aclimação ao frio pelas plantas pode ter três tipos, dependendo da espécie. A primeira fase envolve a aclimação em que as plantas adquirem tolerância à geadas com temperatura do ar que varie de -5°C até -9°C , sendo este tipo de aclimação verificado em plantas anuais que não necessitam de vernalização. As plantas anuais que necessitam de vernalização apresentam o segundo tipo de aclimação, quando estas respondem à temperatura de aclimação próxima a 0°C e adquirem tolerância ao frio até temperatura do ar de -25°C . A terceira etapa pode acontecer em algumas espécies, em temperatura do ar abaixo de 0°C , sendo que ocorre a combinação de processos bioquímicos e biofísicos (GUSTA et al., 2004).

A maioria dos estudos avaliando a aclimação ao frio pela canola foram realizados em canola do tipo de inverno, que é cultivada em regiões onde a temperatura do ar pode chegar a -25°C (TONGSON, 2017). Plantas com necessidade de vernalização são expostas por maior período de tempo a temperatura do ar baixa no período vegetativo, portanto, podem aumentar a tolerância ao frio mais do que cultivares de primavera (RIFE; ZENALI, 2003). Além disso, cultivares de canola de primavera tem menos tolerância ao frio que as cultivares de inverno, uma vez que as cultivares sem necessidades de vernalização têm capacidade limitada de cessar o crescimento e manter alta atividade fotossintética durante a aclimação (RAPACZ, 1999). Segundo Fowler et al. (1996), Mahfozzi et al. (2001) e Tryschuk et al. (2014), quando afirmam que plantas sem requerimentos vernalizantes possuem limitada capacidade de aumentar a tolerância a frio no período reprodutivo.

Para Săulescu e Braun (2001) o desenvolvimento da aclimação inicia com a exposição à temperatura do ar abaixo de 15°C . Para a canola Rapacz et al. (2001) e Rife e Zeinali (2003) afirmam que o início da aclimação ao frio ocorre com temperatura do ar

entre 10°C a 15°C, sendo que Rapacz e Janowiak (1999) indicam que a aclimação para a canola ocorre com temperatura do ar abaixo de 12°C. Valores de temperatura do ar que ocorrem com frequência em grande parte do sul da América do Sul na época de cultivo da canola, porém, nem sempre com período de tempo suficiente para que as plantas se aclimatem, ou então as mesmas são expostas a ciclos de aclimação e desaclimação em curto período de tempo.

Em função das mudanças climáticas, e cenários que preveem significativo aumento da temperatura do ar, principalmente em latitudes elevadas, os ciclos de aclimação e desaclimação serão mais frequentes (RAPACZ et al., 2014; KOVI et al., 2016; RAPACZ et al., 2017). Isso pode resultar em plantas com menor tolerância ao frio, e conseqüentemente, com probabilidade de ocorrência de geadas mais danosas. Rapacz et al. (2017) relata que ainda não foi estabelecido como períodos de desaclimação podem afetar a tolerância das plantas ao frio. Em teoria, períodos de aquecimento são prejudiciais às plantas quando são sucedidos por geadas. Segundo Săulescu e Braun (2001), a tolerância à geada é uma condição dinâmica, uma vez que mudanças de temperatura do ar, conteúdo de água nos tecidos vegetais, umidade do solo, nutrição, estágio de desenvolvimento das plantas e condições fisiológicas podem interromper, reverter ou reiniciar o processo de aclimação.

Apesar do processo de aclimação iniciar com temperatura ar de 10 a 15°C, Thomashow (1999) e Tasseva et al. (2004), para a canola de inverno, relatam que o aumento máximo na tolerância ao frio foi obtido com temperatura do ar na faixa de 2 a 6°C. Rapacz et al. (2001) verificaram que o máximo aumento da tolerância ao frio, devido à aclimação ao frio, foi alcançado quando as plantas foram expostas por seis semanas sob temperatura do ar de 5°C. Dalmago et al (2010), em canola de primavera, verificaram que plantas expostas por três dias à temperatura do ar na faixa de 12 a 2°C apresentaram queima de folhas a -6°C, enquanto plantas não aclimatadas apresentaram queima de folhas com temperatura de -2°C.

Para Săulescu e Braun (2001) um dos aspectos mais importantes no início da aclimação está relacionado à diminuição do potencial osmótico e o acúmulo de açúcares nos tecidos, o que favorece o aumento no nível de ácido absísico (ABA). Taiz e Zeiger (2017) afirmam que durante a aclimação, os açúcares solúveis se acumulam nas paredes celulares, o que pode restringir o crescimento dos cristais de gelo. Para Gusta et al. (2004) folhas de canola aclimatadas ao frio apresentaram-se com 50 a 60% menos água que folhas não aclimatadas, assim como o conteúdo de água no apoplasto também é menor. Durante

a aclimação, o conteúdo de água nas plantas de canola diminui, o que aumenta a concentração de açúcares solúveis e prolina nas folhas (RAPACZ, 1999).

Segundo Scúcz et al. (2003) a umidade do solo tem influência direta na concentração de solutos das células das plantas. Com maior umidade do solo a concentração da solução celular é mais baixa e a temperatura de congelamento da mesma é mais alta, dificultando assim o processo de aclimação por favorecer o congelamento da solução celular. Para Rife e Zeinali (2003), após um período de sete dias com temperatura do ar elevada (15°C) as plantas de canola apresentaram significativa redução na tolerância ao frio.

2.6 MICROCLIMA EM DOSSEL DE PLANTAS

O conhecimento da troca de energia entre o dossel de plantas e o ambiente é essencial para o manejo das culturas agrícolas. O microclima em comunidades vegetais é definido pelo balanço de energia próximo à superfície, sendo este determinado pela relação da energia que entra e sai do sistema. O balanço de energia é definido como a partição do saldo de radiação em fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente, fluxo de calor para o solo, energia utilizada para o processo fotossintético e armazenamento de calor no dossel de plantas. De forma geral, a superfície pode atuar como fonte ou dreno de energia, uma vez que quando o saldo de radiação é positivo, a superfície fornece energia para o aquecimento do ar e para evaporação de água. Durante a noite, a superfície atua como sumidouro de energia, resfriando o solo e o ar adjacente (ROSENBERG et al., 1983; ANDRADE, 2015).

Durante o dia, normalmente, existe forte relação entre as variáveis microclimáticas acima e dentro do dossel, sendo que as trocas energéticas acima do dossel dominam as trocas energéticas dentro do mesmo. Essa resposta também é verificada durante a noite, quando a velocidade do vento é alta. Com a redução da velocidade do vento, durante a noite, as trocas energéticas acima do dossel e dentro do dossel são, praticamente, independentes. Acima do dossel, em função do resfriamento radiativo do topo do mesmo, se desenvolve estabilidade térmica, onde os fluxos de calor sensível e calor latente são muito baixos. O resfriamento do topo do dossel desenvolve instabilidade térmica em seu interior, o que promove a convecção livre de energia. Assim, ocorre fluxo de energia proveniente do solo, ar e dossel, dos terços inferiores, no sentido de compensar a perda de energia do topo do dossel. Nestas noites em que ocorre convecção livre no interior do

dossel, a energia é livremente transportada até regiões do dossel onde a densidade de folhas é maior (GEIGER, 1995; JACOBS et al., 1996).

Durante o período diurno, Baldocchi et al (1983) verificaram que para a cultura da soja, após a irrigação, a temperatura do ar foi maior no topo do dossel. Em déficit hídrico o perfil de temperatura do ar foi isotérmico, uma vez que o estresse hídrico reduziu a transpiração, fazendo com que a temperatura do ar aumentasse em todo o dossel. Durante o período noturno a temperatura do ar foi menor na metade superior do dossel, devido ao resfriamento radiativo. Na metade inferior do dossel a temperatura do ar foi maior porque as folhas aprisionaram a radiação terrestre. Esses resultados são semelhantes ao encontrados em outros cultivos por Begg et al. (1964), Brown e Covey (1966), Saugier (1970), Johnson et al. (1976), Stigter et al. (1976), Jacobs et al. (1996), Feldhake (2002), Porte et al. (2004), Tazzo et al. (2008), Winkel et al. (2009) e Loose et al. (2011).

Segundo Rosenberg (1983), a temperatura do ar próximo à superfície de troca de energia é maior durante o dia e menor durante a noite. No fim do período diurno, a partir do momento em que a superfície passa a perder mais energia do que receber, gradativamente se desenvolve uma camada de inversão próximo à camada de maior troca energética entre dossel e atmosfera, sendo este nível o topo do dossel. No interior do dossel o microclima é influenciado por fatores como área foliar, arquitetura de plantas, altura e densidade das plantas, as quais interferem na interceptação e no balanço de radiação, determinando diferentes regimes de temperatura e umidade do ar dentro do dossel das culturas (MONTEITH; UNSWORTH, 1990). Nesse sentido, as culturas com alto índice de área foliar são mais propensas a danos provocados por geada no extrato superior do dossel (LHOMME; GUILIONI, 2004; WINKEL et al., 2009), uma vez que as folhas isolam os estratos superiores do dossel da energia proveniente do solo, que poderia atenuar o resfriamento.

No período noturno, diversos autores verificaram que a temperatura do ar, no interior do dossel, é maior próxima ao solo (ROSENBERG, 1983; JACOBS et al., 1996; TAZZO et al., 2008; WINKEL et al., 2009; LOOSE et al., 2011). De acordo com Rosenberg (1983), no interior do dossel, abaixo da camada exposta às trocas diretas de energia entre dossel e atmosfera, a tendência é de menor resfriamento do ar no período noturno. O saldo de radiação de ondas longas tende a zero (HELDWEIN, 1993), uma vez que as folhas inferiores do dossel são gradativamente mais protegidas por maior área foliar acima e tem menor exposição direta com a atmosfera.

Em noites com ocorrência de geada, Jordan e Smith (1995) e Winkel et al. (2009) verificaram que a temperatura das folhas resulta do efeito combinado da baixa temperatura do ar no topo do dossel e o resfriamento radiativo em noites sem vento e com céu claro. Os autores afirmam que o grau de nebulosidade tem mais influência no congelamento das plantas do que a temperatura do ar, pois sob condição de saldo de radiação muito negativo a temperatura de folhas expostas a céu aberto é de 1,0 a 2,6 °C mais baixa que o ar.

Segundo Mointeith e Unsworth (1990), a baixa velocidade do vento favorece a intensificação dos gradientes verticais e horizontais de temperatura do ar, pois com baixa turbulência não ocorre a mistura das camadas de ar. Heldwein (1993) afirma que a baixa velocidade do vento aumenta a amplitude da curva do perfil da temperatura do ar e desloca o topo da inversão térmica para baixo. Com isso, não ocorre a mistura das camadas de ar, e em função do saldo de radiação negativo, favorecido pelo céu límpido, ocorre o resfriamento da superfície e do ar adjacente a mesma. Segundo Snyder e Melo-Abreu (2010) a baixa velocidade do vento favorece a transferência de energia no sentido vertical, sendo a advecção de calor latente e sensível, em grande escala, insignificante, ou nula, o que aumenta a amplitude da curva do perfil da temperatura do ar.

Para a canola, segundo Fochesatto et al. (2016), no período vegetativo da cultura, as folhas são as estruturas com maior interação com a radiação fotossinteticamente ativa. Portanto, isso é um indicativo que, devido estarem totalmente expostas, em noites com céu claro e sem vento, as folhas da canola são a superfície do dossel com maior troca energética com a atmosfera, embora não existam estudos para a cultura da canola que comprovem essa inferência. No período reprodutivo, Fochesatto et al. (2016) verificaram que a maior interceptação de radiação fotossinteticamente ativa ocorreu no topo do dossel, pelas estruturas reprodutivas da canola. Portanto, com incremento do índice de área de estruturas reprodutivas, o nível de maior interação do dossel e atmosfera foi deslocado para o topo do dossel. De acordo com Rosenberg (1983), a camada de troca de energia entre a superfície e a atmosfera acompanha a elevação da estatura do dossel e incremento de IAF. Para a canola, em função da arquitetura das plantas, o aumento do índice de área de estruturas reprodutivas, aliado a incremento da estatura das plantas, provoca o deslocamento gradual do nível de maior troca energética das folhas até o topo do dossel. Para Fochesatto et al. (2016), o índice de área de estruturas reprodutivas médio da canola foi de 2,4.

2.7 ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DO AR E ESTIMATIVA DE DANOS POR GEADA EM PLANTAS

O desenvolvimento de modelos para estimativa da temperatura mínima do ar, em função de elementos meteorológicos, foi realizado por Rahn e Brown (1971), que geraram modelo para estimar a temperatura mínima do ar no dossel do milho, em função da temperatura no abrigo meteorológico, com erro máximo de $0,56^{\circ}\text{C}$. Nesta mesma linha, Agendes (1985) e Heldwein et al. (1988) verificaram elevada relação entre a temperatura do ar próximo à superfície do solo e a temperatura do ar no abrigo meteorológico, possibilitando o ajuste de função de regressão para estimar a temperatura mínima do ar a 5 cm do solo (HELDWEIN et al., 1988). Baseado no saldo de radiação e na temperatura do ar na estação meteorológica, Heldwein e Krzysch (1999) desenvolveram modelo para estimativa da temperatura do ar no topo do dossel da cultura da batata. A temperatura mínima do ar no dossel pode ser estimada também a partir do saldo de radiação no início do período noturno que antecede a ocorrência da geada, conforme demonstraram Lhomme e Guilioni (2004) para a cultura de ervilha. Essa mesma abordagem foi adotada por Cellier (1984) para desenvolver modelo para previsão da evolução da temperatura do ar em noites com ocorrência de geada de radiação, em função da velocidade do vento (2 m de altura), temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e temperatura do solo a 10 cm de profundidade ao pôr do sol na estação meteorológica. Também Silva e Minuzzi (2016) desenvolveram modelos para previsão de ocorrência de temperatura mínima do ar menor do que 4°C em função da temperatura do ar a meia noite (00 hora), com acerto na faixa de 64 a 89%.

Para a cultura do trigo, Martino e Abatte (2019) quantificaram os danos provocados por geadas em diferentes estádios de desenvolvimento da espiga, e verificaram que a antese é o período mais sensível. Assim, desenvolveram e validaram modelo teórico-empírico para estimativa de danos baseado no período de tempo que a temperatura do ar próximo às espigas fica abaixo de $-1,5^{\circ}\text{C}$.

**3 ARTIGO 1 - FROST DAMAGE IN THE REPRODUCTIVE PHASE OF CANOLA
(BRASSICA NAPUS L.) IN CONTROLLED ENVIRONMENT (*)**

Running title: Frost damage: canola reproductive phase

Article category: Agrometeorology

(*) *Formatação de acordo com as normas do periódico Scientia Agricola*

3.1 ABSTRACT: Frost can severely damage canola (*Brassica napus* L.) during anthesis and grain filling. Although cold acclimation can increase freezing tolerance in canola before frost occurs, this cannot always be accurately tested in the field. This study evaluated frost-related damage and benefits of cold acclimation during the reproductive phase in canola. Plants were exposed to cold acclimation and frost simulation at the start of flowering, during full flowering, and at the start of grain filling. The following were evaluated: plant mortality, number of viable ovules and silique abortion, floral buds and flowers, number of silique grains, total plant dry matter, number of siliques, total silique abortion, and grain dry matter. Frost caused death in non-acclimated plants and increased abortion in siliques, floral buds, and flowers, thus reducing silique and grain dry matter content. Frost mostly prevented the development of embryos in the siliques, but viable ovules were found in the floral buds and flowers. During their reproductive phase, cold-acclimated canola plants have only a limited ability to increase their tolerance to frost damage. Nonetheless, closed floral buds and open flowers are more resistant to frost damage than siliques, and siliques originating from the former contained a higher number of grains than the latter after frost exposure. Therefore, from the start of flowering to the start of grain filling in canola, floral buds and flowers are responsible for producing most of the grain dry matter when there is frost occurrence.

KEYWORDS: air temperature; freezing tolerance; cold acclimation; freezing damage

3.2 INTRODUCTION

Canola (*Brassica napus* L.) exhibits good cold adaptability, especially when cold-acclimated, a process of exposure to low but non-freezing air temperatures that increases freezing tolerance (Fowler et al., 1999; Thomashow, 1999). Cold acclimation results in a reduced water potential in plant tissues (Gusta et al., 2004), since accumulated sugar in the vacuoles (Fujikawa et al., 1999), modified membrane composition, and a greater accumulation of unsaturated compared with saturated fatty acids, allow greater membrane fluidity during freezing, thus reducing membrane damage (Ouellet et al., 2001; Pearce, 2001).

However, in the absence of cold-acclimation, frost can cause severe damage during anthesis and grain filling (Dalmago et al., 2010; Gusta et al., 2004; Hawkins et al., 2002; McClinchey and Kott, 2008; Rapacz, 1999; Rapacz et al., 2001). Lardon and Triboi-Blondel (1995) verified that frost-related plant death after anthesis is unusual in field cultivation; frost damage during the reproductive phases mainly concerns flower, silique, ovule, and embryo abortion, and reduced grain quality reduction due to chlorophyll retention (Lardon and Triboi-Blondel, 1995; McClinchey and Kott, 2008; Wilen et al., 1994). Open flowers on the upper main stem exhibit a higher cold sensitivity in canola reproductive structures than closed floral buds and siliques, because of reduced photoassimilate availability associated with low air temperatures in the upper canopy (Lardon and Triboi-Blondel, 1995). In a controlled environment, an air temperature of -4°C during canola anthesis reduces the number of siliques per plant and grains per silique, probably due to ovule death (Dalmago et al., 2010; Lardon and Triboi-Blondel, 1994).

Frost damage to canola flowers and siliques at different reproductive stages has not however been described, and the processes involved during reproduction, and a quantification of damage, remain unclear. The high variability in meteorological conditions

in southern Brazil during the canola cultivation period, including frost occurrence, makes this an important area of study, especially in the context of extemporaneous frost events not preceded by an acclimation period. Our objective was therefore to determine the damage to canola during reproduction caused by simulated frost in cold-acclimated and non-acclimated plants grown in a controlled environment.

3.3 MATERIAL AND METHODS

3.3.1 Experimental design

The research was performed in Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brazil (28°15'S, 52°24'W and 687 m above sea level) in year 2016. Two experiments were carried out under controlled conditions in growth chambers and a glass greenhouse with an air temperature control system. However, in some periods the air temperature in the greenhouse exceeded 20 °C due to the control system's low efficiency, but this did not affect the results because it was at the end of the grain-filling period. In both experiments, canola plants were cultivated in growth chambers from sowing until the start of frost simulation. After the frost simulation, plants were placed in a greenhouse to complete the development cycle.

A completely randomized design with a factorial arrangement was utilized, with the factors being 'acclimation' (plants with and without cold acclimation) and 'frost' (plants with and without frost simulation). Seeds were sown in 48 polyvinyl chloride (PVC) pots (diameter, 22 cm; height, 25 cm; capacity, 8 kg soil). The soil was obtained from horizon A of a soil classified as Rhodic Hapludox. Fertilization was undertaken to achieve a yield of 2.0 t ha⁻¹ grains. Five seeds were sown per pot, and then thinned to two plants per pot when the plants presented two to three developed leaves. Each plant was considered a separate experimental unit because plants in the same pot could present with different developmental stages when the acclimation and frost treatments were applied. Irrigation

was performed daily in order to maintain soil moisture levels. Moisture control was performed using a portable probe (Hydrosense II with HS2 display; Campbell Scientific, São Paulo, Brazil); the average soil moisture in the pots was 28 % for both experiments on the day that plants were exposed to frost. Topdressing of fertilizer, with nitrogen and phytosanitary control, was performed when necessary, using products recommended for canola. The developmental stage of each plant was evaluated every two days, and on the day that plants were submitted to frost simulation, using the phenological scale adopted by CETIOM (Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux et du Chanvre) (Iriarte and Valetti, 2008).

3.3.2 Plant genotypes and developmental cycles

In order to evaluate the effect of the treatment combinations (frost and acclimation) at different points in the canola reproductive period, genotypes with different development cycles were used: Hyola 433 (early cycle), Hyola 61 (medium cycle), and Hyola 76 (late cycle) in experiment 1; and Diamond (early cycle), and Hyola 61 (medium cycle) in experiment 2. This strategy ensured that, on the day of the frost simulation, the following canola phenological stages were represented: separated floral buds (E), first open flowers (F1), main branch elongation and several open flowers (F2), petal fall and the first ten 2 cm long siliques (G1), and siliques ≤ 4 cm (G3). The plants were classified into three groups, based on which type of reproductive structure was predominant on the main stem: beginning of flowering (BF; stages E and F1); full flowering (FF; stage F2); and beginning of grain filling (GF; stages G1 and G3). Thus, 41, 24, and 31 plants (experiment 1), and 19, 18, and 59 plants (experiment 2), were placed in the BF, FF, and GF groups, respectively for each experiment.

3.3.3 Experimental conditions, cold acclimation, and frost simulation

The growth chamber used for canola cultivation from sowing to frost simulation (growth chamber 1) had the following characteristics: 12 h light (daytime) and 12 h dark (nictoperiod), with photosynthetically active radiation (PAR) in the range of 230 to 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; a mean daily air temperature inside the chamber of 14 °C (daytime, 18 °C; nictoperiod, 10 °C); and air relative humidity maintained between 80 % and 100 % during both day and night. Another growth chamber (growth chamber 2) was used for plant acclimation and frost simulation, with a photoperiod, air relative humidity, and PAR equal to that used in growth chamber 1.

Before canola plants were exposed to the two cold acclimation regimes (with and without acclimation), all plants were submitted to an air temperature regime of 20 °C (daytime) and 16 °C (nictoperiod) (daily mean of 18 °C), with no change in photoperiod, air relative humidity, and PAR. This thermal regime was adopted in both experiments with the objective of eliminating or reducing any cold acclimation level previously acquired by plants from the thermal regime adopted during growth. After this ‘loss of acclimation’ period, plants were exposed to the two cold acclimation regimes.

In both experiments, cold acclimation began when the plants reached phenological stage E. This occurred at 75 and 70 days after sowing in experiments 1 and 2, respectively. The thermal regime for plant acclimation was based on a methodology adopted by Dalmago et al. (2010). In growth chamber 2, canola plants were submitted to air temperatures ranging from 2 to 8 °C (nictoperiod), and 8 to 13 °C (daytime), for 72 consecutive hours. Air relative humidity was 50–60 % (daytime) and 80–100 % (nictoperiod). In growth chamber 1, non-acclimated plants were exposed to an air temperature of 16 °C (nictoperiod) and 20 °C (daytime). The minimum air temperature of 16 °C was adopted because cold acclimation starts at air temperatures < 15 °C (Rapacz et al., 2001; Rife and Zeinali, 2003).

The frost simulation was performed after plant exposure to the acclimation regimes (with and without cold acclimation) in growth chamber 2, while plants without frost exposure were placed in growth chamber 1 (with and without cold acclimation). Soil moisture in all pots was assessed on the day of the frost simulation. Plants were submitted to a thermal regime of frost simulation for 48 h. The mean air temperature for the first 12 h was 5 °C. It was then gradually reduced from 7.5 to -6 °C in the subsequent 12 h. After reaching a minimum value of -6 °C, the air temperature was gradually increased for 4 h, to 2 °C, followed by a slower increase for 12 h, from 2 to 9 °C. For the remaining period (8 h), the air temperature was increased from 9 to 11 °C. At the end of the frost simulation thermal regime, the plants were transferred to growth chamber 1, with the rest of the plants that had not been exposed to frost. After the frost simulation, all plants remained in the growth chamber for a further seven days in an air temperature regime of 20 °C (daytime) and 16 °C in the night period (daily mean of 18 °C) in the two experiments. Thereafter, the plants were transferred to the greenhouse until physiological maturation was achieved.

Different types of reproductive structures were labeled before the frost simulation in order to identify the effect of frost and acclimation. In experiment 1, siliques of lengths < 2 cm, 2 to 4 cm, and > 4 cm were labeled. In experiment 2, closed floral buds, open flowers, and siliques of lengths < 2 cm and 2 to 4 cm were labeled. After the frost simulation, abortion of the labeled reproductive structures was evaluated biweekly. At harvest, the total number of each type of labeled structure that was developed in the siliques, and the number of grains per silique, was counted.

One day after the frost simulation, the number of normal ovules in open flowers and closed floral buds was counted in both experiments, based on the method of Lardon and Triboi-Blondel (1994), using an electronic microscope (SMZ-10; Nikon, Tokyo, Japan). The pistils were opened transversely with a scalpel, and the number of normal ovules

counted. The number of closed floral buds and flowers ranged from 7 to 19 and 7 to 25, respectively, in the different treatments.

The number of siliques on the main stem (the trait most affected by frost), and total abortion of the reproductive structures were also recorded at harvest. The latter was quantified by counting the number of inserts with peduncle remnants on the main stem, without distinguishing between floral buds, flowers, or siliques. Subsequently, abortion of reproductive structures on the main stem was calculated as a percentage based on the number of siliques and aborted reproductive structures. In this context, it should be noted that in the grain-filling period (in the greenhouse), air temperature values of between 27 and 30 °C were confirmed. However, these air temperatures were only determined on some dates, when all plants were at the grain-filling stage and were more tolerant of raised air temperatures than during anthesis, so the impact on the experimental results would have been minimal.

The response of canola plants to treatment was also evaluated by measuring biometric variables. After physiological maturation, the plants were collected and separated into siliques and other parts, which were packed into paper bags and placed in an oven at 65 °C until a constant weight was achieved. The siliques were then threshed, and measurements made of grain dry matter and total plant dry matter using a precision scale.

3.3.4 Data analysis

An analysis of variance was performed for each experiment, based on the plant development periods (BF, FF, and GF), for the following traits: total plant dry matter, grain dry matter, number of siliques, and abortion of reproductive structures. An analysis of variance was also performed for the following structures: the number of ovules in flowers and floral buds, abortion of different types of reproductive structures, and number of grains in siliques originating from these structures. One degree of freedom was removed from the

error factor when treatments did not have the same number of replicates. Subsequently, the analysis of variance means were compared by a Tukey test at a 5 % error probability.

3.4 RESULTS AND DISCUSSION

3.4.1 Effects of cold acclimation on plant physiology

Cold acclimation is a quantitative multigenic process encompassing biochemical and structural changes that strongly affect plant physiology (Gusta et al., 2004; Levitt, 1972; Rapacz, 1999), including cell membranes, the first sites to be damaged in frost-related freezing events. Changes due to cold acclimation promote stabilization of cell membranes, due an increased proportion of unsaturated and polyunsaturated fatty acids in the lipid bilayers, resulting in greater membrane fluidity, thus ensuring the metabolic and structural functionality of cells at low air temperatures. Moreover, acclimation processes activate mechanisms that allow the full activity of enzymes associated with cell membranes during frost events (Uemura et al., 2003; Vogg et al., 1998). Acclimation also promotes the cytoplasmic accumulation of low molecular weight solutes, such as sugars and proline. Sugar accumulation increases cellular osmotic potential and consequently decreases the freezing point of cytoplasm, preventing the formation of intracellular ice crystals (Burg and Ferris, 2008; Ouellet and Charron, 2013). In addition, an increased cytoplasmic osmotic potential may reduce the rate of water displacement from the cytoplasm to intercellular spaces during frost occurrence, which causes formation of extracellular ice crystals, and prevent damage caused by cell desiccation. During frost, the presence of ice crystals in the intercellular spaces favors the transfer of water from the cell interior to exterior, due to the lower water vapor pressure on the ice surface than the liquid water vapor pressure in the cytoplasm. Solute accumulation in the cytoplasm as a result of acclimation leads to a

reduced cytoplasmic osmotic potential, which disfavors the displacement of water from the cytoplasm to extracellular spaces during frost days (Levitt, 1980; Pearce, 2001).

3.4.2 Plant mortality responses in different experimental conditions

The exposure of canola plants to frost (air temperature, $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$) at three different points in the reproductive cycle (BF, FF, and GF) resulted in the death of plants that had not previously been cold-acclimated for three consecutive days before frost. An air temperature of $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ resulted in the mortality of 67 %, 78 %, and 92 % of BF, FF, and GF plants in experiment 1, respectively, while in experiment 2, plant mortality at this air temperature was not verified, regardless of the level of plant acclimation (Table 1).

In experiment 1, canola plant mortality during the reproductive stages corroborates the results of Lardon and Triboi-Blondel (1994), who confirm mortality in non-acclimated FF plants when exposed to an air temperature lower than $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ under controlled conditions. The survival of all acclimated frost-exposed plants demonstrated that canola can increase its freezing tolerance, even when exposed to short periods (3 d) of an air temperature regime with cold acclimation potential (Table 1), not only at the beginning of the development cycle but also during flowering (Dalmago et al., 2010). In this context, Rife and Zeinali (2003) confirm that canola plants in the vegetative phase present the maximum increase in cold tolerance in the first three days of acclimation.

It was not possible to determine accurately the reason why a temperature of $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ caused mortality in non-acclimated plants in experiment 1, but not in experiment 2 (Table 1). Our hypothesis is that the plants in experiment 2 may have experienced water deficit, which possibly triggered responses similar to those for frost in cold-acclimated and non-acclimated plants (Silva et al., 2008). It is possible that differences in frost sensitivity among genotypes could have contributed to the contrasting plant mortality between the experiments. The literature also presents divergent information regarding frost sensitivity

in non-acclimated canola plants during the reproductive period. As previously mentioned, Lardon and Triboi-Blondel (1995) report that an air temperature below $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ can cause death in non-acclimated canola plants in their reproductive phase. Moreover, Rife and Zeinali (2003) have found that an air temperature of $-5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ results in canola plant mortality of 50 % at the beginning of the reproductive period, i.e., at an air temperature similar to that causing plant mortality in experiment 1 in our study. Dalmago et al. (2010) report that an air temperature of $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ did not cause mortality in non-acclimated plants during their reproductive period, similar to our results for experiment 2. Although identifying damage levels at different air temperatures was not an objective of the present study, the differences in plant mortality in experiments 1 and 2, and information reported in the literature, indicate that there must be a lethal air temperature range for non-acclimated canola plants during their reproductive phases. This lethal range would have an upper limit value close to $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, when the first plants die, and a lower limit value of below $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. However, the existence of such a lethal air temperature range does not explain the different mortality levels between experiments 1 and 2.

According to Ouellet and Charron (2013), the genes responsible for increasing cold tolerance are responsive to water stress, abscisic acid, and soil salinity. It has not been established how these different stimuli converge to induce the expression of these genes. It is possible that some of the stimuli, although not observed in the experimental control, were in fact active in experiment 2, and promoted the activation of the genes associated with cold tolerance, thus increasing protection in plants that had not been exposed to acclimation. Biochemical analysis would therefore be necessary for determining differences between acclimated and non-acclimated plants, in order to identify the acclimation level of canola plants on the day they were exposed to frost.

3.4.3 Response of dry matter content to experimental conditions

In experiment 1, frost exposure reduced the total dry matter of plants by 38 %, 49 % and 34 % in BF, FF, and GF, respectively (Table 2). In GF, frost had no significant effect on acclimated GF plants. As expected, no simple effect of acclimation was found on accumulation of total plant dry matter (Gusta et al., 2004), since the 3 d experimental period was too short to influence dry matter production in canola reproductive stages. However, acclimated canola plants presented a greater accumulation of dry matter under frost exposure (Dalmago et al., 2010), since acclimation prevented plant mortality and plants could continue their development until the end of the cycle. This response was confirmed by the accumulation of plant dry matter in experiment 2, with no plant mortality, and consequently no significant effect on the total accumulation of dry matter in plants exposed to frost (Table 2).

The effect of plant exposure to an air temperature of -6°C was far more pronounced for grain dry matter from the main stem than for the total dry matter of plants (Tables 2 and 3). The quantity of canola plant dry matter was 39 %, 73 %, and 69 % lower in BF, FF, and GF, respectively, in plants exposed to frost. In BF plants, there was no interaction between acclimation and frost for grain dry matter in experiment 1, and reduced frost damage to plants in experiment 2, since grain dry matter was 72 % higher than in plants exposed to frost. Therefore, the grain dry matter content was similar to plants that were not exposed to frost. In FF plants (experiment 1), acclimation reduced frost damage; however, these plants presented a lower grain dry matter content than plants not exposed to frost. In the GF group, frost caused a 69 % reduction in grain dry matter, and acclimation was not effective in reducing frost damage in either experiment (Table 3).

3.4.4 Effect of experimental conditions on reproductive structures

Frost was also responsible for the increased abortion of reproductive structures, at magnitudes of 43 %, 100 %, and 120 % in BF, FF, and GF, respectively, when compared with natural abortion in the plants not exposed to frost in experiment 1. In experiment 2, frost caused an increase in reproductive structure abortion of 55 % and 27 % in FF and GF, respectively. Plant acclimation had no significant effect on reducing the total abortion of reproductive structures in any of the three reproductive phases (Table 4). High variability in the natural abortion of reproductive structures (11 % to 46 %) is a characteristic of canola (Battisti et al., 2013). In our study, this variability, especially in the BF group, contributed to the fact that acclimation had no effect on reducing abortion.

The number of siliques on the main stem was directly influenced by frost-related abortion of reproductive structures, since a higher abortion rate results in fewer siliques. The only exception occurred in BF plants in experiment 2, in which acclimation and frost had no effect on abortion of reproductive structures, and the number of siliques was similar in acclimated plants exposed and those not exposed to frost (Table 5). Dalmago et al. (2010) have also verified that frost occurrence at the flowering stage caused a reduction in the number of siliques, due to the greater reproductive structure abortion rate in frost-exposed plants.

Despite the survival of acclimated plants exposed to frost (Table 1), an evaluation of cold tolerance with and without frost exposure in different reproductive structures (Tables 6, 7, and 8), such as floral buds, flowers, and siliques of different lengths, showed that acclimation reduced the abortion of siliques of length ≥ 4 cm by 73 % in experiment 1 (Table 6). In experiment 2, there was no significant difference in the abortion of closed floral buds, flowers, siliques of length < 2 cm, and siliques of 2–4 cm length, when comparing plants exposed and not exposed to frost (Tables 7 and 8).

Although acclimation reduced the abortion of siliques of length > 4 cm (experiment 1), it did not increase the cold tolerance of grains in siliques of different lengths or in the ovules in floral buds and flowers (Tables 6, 7, and 8). In experiment 1, frost caused a reduction of 51 %, 76 %, and 68 % in the number of viable flower ovules, and a reduction of 41 %, 79 %, and 78 % in the number of viable flower bud ovules, in BF, FF, and GF, respectively. In experiment 2, frost caused a 60 % reduction in the number of viable flower ovules in GF plants but had no effect on flowers of BF and FF plants (Table 9). Damaged ovules were withered and/or whitened (Lardon and Triboui-Blondel, 1994). Acclimation prevented plant death during the reproductive period (Table 1) but demonstrated a limited capacity to increase cold tolerance in plant reproductive structures. This response corroborates with the results of Fowler et al. (1999), Mahfoozi et al. (2001), and Trischuk et al. (2014), which confirm that plants without vernalizing requirements have a limited ability to increase their cold tolerance in the reproductive period.

Frost did not reduce the number of grains in siliques originating from closed floral buds and open flowers but did reduce the number of grains in siliques of all sizes by 94 % in both experiments (Tables 6 and 7). This response indicated that ovules in floral buds and flowers are less susceptible to stress-induced cold damage than silique embryos, which are very sensitive to frost damage. Moreover, frost occurrence may inhibit embryo development if humidity is over 80 %. Freezing of extracellular water causes significant cell dehydration and irreversible damage in the embryos (Johnson-Flanagan et al., 1991; Lardon and Triboui-Blondel, 1994).

Viable and frost-damaged ovules were found in the same pistil of flowers and floral buds (Lardon and Triboui-Blondel, 1994). This indicated that floral buds and flowers can develop into productive siliques, even when grain yield potential is lower than in floral buds and flowers with no frost exposure. This inference is reinforced by the number of

grains originating from frost-exposed floral buds and flowers, which generated siliques with a number of grains similar to non-exposed floral buds (Table 7). The non-aborted siliques of cold-stressed plants presented practically a null number of grains (Tables 6 and 7), and the level of frost damage to floral buds and flowers was lower than in siliques of all sizes. Grain dry matter production in frost-exposed plants was therefore probably derived from those reproductive structures in which ovule fertilization occurred after frost exposure (floral buds and flowers). Pollen grains can be damaged by cold stress but, due to canola's high pollen production, a pollen grain viability of 20 % is sufficient for ovule fertilization without compromising grain yield (Lardon and Triboui-Blondel, 1995).

3.5 CONCLUSIONS

Our results enabled us to draw the following conclusions for canola plants in their reproductive phase, in each case independently of the phenological stage. 1. Frost simulation (air temperature, -6°C) in a controlled environment causes death in non-acclimated canola plants. 2. Frost reduces the total dry matter, number of reproductive structures, grain dry matter, number of siliques per plant, number of grains per silique, and number of viable ovules of canola plants. 3. Canola plants show an ability to increase tolerance to frost damage when exposed for three days at an air temperature with acclimation potential, except for damage to ovules in the ovaries.

Additionally, we found that frost exposure causes abortion of siliques of different developmental sizes, even those over 4 cm in length. However, cold acclimation is not efficient in reducing frost-related ovule abortion in canola, irrespective of ovule developmental stage.

These insights into the responses of the canola to frost will enable a better understanding of frost damage to field crops in the environment of Southern Brazil, given

its high climatic variability during the crop reproduction cycle. Our study results also assist in identifying and quantifying frost damage, in order to establish risk levels associated with grain yield loss in canola.

3.6 ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank Capes, CNPq, Embrapa Trigo, and Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) for their support.

3.7 CONTRIBUTIONS OF AUTHORS

Conceptualization: Kovaleski, S., Heldwein, A.B., Dalmago, G.A. Data acquisition: Kovaleski, S., Heldwein, A.B., Dalmago, G.A., Gouvêa, J.A. de. Data analysis: Kovaleski, S., Heldwein, A.B., Dalmago, G.A., Gouvêa, J.A. de. Design of Methodology: Kovaleski, S., Heldwein, A.B., Dalmago, G.A., Gouvêa, J.A. de, Cunha, G.R. da. Writing and editing: Kovaleski, S., Heldwein, A.B., Dalmago, G.A., Gouvêa, J.A. de, Cunha, G.R. da.

3.8 REFERENCES

- Battisti, R.; Pilau, F.G.; Schwerz, L.; Somavilla, L.; Tomm, G.O. 2013. Dinâmica floral e abortamento de flores em híbridos de canola e mostarda castanha. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 48: 174-181.
- Burg, M.B.; Ferraris, J.D. 2008. Intracellular organic osmolytes: function and regulation. *Journal of Biological Chemistry* 283: 7309-7313.
- Dalmago, G.A.; Cunha, G.R. da; Santi, A.; Pires, J.L.F.; Müller, A.L.; Bolis, L.M. 2010. Aclimação ao frio e dano por geada em canola. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 45: 933-943.

- Fowler, D.B.; Limin, A.E.; Ritchie, J.T. 1999. Low-temperature tolerance in cereals: model and genetic interpretation. *Crop Science* 39: 626-633.
- Fujikawa, S.; Jitsuyama, Y.; Kuroda, K. 1999. Determination of the role of cold acclimation-induced diverse changes in plant cells from the viewpoint of avoidance of freezing injury. *Journal of Plant Research* 112: 237-244.
- Gusta, L.V.; Wisniewski, M.; Nesbitt, N.T.; Gusta, M.L. 2004. The effect of water, sugars, and proteins on the pattern of ice nucleation and propagation in acclimated and nonacclimated canola leaves. *Plant Physiology* 135: 1642-1653.
- Hawkins, G.P.; Deng, Z.; Kubik, T.J.; Johnson-Flanagan, A.M. 2002. Characterization of freezing tolerance and vernalization in Vern-, a spring-type *Brassica napus* line derived from a winter cross. *Planta* 216: 220-226.
- Iriarte, L.B.; Valetti, O.E. 2008. *Cultivo de Colza*. 1ed. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuária – INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Johnson-Flanagan, A.M.; Thiagarajah, M.R.; Pomeroy, M.K. 1991. The impact of freezing during maturation on storage products in canola seeds. *Physiologia Plantarum* 81: 301-308.
- Lardon, A.; Triboui-Blondel, A.M. 1994. Freezing injury to ovules, pollen and seeds in winter rape. *Journal of Experimental Botany* 45: 1177-1181.
- Lardon, A.; Triboui-Blondel, A.M. 1995. Cold and freeze stress at flowering: effects on seed yields in winter rapeseed. *Field Crops Research* 44: 95-101.
- Levitt, J. 1972. *Responses of Plants to Environmental Stresses*. Academic Press, New York, USA.
- Levitt, J. 1980. *Responses of Plants to Environmental Stresses*. 2ed. Academic Press, New York, USA.

- Mahfoozi, S.; Limin, A.E.; Fowler, D.B. 2001. Developmental regulation of low temperature tolerance in winter wheat. *Annals of Botany* 87: 751-757.
- McClinchey, S.L.; Kott, L.S. 2008. Production of mutants with high cold tolerance in spring canola (*Brassica napus*). *Euphytica* 162: 51-67.
- Ouellet, F.; Carpentier, É.; Cope, M.J.T.V.; Monroy, A.F.; Sarhan, F. 2001. Regulation of a wheat actin-depolymerizing factor during cold acclimation. *Plant Physiology* 125: 360-368.
- Ouellet, F.; Charron, J. 2013. Cold acclimation and freezing tolerance in plants. In: eLS. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK.
- Pearce, R.S. 2001. Plant freezing and damage. *Annals of Botany* 87: 417-424.
- Rapacz, M. 1999. Frost resistance and cold acclimation abilities of spring-type oilseed rape. *Plant Science* 147: 55-64.
- Rapacz, M.; Tokarz, K.; Janowiak, F. 2001. The initiation of elongation growth during long-term low-temperature stay of spring-type oilseed rape may trigger loss of frost resistance and changes in photosynthetic apparatus. *Plant Science* 161: 221-230.
- Rife, C.L.; Zeinali, H. 2003. Cold tolerance in oilseed rape over varying acclimation durations. *Crop Science* 43: 96-100.
- Silva, E.P. da; Cunha, G.R. da; Pires, J.L.F.; Dalmago, G.A.; Pasinato, A. 2008. Fatores abióticos envolvidos na tolerância de trigo à geada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 43: 1257-1265.
- Thomashow, M.F. 1999. Plant cold acclimation: freezing tolerance genes and regulatory mechanisms. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 50: 571-599.
- Trischuk, R.G.; Schilling, B.S.; Low, N.H.; Gray, G.R.; Gusta, L.V. 2014. Cold acclimation, de-acclimation and re-acclimation of spring canola, winter canola and

winter wheat: the role of carbohydrates, cold-induced stress proteins and vernalization. *Environmental and Experimental Botany* 106: 156-163.

Uemura, M.; Warren, G.; Steponkus, P.L. 2003. Freezing sensitivity in the *sfr4* mutant of *Arabidopsis* is due to low sugar content and is manifested by loss of osmotic responsiveness. *Plant Physiology* 131: 1800-1807.

Vogg, G.; Heim, R.; Hansen, J.; Schäfer, C.; Beck, E. 1998. Frost hardening and photosynthetic performance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles. I. Seasonal changes in the photosynthetic apparatus and its function. *Planta* 204: 193-200.

Wilensky, R.W.; Gusta, L.V.; Lei, B.; Abrams, S.R.; Ewan, B.E. 1994. Effects of abscisic acid (ABA) and ABA analogs on freezing tolerance, low-temperature growth, and flowering in rapeseed. *Journal of Plant Growth Regulation* 13: 235-241.

Table 1 – Plant mortality of canola with (A) and without cold acclimation (NA), and with and without frost exposure, at the beginning of flowering, during full flowering, and at the beginning of grain filling, in experiments 1 and 2. Passo Fundo, RS – 2019.

	Beginning of Flowering		Full Flowering		Beginning of Grain Filling	
	Frost	No Frost	Frost	No Frost	Frost	No Frost
-----%-----						
Experiment 1						
A	0	0	0	0	0	0
NA	67	0	78	0	92	0
Experiment 2						
A	0	0	0	0	0	0
NA	0	0	0	0	0	0

Table 2 – Total dry matter of canola plants with (A) and without cold acclimation (NA), and with and without frost exposure, at the beginning of flowering, during full flowering, and at the beginning of grain filling, in experiments 1 and 2. Passo Fundo, RS – 2019.

	Beginning of Flowering			Full Flowering			Beginning of Grain Filling		
	Frost	No Frost	Mean	Frost	No Frost	Mean	Frost	No Frost	Mean
-----g plant ⁻¹ -----									
Experiment 1									
A	12.2	14.2	12.6 a	9.4	16.2	11.9 a	10.9 Aa	12.2 Aa	11.2
NA	8.1	19.5	10.5 a	6.5	14.1	8.9 b	6.5 Bb	12.7 Aa	7.5
Mean	10.4 B	16.8 A		7.8 B	15.2 A		8.2	12.5	
Experiment 2									
A	8.6	9.6	9.0 a	11.4	16.4	13.4 a	10.3	11.2	10.8 a
NA	9.2	12.2	10.7 a	11.5	14.2	12.9 a	8.9	12.6	10.8 a
Mean	8.8 A	10.8 A		11.5 A	15.3 A		9.5 A	11.9 A	

¹Means followed by the same letters (uppercase in rows and lowercase in columns) indicate no difference for each treatment according to a Tukey test (5 % error probability).

Table 3 – Grain dry matter of canola plants with (A) and without cold acclimation (NA), and with and without frost exposure, at the beginning of flowering, during full flowering, and at the beginning of grain filling, in experiments 1 and 2. Passo Fundo, RS – 2019.

	Beginning of Flowering			Full Flowering			Beginning of Grain Filling		
	Frost	No Frost	Mean	Frost	No Frost	Mean	Frost	No Frost	Mean
-----g plant ⁻¹ -----									
Experiment 1									
A	1.16	2.03	1.32 a	0.33 Ba	1.51 Ab	0.66	0.36	1.49	0.66 a
NA	0.16	1.19	0.38 b	0.03 Bb	1.88 Aa	0.18	0.0	1.35	0.34 b
Mean	0.71 B	1.61 A		0.06	1.69		0.17 B	1.42 A	
Experiment 2									
A	1.69 Aa	1.40 Aa	1.59	1.32	2.38	1.74 a	0.96	1.69	1.40 a
NA	0.98 Ba	2.33 Aa	1.65	0.87	2.19	1.53 a	0.74	1.65	1.20 a
Mean	1.44	1.86		1.14 B	2.28 A		0.83 B	1.67 A	

¹Means followed by the same letters (uppercase in rows and lowercase in columns) indicate no difference for each treatment according to a Tukey test (5 % error probability).

Table 4 – Total abortion of reproductive structures in canola plants with (A) and without cold acclimation (NA), and with and without frost exposure, at the beginning of flowering, during full flowering, and at the beginning of grain filling, in experiments 1 and 2. Passo Fundo, RS – 2019.

	Beginning of Flowering			Full Flowering			Beginning of Grain Filling		
	Frost	No Frost	Mean	Frost	No Frost	Mean	Frost	No Frost	Mean
-----%-----									
Experiment 1									
A	52.8	35.3	49.6 b	79.1 Ab	48.3 Ba	67.9	89.4 Ab	42.6 Ba	76.9
NA	92.9	63.6	86.8 a	97.3 Aa	39.8 Bb	79.6	99.1 Aa	43.2 Ba	85.1
Mean	71.0 A	49.5 B		89.3	44.1		94.4	42.9	
Experiment 2									
A	35.7 Aa	50.8 Aa	41.2	49.4	35.4	43.8 a	52.1	42.6	46.4 b
NA	49.7 Aa	27.3 Aa	38.5	55.5	31.3	43.4 a	60.1	46.7	53.4 a
Mean	40.8	39.1		51.8 A	33.4 B		56.9 A	44.7 B	

¹Means followed by the same letters (uppercase in rows and lowercase in columns) indicate no difference for each treatment according to a Tukey test (5 % error probability).

Table 5 – Number of siliques in canola plants with (A) and without cold acclimation (NA), and with and without frost exposure, at the beginning of flowering, during full flowering, and at the beginning of grain filling, in experiments 1 and 2. Passo Fundo, RS – 2019.

	Beginning of Flowering			Full Flowering			Beginning of Grain Filling		
	Frost	No Frost	Mean	Frost	No Frost	Mean	Frost	No Frost	Mean
-----siliques plant ⁻¹ -----									
Experiment 1									
A	32.3	50.4	35.3 a	12.8 B	35.2 A	21.0	7.4	37.2	15.3 a
NA	0.8	23.4	2.9 b	2.0 B	47.7 A	16.0	0.5	34.0	8.9 b
Mean	12.2 B	35.7A		6.7	41.5		3.8 B	35.6 A	
Experiment 2									
A	49.4 Aa	38.8 Ab	45.5	40.5	53.2	45.6 a	34.3	40.7	38.1 a
NA	39.0 Ba	69.5 Aa	54.2	32.2	62.2	47.2 a	27.2	42.6	34.9 a
Mean	45.6	54.1		37.2 B	57.7 A		30.1 B	41.7 A	

¹Means followed by the same letters (uppercase in rows and lowercase in columns) indicate no difference for each treatment according to a Tukey test (5 % error probability).

Table 6 – Abortion of reproductive structures and number of grains per silique originating from the reproductive structures in canola plants with (A) and without cold acclimation (NA), and with and without frost exposure in experiment 1. Passo Fundo, RS – 2019.

	Siliques < 2 cm			Siliques 2–4 cm			Siliques > 4 cm		
	Frost	No Frost	Mean	Frost	No Frost	Mean	Frost	No Frost	Mean
Abortion (%)									
A	63.8	27.5	53.1 b	58.8	10.0	42.6 b	25.0 Ab	0.0 Aa	13.9
NA	100.0	50.0	84.4 a	91.4	0.0	67.0 a	92.5 Aa	8.3 Ba	68.5
Mean	81.1 A	38.8 B		75.9 A	5.6 B		70.0	4.2	
Number of grains per silique									
A	0.4 Ba	7.4 Aa	2.4	0.00	10.1	3.4 a	0.0	14.6	6.5 a
NA	0.00 Bb	4.1 Ab	1.3	0.1	8.2	2.2 a	0.0	14.1	4.0 b
Mean	0.2	5.8		0.1 B	9.3 A		0.0 B	14.3 A	

¹Means followed by the same letters (uppercase in rows and lowercase in columns) indicate no difference for each treatment according to a Tukey test (5 % error probability).

Table 7 – Abortion of reproductive structures (buds and flowers) and number of grains per silique originating from the reproductive structures in canola plants with (A) and without cold acclimation (NA), and with and without frost exposure in experiment 2. Passo Fundo, RS – 2019.

	Buds			Flowers		
	Frost	No Frost	Mean	Frost	No Frost	Mean
Abortion (%)						
A	6.4	5.0	5.8 a	8.3	2.8	6.4 a
NA	21.6	4.6	13.0 a	12.4	4.8	9.4 a
Mean	12.7 A	4.8 A		10.6 A	4.0 A	
Number of grains per silique						
A	5.3	6.4	5.8 a	9.9	14.7	14.6 a
NA	7.7	7.9	7.8 a	9.2	6.3	8.0 a
Mean	6.5 A	7.2 A		9.5 A	9.8 A	

¹Means followed by the same letters (uppercase in rows and lowercase in columns) indicate no difference for each treatment according to a Tukey test (5 % error probability).

Table 8 – Abortion of reproductive structures (siliques) and number of grains per silique originating from these structures in canola plants with (A) and without cold acclimation (NA), and with and without frost exposure in experiment 2. Passo Fundo, RS – 2019.

	Siliques < 2 cm			Siliques 2–4 cm		
	Frost	No Frost	Mean	Frost	No Frost	Mean
Abortion (%)						
A	18.0	12.8	15.1 a	0.0	0.0	0.0 a
NA	12.4	7.9	10.1 a	0.0	5.8	3.6 a
Mean	10.2 A	14.8 A		0.0 A	2.7 A	
Number of grains per silique						
A	1.3	6.8	4.4 a	1.7 Ba	21.6 Aa	13.6
NA	0.7	5.4	3.1 a	2.2 Ba	13.2 Ab	9.0
Mean	0.9 B	6.1 A		1.9	17.6	

¹Means followed by the same letters (uppercase in rows and lowercase in columns) indicate no difference for each treatment according to a Tukey test (5 % error probability).

Table 9 – Number of viable ovules in closed and open flowers in canola plants with (A) and without cold acclimation (NA), and with and without frost exposure, at the beginning of flowering, during full flowering, and at the beginning of grain filling, in experiments 1 and 2. Passo Fundo, RS – 2019.

	Beginning of Flowering			Full Flowering			Beginning of Grain Filling		
	Frost	No Frost	Mean	Frost	No Frost	Mean	Frost	No Frost	Mean
-----ovules flower ⁻¹ -----									
Experiment 1 – Floral buds									
A	18.1	27.6	22.4 a	8.4 Ba	26.6 Aa	19.6	2.4 Ba	28.8 Aa	20.4
NA	15.0	29.1	22.4 a	3.6 Bb	27.5 Aa	17.2	8.47 Ba	26.6 Aa	19.7
Mean	16.8 B	28.3 A		5.7	27.1		6.2	27.7	
Experiment 1 - Flowers									
A	16.7	29.4	23.0 a	14.0	28.8	23.0 a	9.6	28.7	20.0 a
NA	11.9	28.5	20.2 a	6.1	28.0	18.6 b	8.1	26.5	17.3 a
Mean	14.3 B	28.9 A		9.6 B	28.4 A		8.8 B	27.6 A	
Experiment 2 - Flowers									
A	26.5	29.1	27.6 a	6.7	6.3	6.5 b	7.1	17.4	12.3 a
NA	13.1	19.6	16.7 b	15.3	11.2	13.2 a	1.9	4.8	3.4 b
Mean	22.2 A	24.8 A		10.1 A	8.7 A		4.5 B	11.1 A	

¹Means followed by the same letters (uppercase in rows and lowercase in columns) indicate no difference for each treatment according to a Tukey test (5 % error probability).

4 ARTIGO 2 - VARIAÇÃO E ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DO AR E DAS ESTRUTURAS REPRODUTIVAS DURANTE O PERÍODO REPRODUTIVO DA CANOLA EM NOITES COM GEADA

4.1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi caracterizar a temperatura do ar (Tar) no dossel da canola e das estruturas reprodutivas (Ter) em diferentes intensidades de frio, desenvolver e testar modelos para a estimativa da temperatura mínima do ar (Tn) e das estruturas reprodutivas (Tner) para essas condições. Foram realizados dois experimentos à campo, em Coxilha - RS, nos anos de 2016 e 2017. Originalmente, os experimentos foram conduzidos em delineamento experimental em blocos ao acaso, com parcela subdividida e arranjo fatorial. As avaliações foram realizadas em unidades experimentais durante o período reprodutivo da canola. A Tar foi medida no dossel a 5, 40, 100 e 150 cm do solo. A Ter foi medida em botões florais, flores e siliquis. Os modelos para estimativa da Tn próximo às estruturas reprodutivas da canola (TnE) e da Tner foram gerados por meio de regressão linear simples, considerando a Tn em estação meteorológica em Passo Fundo (Aut1), estação meteorológica a 300 metros do experimento (Aut) e na referência medida no experimento (R), como variáveis independentes e a TnE e Tner como variáveis dependentes. Os dados coletados em 2016 foram usados para geração e de 2017 para a validação dos modelos. A menor Tn no dossel ocorreu no nível de maior troca energética entre dossel e atmosfera, que se localizava no topo do dossel. O gradiente térmico médio entre a menor e maior Tn no dossel foi de 1,64, 0,91, 1,22 e 0,75°C em geadas fortes, moderadas, fracas e dias frios, respectivamente. No início do florescimento (IF), floração plena (FP) e enchimento de grãos (EG) o gradiente médio entre a menor e maior Tn no dossel foi de 1,47, 1,28 e 1,20°C, respectivamente, sendo que a menor Tn foi registrada a 40 cm do solo em IF e FP e a 100 cm do solo em EG. A menor TarE do que Ter indica que as folhas, abaixo das estruturas reprodutivas, foram os órgãos com maior superfície exposta ao resfriamento. O modelo $Tner = 1,21(Tn \text{ Aut1}) - 2,77$, para Tn durante todo o período reprodutivo da canola, e o modelo $Tner = 1,09(Tn \text{ Aut}) - 3,06$, apenas para dias com Tn menor que 5°C, foram aqueles que melhor descreveram a evolução da Tner e apresentaram os coeficientes a e b não diferentes de 0 e 1, respectivamente, ou seja, na validação atenderam o critério estatístico da dispersão dos pontos em torno da linha 1:1. Os mesmos também tiveram os valores mais baixos de d, BIAS, EAM, e tiveram o MSE_s menor do que o MSE_a. A Tar e a Ter podem ser estimadas a partir de dados obtidos em estações meteorológicas convencionais e/ou automáticas ou ainda, a partir da medição da mesma em posição de referência dentro da lavoura.

Palavras-chave: Microclima no dossel, modelagem da temperatura do ar, intensidade de geadas.

4.2 ABSTRACT

The objective of this study was to characterize air temperature (Tar) in the canopy of canola and reproductive structures (Ter) at different cold intensities, to develop and test models for estimating the minimum air temperature (Tn) and minimum temperature of reproductive structures (Tner) for these conditions. Two field experiments were carried out in 2016 and 2017. Originally, the experiments were conducted in a randomized complete block design,

with subdivided plot and factorial arrangement. Evaluations were performed in experimental units during the reproductive period of canola. Tar was measured in the canopy at 5, 40, 100 and 150 cm from the soil. Ter was measured in flower buds, flowers and siliques. The models for estimation of Tn close to reproductive structures (TnE) and Tner were generated by simple linear regression. Tn in meteorological station in Passo Fundo (Aut1), meteorological station located 300 meters of the experiment (Aut) and in the reference measured in the experiment (R), were considered independent variables, TnE and Tner were considered dependent variables. The data collected in 2016 were used for generation and 2017 for the validation of the models. The lowest Tn in the canopy occurred at the level with highest energy exchange between canopy and atmosphere, which was located at the top of the canopy. The mean gradient between the lowest and highest Tn in the canopy is 1.64, 0.91, 1.22 and 0.75°C in severe frosts, moderate frosts, light frosts and cold days, respectively. At the beginning of flowering (IF), full flowering (FP) and grain filling (EG), the mean gradient between the lowest and the highest Tn in the canopy was 1.47, 1.28 and 1.20 °C, respectively. The lowest Tn occurred at 40 cm from the soil in IF and FP and at 100 cm from the soil in EG. The lower TarE than Ter indicates that the leaves below the reproductive structures were the organs with the highest surface exposed to cooling in the FP. The model $Tner = 1.21 (Tn \text{ Aut1}) - 2.77$, for Tn during the reproductive period of the canola and model $Tner = 1.09 (Tn \text{ Aut}) - 3.06$, only for days with Tn less than 5°C, were those that better described the evolution of Tner and presented the coefficients a and b not different from 0 and 1, respectively. They also had the lowest values of d, BIAS, MAE, and had the MSE_s lower than the MSE_a. Tar and Ter can be estimated from data obtained in conventional and/or automatic meteorological stations or from the measurement in reference position within the crop.

Keywords: Microclimate in the canopy, air temperature modeling, frosts intensity.

4.3 INTRODUÇÃO

A temperatura mínima do ar é uma das principais variáveis climatológicas a influenciar o crescimento e desenvolvimento das plantas (TABONY, 1985; REPO et al., 2008; OUELLET; CHARON, 2013), sendo essa influência negativa quando os valores atingem temperaturas críticas para as culturas agrícolas e provocam danos as mesmas. No sul do continente americano, região com potencial de cultivo da canola, a ocorrência de valores de temperatura do ar mínimos críticos para a canola relacionam-se, principalmente, à ocorrência de geadas de radiação (AGUIAR; MENDONÇA, 2004). Segundo Sentelhas e Angelocci (2012), geadas de radiação são caracterizadas por ocorrerem em noites de céu sem nebulosidade, sem vento, com baixa concentração de vapor d'água no ar e sob domínio de massa de ar polar, associado à perda de radiação terrestre. Nestas condições, a advecção de calor latente e sensível é insignificante em grande escala, prevalecendo a transferência no sentido vertical (SNYDER; MELO-ABREU, 2010). Heldwein (1993) afirma que noites com estas características favorecem o desenvolvimento de inversão térmica próximo à

superfície, especialmente quando a temperatura da relva é menor do que a temperatura do ar, o que contribui para a formação de cristais de gelo em superfícies que estejam expostas à perda de energia por radiação.

Segundo Rosenberg (1974), em noites com ocorrência de geada, em culturas agrícolas de pequeno porte, o maior resfriamento do ar ocorre no topo do dossel, uma vez que este nível é exposto à perda energética, o que provoca o resfriamento da superfície e conseqüentemente do ar adjacente. Portanto, em noites com resfriamento radiativo, a temperatura do ar no topo do dossel é menor do que se comparado com níveis inferiores do dossel e acima do mesmo. Nesse sentido, corroborando com Rosenberg (1974), Baldocchi et al. (1983) para a cultura da soja, Jacobs et al. (1996) para a cultura do milho, Tazzo et al. (2008) para a cultura da batata, Winkel et al. (2009) para a cultura da quinoa e Loose et al. (2011) para a cultura do girassol, verificaram que os menores valores de temperatura do ar, no período noturno, ocorreram próximo ao topo do dossel de plantas. Portanto, está bem estabelecido que em noites com ocorrência de geadas o topo do dossel, em culturas agrícolas, é o nível em que ocorrem os menores valores de temperatura do ar.

A canola apresenta suas estruturas reprodutivas (botões florais, flores e siliquis) posicionadas predominantemente no topo do dossel. Conseqüentemente, em noites com ocorrência de geada, as estruturas reprodutivas são expostas ao máximo resfriamento possível, devido a alta perda radiativa. No entanto, a caracterização e quantificação do resfriamento do ar no dossel da canola em noites com geada ainda não foi realizada para as condições ambientais da região sul do Brasil. Diferentemente das regiões tradicionais no cultivo da canola, tais como o Canadá e a União Europeia, onde o inverno é mais rigoroso, mas apresenta menor variabilidade térmica, a ocorrência de geadas na região sul do Brasil tem como características, elevada irregularidade cronológica, grande variabilidade espacial e imprecisão na previsibilidade (SILVA et al., 2008). Assim, em função dessas diferenças, torna-se necessário e importante a caracterização e a quantificação do efeito de geadas em canola, que representa as regiões tradicionais de cultivo para a região sul do Brasil e grande parte do sul do continente americano (SILVA; MINUZZI, 2016).

Os primeiros estudos que avaliaram a interferência da geada na canola na região sul do Brasil foram realizados por Dalmago et al. (2010) e Kovaleski (2015). Nestes trabalhos, os autores avaliaram aspectos agrônômicos associados à geada e relacionados especialmente ao crescimento e desenvolvimento inicial das plantas. A variação de elementos microclimáticos no dossel de canola, em noites com ocorrência de geada e sua relação com variáveis externas à cultura não foram caracterizados e tão pouco

detalhadamente quantificados. Estas avaliações são importantes para ampliar a compreensão do efeito de geadas em plantas de canola, principalmente durante o período reprodutivo da cultura para auxiliar na quantificação dos danos causados à cultura.

A avaliação de elementos microclimáticos no dossel de culturas agrícolas foi o foco de vários estudos nas últimas seis décadas, tais como Brown e Covey (1966), Gillespie e King (1971), Jacobs et al. (1994) e Jacobs et al. (1996) para o milho; Penman e Long (1960); Legg (1975); Legg e Long (1975) para o trigo; Jonhson et al. (1976) para a cevada; Baldocchi et al. (1983) para a soja; Saugier (1970), e Loose et al. (2011) para o girassol, Winkel et al. (2009) para a quinoa e Tazzo et al (2008) para a batata. Apesar da importância da canola no cenário agrônômico, não foram encontrados trabalhos na literatura avaliando elementos meteorológicos e micrometeorológicos em dossel de plantas, principalmente em noites com ocorrência de geada de radiação. Esta resposta é fundamental para o ajuste de funções de estimativa de danos causados pela geada no período reprodutivo da canola.

A caracterização da temperatura do ar no dossel de canola, especialmente próximo às estruturas reprodutivas, em noites com ocorrência de geada, é fundamental para a avaliação e/ou determinação de valores críticos de temperatura mínima do ar para a cultura à campo. Essa caracterização pode auxiliar a determinação da relação destes valores críticos com outras variáveis ambientais e micrometeorológicas, e também com variáveis biométricas relacionadas ao dossel. Estabelecidas essas relações, as mesmas podem respaldar o desenvolvimento de parâmetros numéricos para estimativa da temperatura do ar no dossel da canola, principalmente próximo as estruturas reprodutivas, com o objetivo de estimar danos causados pela baixa temperatura do ar em noites com geada.

O desenvolvimento de modelos para estimativa da temperatura mínima do ar, em função de elementos meteorológicos, foi realizado por Rahn e Brown (1971), que geraram modelo para estimar a temperatura mínima do ar no dossel do milho, em função da temperatura no abrigo meteorológico, com erro máximo de 0,56°C. Nesta mesma linha, Agendes (1985) e Heldwein et al (1988) verificaram elevada relação entre a temperatura do ar próximo à superfície do solo e a temperatura do ar no abrigo meteorológico, possibilitando o ajuste de função de regressão para estimar a temperatura mínima do ar a 5 cm do solo (HELDWEIN et al., 1988). Baseado no saldo de radiação e na temperatura do ar na estação meteorológica, Heldwein e Krzysch (1999) desenvolveram modelo para estimativa da temperatura do ar no topo do dossel da cultura da batata. A temperatura mínima do ar no dossel pode ser estimada também a partir do saldo de radiação no início do período noturno que antecede a ocorrência da geada, conforme demonstraram Lhomme

e Guillioni (2004) para a cultura de ervilha. Essa mesma abordagem foi adotada por Cellier (1984) para desenvolver modelo para previsão da evolução da temperatura do ar em noites com ocorrência de geada de radiação, em função da velocidade do vento (2 m de altura), temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e temperatura do solo a 10 cm de profundidade ao pôr do sol na estação meteorológica. Também, Silva e Minuzzi (2016) desenvolveram modelos para previsão de ocorrência de temperatura mínima do ar menor do que 4°C em função da temperatura do ar a meia noite (00 horas), com acerto na faixa de 64 a 89%. Esses resultados demonstram que é possível estimar a temperatura próxima às estruturas reprodutivas da canola, em noites de ocorrência de geada.

Assim, este trabalho teve como objetivo principal caracterizar a evolução do perfil vertical da temperatura mínima do ar e das estruturas reprodutivas, em diferentes condições de intensidade de frio em noite de geada, e como objetivo secundário desenvolver e testar modelos para a estimativa da temperatura mínima do ar para essas condições.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Caracterização geral

As avaliações foram realizadas em dois experimentos à campo na área experimental da Embrapa Trigo, localizada em Coxilha, RS (28°10'S, 52°19'W e 686 m de altitude), originalmente elaborados para avaliar respostas de diferentes genótipos de canola em função de épocas de semeadura. O primeiro foi realizado em 2016 e o segundo em 2017. Em 2016 foram utilizadas seis datas de semeadura: 07/04/2016, 15/04/2016, 02/05/2016, 18/05/2016, 03/06/2016 e 15/06/2016, enquanto em 2017 foram quatro datas de semeadura: 08/04/2017, 02/05/2017, 22/05/2017 e 16/06/2017. Em ambos anos os genótipos de canola utilizados foram: Alht M6, Hyola 61 e Diamond. O período experimental em 2016 foi de 07/04/2016 a 24/11/2016 e em 2017 foi de 08/04/2017 a 17/11/2017.

Os experimentos foram conduzidos no delineamento experimental em blocos ao acaso, com parcela subdividida, com quatro repetições e em esquema fatorial, sendo os fatores: datas de semeadura e genótipo. Assim, em 2016 o esquema fatorial foi 6 x 3, totalizando 72 unidades experimentais e em 2017 foi 4 x 3, totalizando 48 unidades experimentais. A realização deste estudo em experimentos com o objetivo de avaliar respostas de diferentes genótipos de canola, de ciclo diferentes (CARRAFA et al, 2017), em função de épocas de semeadura, dentro do período do zoneamento agroclimático da

cultura (DALMAGO et al., 2008), visou garantir a ocorrência de distintos estádios de desenvolvimento reprodutivo da canola no período de maior probabilidade de ocorrência de geada na região de Passo Fundo, RS (Apêndice A). A adoção dessa estratégia foi necessária porque a ocorrência de geadas na região sul do Brasil tem como características elevada irregularidade cronológica, grande variabilidade espacial e imprecisão na previsibilidade (SILVA et al., 2008).

O solo na área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Húmico, pertencendo à unidade de mapeamento Passo Fundo (STRECK et al., 2008). O clima da região de Passo Fundo é do tipo Cfa, ou seja, subtropical úmido com verões quentes e sem estação seca definida, pela classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013). De acordo com a normal climatológica de 1961-1990 de Passo Fundo, RS, a precipitação pluvial anual média é de 1.788 mm. Os meses de dezembro e junho apresentam a maior e menor densidade de fluxo de radiação solar global com $22,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $9,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, respectivamente. Os meses de junho, julho e agosto apresentam temperaturas mínimas do ar menores que 10°C , portanto são os meses com maior probabilidade de ocorrência de geadas (ALVARES et al., 2013).

4.4.2 Implantação do experimento e tratos culturais

Previamente à semeadura da canola foi realizada coleta de solo para análise química nos dois experimentos. Os pontos de amostragem foram definidos aleatoriamente através de caminhamento na área. A coleta foi realizada para as camadas, 0-10 e 10-20 cm de profundidade.

Para a definição da correção da acidez, fertilização de base e de cobertura utilizou-se como critérios a interpretação da análise química de solo da camada de 0-10 cm e as necessidades da cultura (TOMM et al., 2009). Não foi necessária correção da acidez. Para a adubação de base foram utilizados 250 kg ha^{-1} de fertilizante NPK (formulação 0-25-25), 100 kg ha^{-1} de sulfato de amônio (20% de nitrogênio e 24% de enxofre) e 30 kg ha^{-1} de multiboro (17% de boro). A adubação de cobertura foi dividida em duas aplicações, a primeira foi de 100 kg ha^{-1} de sulfato de amônia (20% de nitrogênio e 24% de enxofre) no estádio B4 da canola e a segunda com 100 kg ha^{-1} de ureia (46% de nitrogênio) no estádio D1.

A semeadura foi realizada com semeadora protótipo, desenvolvida pela Embrapa Trigo, especificamente para a cultura da canola. A mesma foi realizada posteriormente à

distribuição do fertilizante de base, com espaçamento entrelinhas de 0,34 m. A distribuição de sementes foi realizada a fim de obter a densidade de 40 plantas por m², com posterior raleio.

4.4.3 Avaliações biométricas

4.4.3.1 Avaliações fenológicas

As avaliações fenológicas foram realizadas nos dois experimentos, durante todo o ciclo da canola, pela observação da data em que houve a mudança de estágio fenológico. Foi seguida a escala fenológica e os critérios estabelecidos pelo CETIOM (Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux et du Chanvre) (Apêndice B). As avaliações fenológicas foram realizadas duas a três vezes por semana, considerando como mudança de estágio fenológico da unidade experimental a data em que se encontravam 50 % das plantas.

4.4.3.2 Altura do dossel

A altura do dossel foi determinada durante todo o experimento, por meio de régua graduada. As avaliações foram quinzenalmente, sendo realizadas três medições de altura de dossel em cada unidade experimental.

4.4.3.3 Massa de matéria seca de plantas

A avaliação de matéria seca de plantas foi realizada nos dois experimentos, em todas as datas de semeadura e genótipos. Em 2016 a mesma foi determinada aos 40, 60, 80, 100 dias após a emergência (DAE) e na colheita da canola, enquanto no ano de 2017 a determinação ocorreu no início do florescimento e na colheita da canola. Em cada uma das avaliações foram coletadas aleatoriamente três plantas por unidade experimental. As plantas coletadas tiveram suas partes separadas em colmo, folhas, ramos secundários, flores e siliquis. Em seguida, estas partes foram acondicionadas em embalagens de papel e colocadas para secar em estufa a 65°C, até atingir massa constante.

4.4.3.4 Índice de área foliar

A determinação da área foliar da canola foi realizada na segunda, terceira e quarta data de semeadura no experimento de 2016, nos genótipos Alht M6, Hyola 61 e Diamond. A área foliar foi determinada com planímetro eletrônico ótico LICOR, modelo LI-3100. Para isso, foram coletadas, aleatoriamente, quatro plantas por unidade experimental aos 60, 80 e 100 DAE de cada um dos genótipos.

Com os dados de área foliar e a massa da matéria seca das folhas (g), gerou-se uma equação para estimativa da área foliar das plantas das unidades experimentais em que não foi realizada medição direta da área foliar. Assim, a área foliar das plantas da primeira, quinta e sexta data de semeadura do experimento de 2016 e as plantas da primeira, segunda, terceira e quarta data de semeadura do experimento de 2017 tiveram a área foliar estimada pela equação: Área foliar (cm²) = 148,39 * (matéria seca de folhas) + 192,57. A mesma apresentou os coeficientes linear e angular significativos, com intervalo de confiança para o coeficiente linear de 143,9 e 241,1 e para o coeficiente angular de 139,5 e 157,3.

O índice de área foliar (IAF) de cada unidade experimental foi calculado em função da área foliar média das plantas e a densidade de plantas de cada uma das unidades experimentais.

4.4.4 Temperatura do ar de referência e estações meteorológicas

A Tar de referência (R) foi medida a 1,5 m de altura do solo, com sensor termopar de cobre-constantan (Tipo T) com 0,5 mm de diâmetro, instalado em miniabrigo de alumínio de coloração branca. O sensor foi posicionado no centro dos experimentos, em área de bordadura entre as parcelas. As leituras de R foram realizadas durante todo o ciclo, nos dois experimentos. Em 2016 o período de medição foi de 15/04 a 24/11 e em 2017 foi de 15/04 a 20/11. As leituras de Tar foram realizadas a cada 30 segundos e a média foi armazenada a cada 5 minutos em datalogger (marca Campbell, modelo CR 1000). A temperatura mínima do ar foi armazenada diariamente.

A Tar na estação meteorológica automática (Aut) foi medida com sensor capacitivo, modelo HC2S3, instalado a 1,5 m de altura do solo em superfície recoberta com grama, a aproximadamente 300 m do local do experimento. A Tar na estação meteorológica automática em Passo Fundo (Aut1) foi medida com sensor capacitivo, modelo HC2S3, instalado a 1,5 m de altura do solo, com superfície recoberta com grama. As leituras de Tar

foram realizadas a cada 30 segundos, e a média armazenada a cada 15 minutos em datalogger (marca Campbell, modelo CR 1000). A temperatura mínima do ar foi armazenada diariamente.

4.4.5 Temperatura do ar no dossel da canola

A medição da Tar no dossel da canola em 2016 foi realizada em uma repetição da segunda data de semeadura, entre 07/07/2016 a 18/08/2016 na cultivar Diamond (estádio fenológico F1 a FF) e entre 16/07/2016 e 06/10/2016 na cultivar Alht M6 (estádio fenológico D2 a FF). Na terceira data de semeadura, a medição ocorreu de 21/08/2016 a 14/09/2016 na cultivar Diamond (estádio fenológico G3 a FF) e de 07/07/2016 a 30/10/2016 na cultivar Alht M6 (estádio fenológico C2 a G5), em uma repetição de cada cultivar.

Em 2017 as avaliações de Tar no dossel foram realizadas somente na cultivar Diamond nas três primeiras datas de semeadura, uma vez que não foram encontradas diferenças significativas no perfil vertical de T_n entre as cultivares Diamond e Alht M6 no ano de 2016 (Apêndice H). Na primeira data a medição foi realizada em duas repetições, no período de 08/05/2017 a 28/08/2017 (estádio fenológico B5 a FF); na segunda data foi realizada em três repetições entre 08/05/2017 e 09/10/2017 (estádio fenológico B1 a FF); e na terceira data foi medida em duas repetições no período de 02/08/2017 a 16/10/2017 (estádio fenológico E a FF).

A Tar no dossel foi medida com sensores termopares de cobre-constantan (Tipo T), com 0,5 mm de diâmetro, instalados em miniabrigos de alumínio de coloração branca. Os sensores foram presos em uma torre, nos níveis de 5, 40, 100 e 150 cm acima do solo, posicionada no centro da unidade experimental. As leituras de Tar foram realizadas a cada 30 segundos, e a média armazenada a cada 5 minutos em datalogger (marca Campbell, modelo CR 1000). A temperatura mínima do ar foi armazenada diariamente.

4.4.6 Perfil de temperatura mínima do ar no dossel

Para caracterização do perfil vertical de temperatura mínima do ar (T_n) no dossel foram utilizados os dados de datas em que a T_n em R foi menor do que 5,00°C, no período reprodutivo da canola. Considerou-se como início do período reprodutivo da canola o

estádio fenológico D1 (Apêndice B), caracterizado pelo surgimento da inflorescência no ramo principal, até a maturação fisiológica das plantas.

Em função da Tn em R, instalada nos experimentos, foi realizada a classificação da intensidade de frio alcançada em cada data. A classificação adotada separou as datas em dias com geadas de intensidade forte (GT) (Tn menor que $-2,00^{\circ}\text{C}$), geadas moderadas (GM) (Tn entre $-1,99$ e $0,00^{\circ}\text{C}$), geadas fracas (GF) (Tn entre $0,01$ a $2,00^{\circ}\text{C}$) e dias frios (DF) (Tn maior que $2,01$ e menor que $5,00^{\circ}\text{C}$).

Os dados de Tn no dossel foram agrupados de acordo com a classificação de intensidade de frio realizada em função da Tn em R. Para cada uma das quatro intensidades de frio (GT, GM, GF e DF) foi gerado um perfil vertical de Tn média para os níveis de 5, 40, 100 e 150, considerando os dados de todo o período reprodutivo. Além disso foram gerados perfis de Tn média para as diferentes intensidades de frio que ocorreram no início do período reprodutivo (IF), na floração plena (FP) e no enchimento de grãos (EG) da canola. Considerou-se início do florescimento da canola quando as plantas estavam em estágio fenológico D1, D2, E e F1 (IF), em florescimento pleno quando as plantas estavam em F2 e G1 (FP) e enchimento de grãos quando as plantas estavam em G3, FF e G5 (EG). Para comparar as diferentes intensidades de frio, calculou-se o intervalo de confiança do perfil vertical de Tn média, utilizando nível de confiança de 95%. A sobreposição dos intervalos de confiança dos perfis significa que não existe diferença entre os mesmos.

4.4.7 Temperatura das estruturas reprodutivas

A temperatura das estruturas reprodutivas (Ter) e da temperatura mínima das estruturas reprodutivas (Tner) foi medida em botões florais, flores e siliquis de diferentes tamanhos. A determinação da mesma foi realizada com termopares de cobre-constantan (Tipo T), que foram instalados internamente nas estruturas reprodutivas. A Ter foi medida em dias com geada e até sete dias posteriormente à ocorrência de geada, totalizando assim 34 datas com avaliações.

Em função de que no período reprodutivo da canola existem diferentes tipos de estruturas reprodutivas, ocorrendo ao mesmo tempo, num mesmo estágio fenológico (botões florais, flores e siliquis), o perfil vertical de Tn foi caracterizado também para o IF, FP e EG da canola, períodos que se distinguem entre si por apresentarem a predominância de estruturas reprodutivas em diferentes estádios de desenvolvimento.

A Ter (botões florais, flores e siliquas) foi medida em 11 GT (08/06/2016, 09/06/2016, 10/06/2016, 11/06/2016, 12/06/2016, 13/06/2016, 18/07/2016, 21/07/2016, 22/08/2016, 18/07/2017 e 19/07/2017), 2 GM (20/07/2016 e 23/08/2016), 4 GF (14/06/2016, 19/07/2016, 22/07/2016, e 20/07/2017), 5 DF (15/06/2016, 23/07/2016, 24/08/2016, 20/06/2017 e 22/07/2017) e em 12 dias normais (DN) (16/06/2016, 17/06/2016, 25/07/2016, 26/07/2016, 25/08/2018, 26/08/2016, 21/06/2017, 22/06/2017, 23/06/2017, 24/06/2017, 25/06/2017, 23/07/2017).

O sensor capacitivo foi utilizado em 2016 para medir a temperatura do ar próximo às estruturas reprodutivas da canola (TarE) e da temperatura mínima do ar próximo às estruturas reprodutivas (TnE), sendo deslocado de acordo com o crescimento das plantas. Além disso, nos experimentos de 2016 e 2017 a Tar no dossel medida a 100 foi utilizada para avaliar a TarE e TnE.

A caracterização da Ter foi realizada para o período de 15h do dia anterior até as 07h do dia de ocorrência da Tn para cada condição de geada. A Ter de cada horário corresponde ao valor médio dos três tipos de estruturas reprodutivas avaliadas (botões florais, flores e siliquas).

A caracterização da Ter foi realizada adotando-se a classificação de intensidade de frio utilizada para a determinação do perfil de Tn no dossel da canola. No entanto, foi adicionada a classe denominada dia normal (DN), quando a Tn em R foi maior que 5,00°C. As avaliações em DN foram realizadas após ocorrência de geadas, sendo a caracterização para DN realizada porque não foram realizadas avaliações da Ter em todas as geadas e dias frios. A caracterização para DN foi realizada para aumentar a representatividade e validade das avaliações em datas com Tn menor que 5°C.

4.4.8 Variação vertical da temperatura do ar no dossel

Para cada uma das intensidades de frio (GT, GM, GF e DF) foi determinada a variação vertical da Tar no dossel da canola no período das 15h do dia anterior até as 07h do dia de ocorrência da Tn, com os dados dos experimentos de 2016 e 2017.

Para a determinação da variação vertical da Tar no dossel em período antecedente à ocorrência de GT e GM foram considerados os dados de seis datas (GT: 17/07/2016, 18/07/2016, 20/07/2016, 21/07/2016, 22/08/2016, 18/07/2017 e 19/07/2017; GM: 10/08/2016, 23/08/2016, 16/09/2016, 20/09/2016, 26/09/2016 e 09/10/2016), enquanto para GF foram usados dados de dez datas (08/07/2016, 19/07/2016, 22/07/2016,

27/07/2016, 28/07/2016, 09/08/2016, 09/09/2016, 15/09/2016, 29/10/2016 e 21/08/2017) e para DF foram usados dados de vinte e oito datas (23/07/2016, 11/08/2016, 12/08/2016, 13/08/2016, 14/08/2016, 18/08/2016, 24/08/2016, 07/09/2016, 08/09/2016, 10/09/2016, 14/09/2016, 19/09/2016, 21/09/2016, 23/09/2016, 25/09/2016, 29/09/2016, 08/10/2016, 10/10/2016, 28/10/2016, 11/06/2017, 20/06/2017, 01/07/2017, 02/07/2017, 20/07/2017, 21/07/2017, 20/08/2017, 22/08/2017 e 03/10/2017).

Para determinação dos perfis foram selecionados os dados de Tar de cada uma das datas, dentro de sua respectiva intensidade de frio, para os níveis de 5, 40, 100 e 150 cm acima do solo, nos horários de 15, 17, 19, 21, 23, 1, 2, 3, 5 e 7 horas. Com os dados de temperatura do ar de cada um dos horários (15, 17, 19, 21, 23, 1, 2, 3, 5 e 7 horas) foi calculada a temperatura média do ar para cada um dos níveis de medição da Tar (5, 40, 100 e 150 cm acima do solo) para cada uma das intensidades de frio (GT, GM, GF e DF).

4.4.9 Variáveis micrometeorológicas

4.4.9.1 Saldo de radiação

O saldo de radiação (R_n) sobre o dossel de canola foi medido com saldoradiômetros (marca kipp & Zonen), modelo NR-LITE 2. No experimento de 2016 o R_n foi medido na segunda data de semeadura, em uma unidade experimental do genótipo Diamond, no período de 19/05/2016 a 20/09/2016 e na terceira data de semeadura foi medido em uma unidade experimental do genótipo Alht M6, no período de 19/05/2016 a 06/10/2016. No experimento de 2017 as medições foram realizadas em uma repetição do genótipo Diamond na primeira data de semeadura no período de 16/05/2017 a 25/07/2017, na segunda data de semeadura o R_n foi medido em uma repetição do genótipo Diamond de 16/05/2017 a 16/10/2017 e na terceira data de semeadura as medições foram realizadas em uma repetição do genótipo Diamond de 30/07/2017 a 16/10/2017.

4.4.9.2 Fluxo de calor no solo

O G foi medido nos experimentos de 2016 e 2017 com placas de fluxo de modelo HFP01-15 instaladas a 1 cm de profundidade. Em 2016 o mesmo foi medido em uma unidade experimental da segunda data de semeadura no período de 19/05/2016 a

20/09/2016 e uma repetição da terceira data de semeadura no período de 19/05/2016 a 06/10/2016, na entrelinha de plantas, nas três cultivares.

No experimento de 2017 o G foi medido em uma unidade experimental da primeira, uma da segunda e uma da terceira data de semeadura, com dois sensores, sendo um na linha e outro na entrelinha de plantas, somente no genótipo Diamond. Na primeira data de semeadura o G foi medido de 15/05/2017 a 24/07/2017, na segunda foi de 16/06/2017 a 16/10/2017 e na terceira foi de 02/08/2017 a 16/10/2017.

4.4.9.3 Velocidade e direção do vento

A velocidade (m s^{-1}) e a direção do vento ($^{\circ}$) foram medidas com anemômetros sônicos, modelo WINDSONIC1-L34. No experimento de 2016 a velocidade do vento foi medida no mesmo nível das estruturas reprodutivas, acompanhando o crescimento das plantas. As medições foram realizadas em uma unidade experimental da segunda data de semeadura no período de 07/06/2016 a 18/08/2016 e no período de 20/08/2016 a 14/09/2016 foram realizadas na terceira data de semeadura, ambos períodos no genótipo Diamond.

Em 2017 a velocidade e direção do vento foram medidas na primeira, segunda e terceira data de semeadura apenas no genótipo Diamond. Foi utilizado o mesmo tipo e posicionamento do anemômetro que no experimento de 2016. Na primeira data de semeadura o período de avaliação foi de 15/05/2017 a 24/07/2017, na segunda foi de 16/06/2017 a 16/10/2017 e na terceira foi de 02/08/2017 a 16/10/2017.

Em todas as situações em que os anemômetros sônicos foram usados, os mesmos foram instalados de modo que a direção de 0° correspondesse ao Norte verdadeiro. A coleta e armazenamento de dados de velocidade e direção do vento foi realizada a cada 30 segundos, sendo os mesmos foram armazenados em datalogger (marca Campbell, modelo CR 1000).

4.4.10 Geração de modelos para estimativa da temperatura mínima do ar e das estruturas reprodutivas

Para obtenção dos modelos de estimativa da TnE e da temperatura mínima das estruturas reprodutivas (Tner) foram utilizados os dados coletados no ano de 2016, enquanto os dados do ano de 2017 foram utilizados para fazer a validação dos modelos.

Essa estratégia foi adotada porque o número de datas com Tn abaixo de 5,0°C em 2016 foi maior do que em 2017. O maior número de dados permite geração de modelos com maior precisão e acurácia para estimativa da Tn no dossel e das estruturas reprodutivas.

Antes da obtenção dos modelos foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson para avaliar o grau de relação da Tn medida no dossel da canola com a Tn em Aut e R, com o saldo de radiação (Rn), velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperatura do ponto de orvalho, pressão de vapor de água e pressão de saturação de vapor de água. Essa análise foi feita para identificar variáveis meteorológicas com alto grau de associação com as variáveis dependentes, as quais poderiam integrar os modelos de estimativa e torna-los mais precisos e acurados.

Os modelos para estimativa de TnE e Tner foram gerados por meio de regressão linear simples, considerando a Tn em Aut1, Aut e R como variáveis independentes (x) e a TnE e Tner como variáveis dependentes (y). A significância estatística dos coeficientes linear e angular foi avaliada pelo teste t e pelo intervalo de confiança a 5% de probabilidade de erro. Além disso, foi utilizado o coeficiente de determinação para avaliar a dispersão dos dados.

4.4.11 Validação dos modelos para estimativa da temperatura mínima do ar, das estruturas reprodutivas e da aclimatação da canola.

Os dados coletados no experimento em 2017 foram utilizados para validação dos modelos gerados em 2016. Em 2017 o experimento foi instalado em meia-encosta, enquanto em 2016 foi instalado em uma depressão do terreno, com condições ambientais mais propícias para ocorrência de geadas. Assim, a geração dos modelos foi feita com dados coletados em local propício à ocorrência de valores mínimos de Tn, enquanto a validação dos mesmos foi feita para ambiente que representa as condições ambientais médias das regiões de cultivo de canola na região Sul do Brasil e parte da América do Sul.

Primeiramente, os valores de TnE e Tner foram estimados pelos modelos correspondentes, em função da Tn em Aut1, Aut e R. Em seguida, para os valores observados e estimados de TnE e Tner do ano de 2017 foi gerada a estatísticas descritiva destas.

A avaliação da dispersão entre os valores observados e estimados em torno da linha 1:1, foi realizada considerando os valores observados no eixo das ordenadas e os valores estimados no eixo das abscissas (PIÑEIRO et al., 2008). O coeficiente linear e angular da

regressão entre os valores observados e estimados foram avaliados pelo teste t, a 5% de probabilidade de erro, para verificar a significância da variação dos mesmos em relação a 0 e 1, respectivamente. Em um modelo ideal o coeficiente linear e o angular não diferem de 0 e 1, respectivamente (SMITH; ROSE, 1995; GAUCH et al., 2003).

Para complementar a análise de dispersão dos dados observados e simulados em torno da linha 1:1, foi avaliada a acurácia e a precisão das estimativas (WILLMOTT et al., 1985), considerando como melhores modelos, aqueles que atenderem os critérios de todas as estatísticas utilizadas. Foram aplicadas as estatísticas: índice de concordância (d), erro absoluto médio (EAM), raiz quadrada média do erro (RQME), índice BIAS (BIAS), erro médio aleatório (MSE_a) e erro quadrático médio sistemático (MSE_s).

O índice de concordância d indica a exatidão do modelo, avaliando se os valores simulados são livres de erros. O mesmo varia de 0, quando não existe concordância entre os valores observados e simulados, até 1, quando a concordância é perfeita. O d foi calculado pela equação desenvolvida por Willmott et al. (1985):

$$d = 1 - \left\{ \frac{[\sum(S_i - O_i)^2]}{[\sum(|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)]^2} \right\} \quad (1)$$

em que: S_i é o valor simulado, O_i é o valor observado e \bar{O} é a média dos valores observados.

O erro absoluto médio (EAM) é a média dos valores absolutos dos erros. É um indicador que considera a magnitude dos erros, atribuindo o mesmo peso para todos os erros. O EAM também é um indicador da exatidão dos modelos, sendo considerado robusto para avaliação de modelos, pois é pouco afetado por outliers. O EAM foi proposto Willmott e Matsuura (2005) e foi calculado com a seguinte equação:

$$EAM = [\sum(|O_i - E_i|)]/n \quad (2)$$

em que: O_i é o valor observado, E_i é o valor simulado e “n” é o número de observações.

A raiz quadrada média do erro (RQME), também é um indicador de exatidão dos modelos, sendo usada para complementar o EAM. A RQME expressa a acurácia dos valores simulados apresentando os erros na mesma unidade da variável analisada. Para calcular a RQME foi usada a equação proposta por Pielke (1984):

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|^2}{n}} \quad (3)$$

em que: O_i é o valor observado, S_i é o valor simulado e “n” é o número de observações.

O índice Bias é o valor médio dos valores simulados em relação ao observados, mostrando se há tendência de um modelo subestimar ou superestimar os valores observados. Quanto mais próximo a 0 for o valor do índice de Bias, menos tendência de

subestimativa ou superestimativas, respectivamente, tem o modelo. O índice Bias é uma medida de exatidão dos modelos, sendo calculado com a equação:

$$\text{Bias} = (\sum S_i - \sum O_i) / \sum O_i \quad (4)$$

em que: O_i é o valor observado (medido), S_i é o valor simulado pelo modelo.

As partes aleatórias (MSE_a) e sistemática (MSE_s) da RQME foram calculadas conforme Willmott (1982):

$$MSE_a = \frac{[\sum (\hat{S}_i - S_i)^2]}{n} \quad (5)$$

$$MSE_s = \frac{[\sum (\hat{S}_i - O_i)^2]}{n} \quad (6)$$

em que:

$$\hat{S}_i = a + bO_i$$

sendo “a” e “b”, coeficientes: linear e angular da equação da reta de regressão entre valores simulados e observados. O MSE_a é uma medida de precisão dos modelos, representando as variações aleatórias das medições e é devido a fatores não controlados, afetando cada medição de maneira distinta. Já o MSE_s é uma medida de exatidão dos modelos, representando a diferença entre o valor da medição e o valor verdadeiro, sendo o mesmo para toda a medição Willmott (1982).

Os cálculos e as análises estatísticas foram realizados utilizando planilhas do software Excel[®], o software R e SAS.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Caracterização ambiental de dias com geada

De acordo com os critérios utilizados, durante as medições de Tar no dossel, em 2016 ocorreram 5 GT, 7 GM, 10 GF e 21 DF e em 2017 ocorreram 2 GT, 1 GM, 1 GF e 9 DF. Nas quatro intensidades de frio avaliadas verificou-se condição regional de estabilidade atmosférica, favorável ao resfriamento da superfície por perda de energia por radiação de ondas longas, uma vez que o R_n noturno médio foi menor que -50 W m^{-2} e a velocidade do vento foi menor que 1 m s^{-1} nas quatro intensidades de frio (SNYDER; MELO-ABREU, 2010) (Tabela 1).

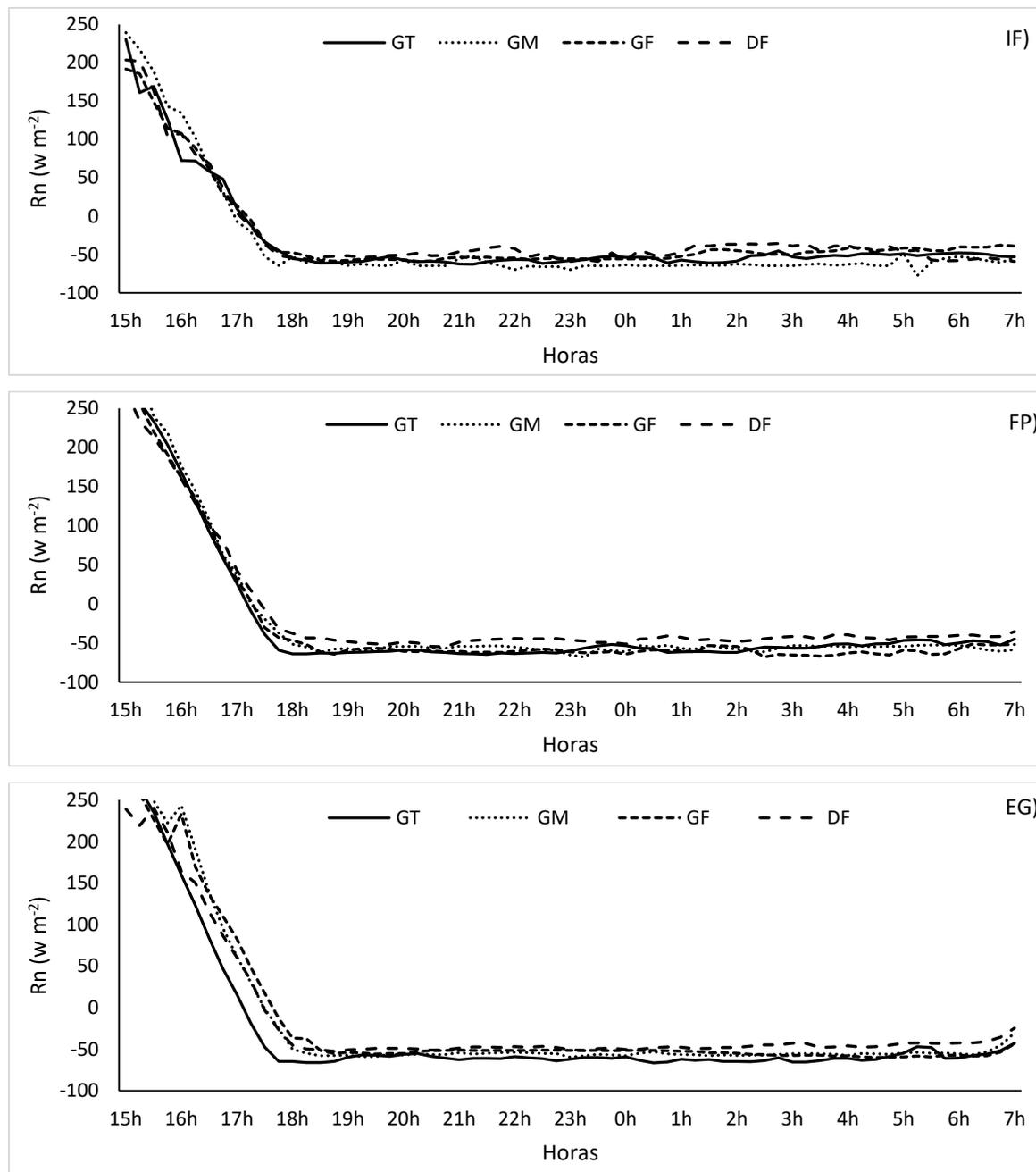
Tabela 1 - Saldo de radiação médio (W m^{-2}) e velocidade do vento média (m s^{-1}) em dois períodos diários para condições de geadas de intensidade forte (GT), moderada

(GM), fraca (GF) e em dias frios (DF) nos experimentos em 2016 e 2017 no período reprodutivo da canola. Passo Fundo, RS – 2019.

Período do dia	Variável avaliada	Condições de geada			
		GT	GM	GF	DF
Diurno (7 h a 18 h)	Saldo de radiação ($W m^{-2}$)	177,8	277,6	186,2	236,2
	Velocidade do vento ($m s^{-1}$)	0,79	0,88	0,60	1,31
Noturno (18h a 7h)	Saldo de radiação ($W m^{-2}$)	-54,9	-59,9	-54,2	-50,8
	Velocidade do vento ($m s^{-1}$)	0,40	0,32	0,50	0,94

O Rn diurno em GM apresentou-se superior às demais intensidades de frio (Tabela 1), indicando que nestes dias existia pouca ou nenhuma nebulosidade. Em noites com céu claro, há menor quantidade de moléculas absorvedoras de radiação de ondas longas, tais como vapor de água e dióxido de carbono, o que diminui a contra-radiação da atmosfera e favorece a perda de energia radiativa da superfície, acentuando o resfriamento da mesma (GATES, 1980). Em função do maior armazenamento de energia no período diurno em GM, verificou-se que a magnitude de redução do Rn das 15h até as 18h em GM foi semelhante a GT no IF, FP e EG (Figura 1). O maior armazenamento de energia no período diurno em GM (Tabela 1), implica em temperatura da superfície mais elevada e, conseqüentemente, maior perda energética no período noturno, uma vez que segundo a Lei de Stefan-Boltzmann, a energia irradiada pela superfície é diretamente proporcional à quarta potência de sua temperatura (HELDWEIN, 1993). Conseqüentemente, o resfriamento da superfície e do ar adjacente à mesma em GM foi superior a GF e DF, quando o Rn diurno foi inferior em GM do que em GF e DF.

Figura 1 - Saldo de radiação médio (R_n) do período das 15h às 7h em datas que precederam a ocorrência de geada de intensidade forte (GT), moderada (GM), fraca (GF) e dias frios (DF) no início do florescimento (IF), florescimento pleno (FP) e enchimento de grãos (EG) da canola nos anos de 2016 e 2017. Passo Fundo, RS – 2019.



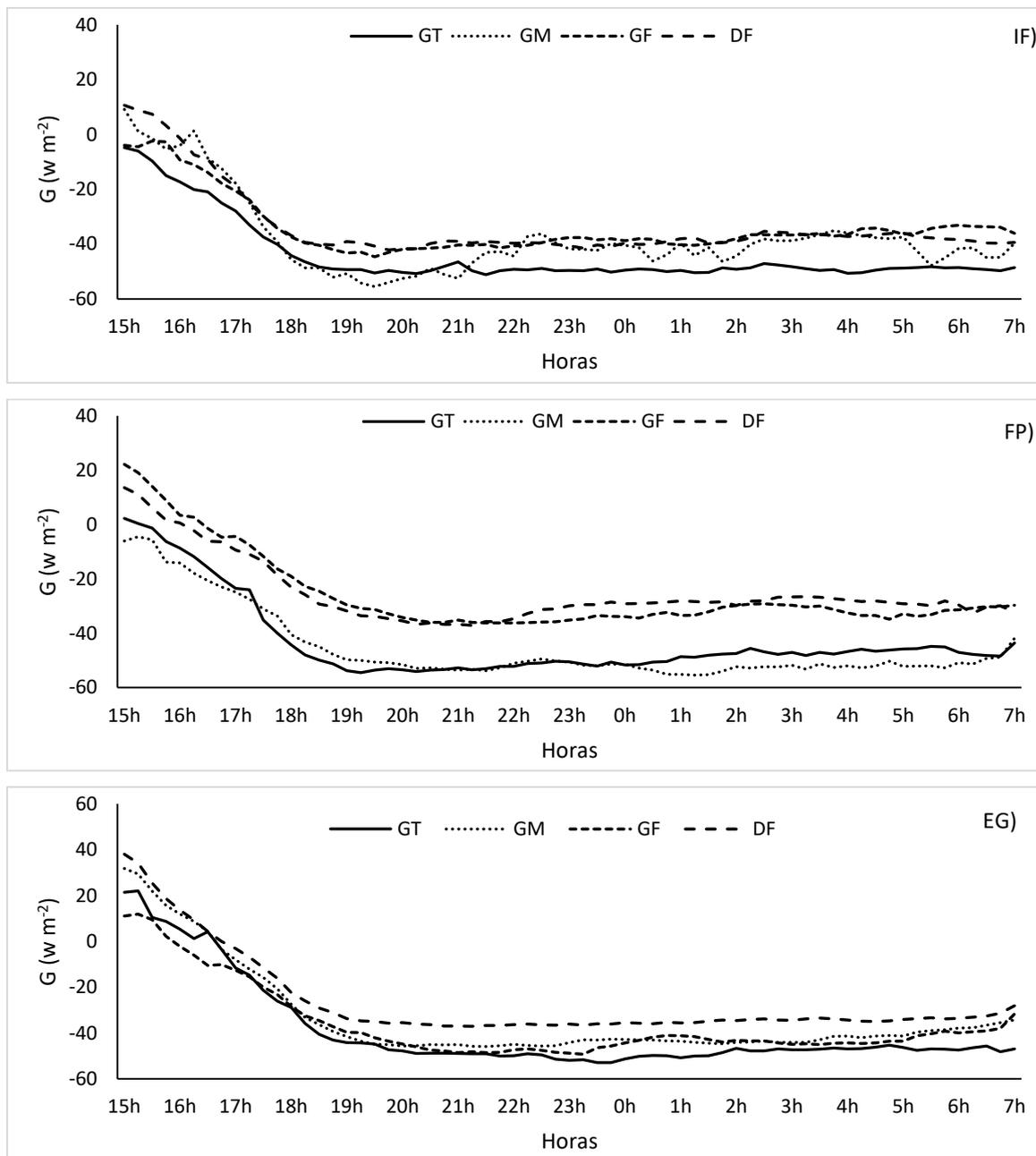
Fonte: Autor

A resposta do R_n no período noturno (18h a 7h) para o IF, FP e EG da canola (Figura 1) apresentou a mesma tendência verificada na Tabela 1, quando nas três intensidades de geada foram registrados valores de R_n inferiores aos DF. Resposta semelhante foi

registrada no fluxo de calor no solo (G) noturno (Figura 2), apesar de que GT e GM apresentaram valores que se distinguiram mais de GF e DF, se comparado com o Rn (Figura 1), principalmente no IF e FP (Figura 2).

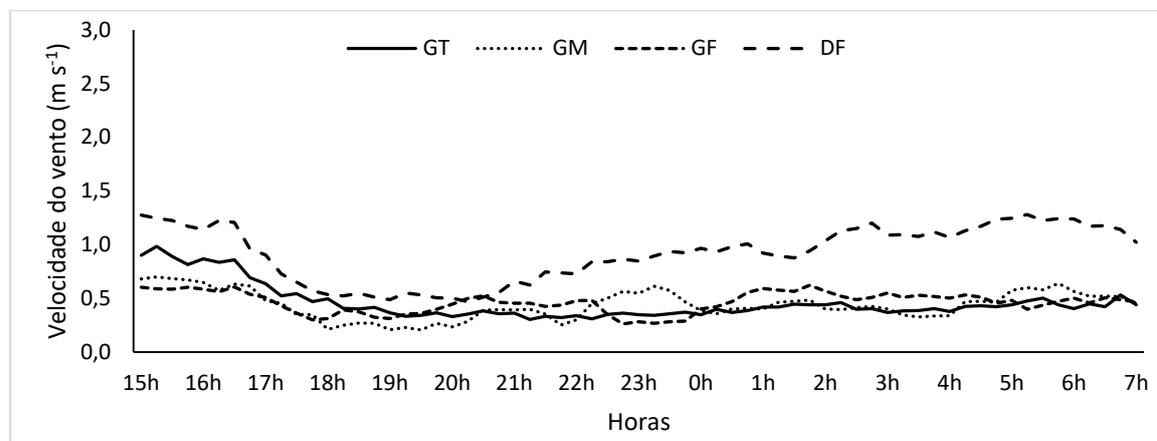
As datas com maior intensidade de frio (GT, GM e GF), com menor Rn e G, coincidiram com as datas nas quais se registraram os menores valores de velocidade do vento (Tabela 1 e Figura 3). Essa resposta está de acordo com Mointeith e Unsworth (1990), quando afirmam que a baixa velocidade do vento favorece a intensificação dos gradientes verticais e horizontais de Tar, uma vez que, com baixa turbulência não ocorre a mistura das camadas de ar. Segundo Heldwein (1993), a baixa velocidade do vento aumenta a amplitude da curva do perfil de Tar e desloca o topo da inversão térmica para baixo. A mistura do ar não é realizada, e em função do Rn negativo, favorecido pelo céu límpido, a superfície se esfria e provoca o resfriamento do ar adjacente a mesma. Segundo Snyder e Melo-Abreu (2010) a baixa velocidade do vento favorece a transferência de energia no sentido vertical, sendo a advecção de calor latente e sensível, em grande escala, insignificante, ou nula, o que aumenta a amplitude da curva do perfil de Tar.

Figura 2 - Fluxo de calor no solo médio (G) do período das 15h às 7h em datas que precederam a ocorrência de geada de intensidade forte (GT), moderada (GM), fraca (GF) e dias frios (DF) no início do florescimento (IF), florescimento pleno (FP) e enchimento de grãos (EG) da canola nos anos de 2016 e 2017. Passo Fundo, RS – 2019.



Fonte: Autor

Figura 3 - Velocidade do vento média (m s^{-1}) do período das 15h às 7h em datas que precederam a ocorrência de geada de intensidade forte (GT), moderada (GM), fraca (GF) e dias frios (DF) em todo período reprodutivo da canola nos anos de 2016 e 2017. Passo Fundo, RS – 2019.

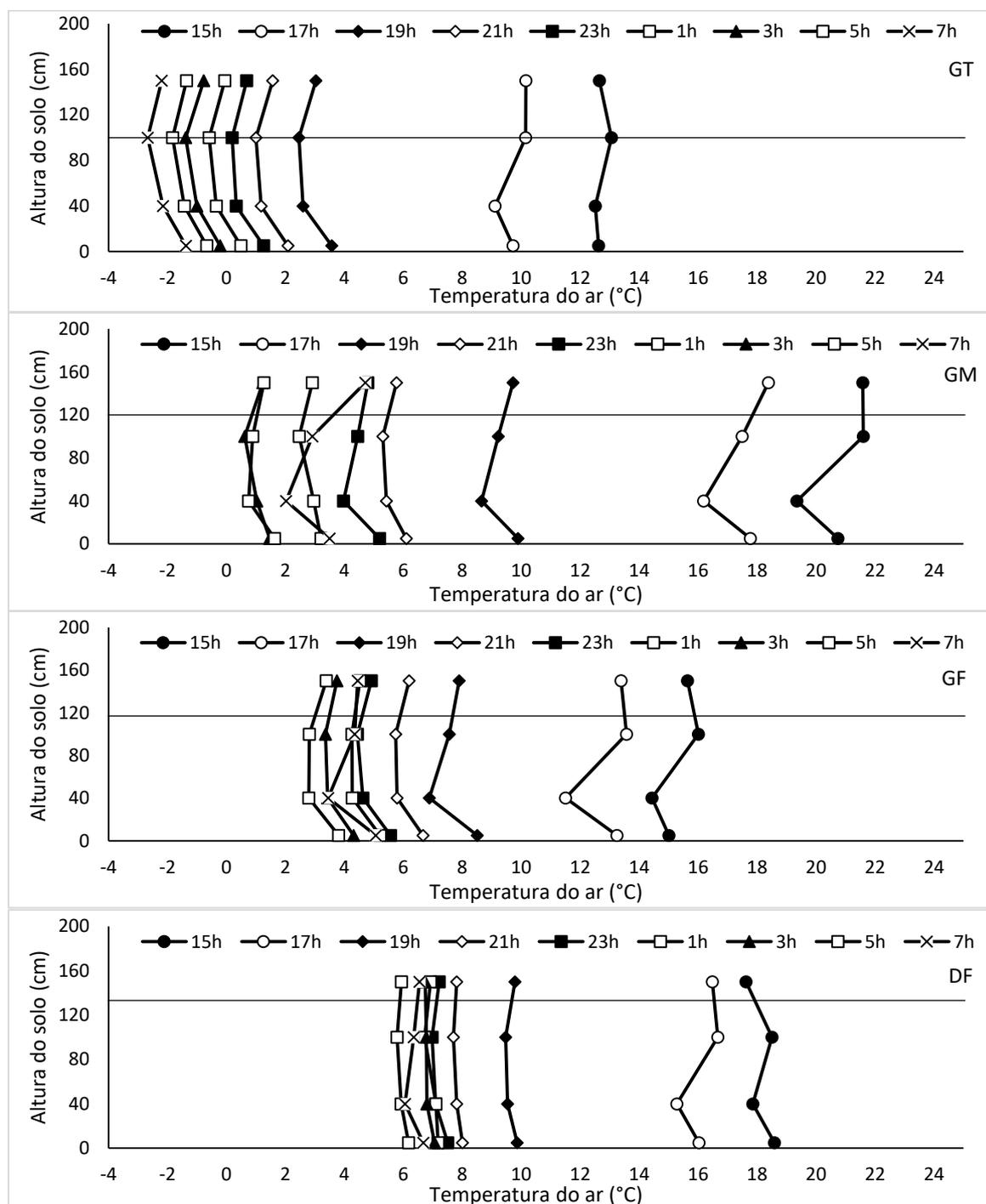


Fonte: Autor

4.5.2 Evolução da temperatura do ar no dossel de canola previamente ocorrência de geadas e dias frios

Os maiores valores de temperatura média do ar no dossel foram registrados às 15h, independentemente da condição térmica. Nos dias que antecederam GT, GM, GF e DF os valores médios foram 12,72, 20,82, 15,28 e 18,14°C, respectivamente. Os valores possuem relação direta com o Rn do período diurno em cada uma das condições térmicas (Tabela 1). Assim, desde as 15h (horário com temperatura média do ar mais elevada) do dia antecedente à ocorrência de das GT, GM, GF e DF até o horário com a Tar mais baixa, verificou-se redução de 14,81, 19,73, 11,20 e 12,19°C (amplitude térmica) nas GT, GM, GF e DF, respectivamente (Figura 4). Porém, a maior redução da Tar no dossel de canola foi registrada entre as 17h e 21h, quando a Tar reduziu 8,33, 11,81, 6,58 e 8,28°C nos dias que antecederam as GT, GM, GF e DF, respectivamente (Figura 4). A maior redução da Tar entre as 17h e 21h em GM, se comparada as outras condições, é explicada pela Lei de Stefan-Boltzmann, a qual prevê que a energia irradiada por uma superfície é diretamente proporcional à sua temperatura (HELDWEIN, 1993). Em datas que antecederam GM, o Rn do período diurno foi superior às datas das demais condições térmicas, portanto, com condições térmicas que favoreceram a maior perda energética do que em GT, GF e DF.

Figura 4 - Perfil vertical de temperatura do ar média em dossel de canola no período diurno (15h a 18h) e noturno (18h a 7h), nos experimentos de 2016 e 2017, que antecederam a ocorrência de geada de intensidade forte (GT), moderada (GM), fraca (GF) e em dias frios (DF), medida em 4 níveis acima do solo (5, 40, 100 e 150 cm do solo) no período reprodutivo da canola. A linha na horizontal representa a altura média do topo do dossel. Passo Fundo, RS – 2019.



Fonte: Autor

O perfil vertical de Tar no dossel, no horário das 15h, em dias que antecederam GT, GM e GF apresentou os menores valores a 40 cm do solo, enquanto nos DF foram registrados a 150 cm do solo, ou seja, fora do dossel. Os maiores valores, nas GM e GF, foram registrados próximo as estruturas reprodutivas (100 cm do solo), enquanto em GT e em DF os maiores valores ocorreram a 5 cm do solo (Figura 4).

No horário das 17h, a Tar mais baixa foi registrada a 40 cm do solo em todas intensidades de frio avaliadas (Figura 4). Essa tendência se manteve para o horário das 19h nas condições de GM e GF, enquanto em GT e nos DF os menores valores foram registrados a 100 cm do solo, mas ainda muito próximos do valor a 40 cm do solo, mostrando o início do deslocamento da inversão térmica para níveis mais altos (Figura 4).

Nos dias que antecederam GT, após as 19h, as menores Tar sempre foram registrados a 100 cm do solo (Figura 4). Enquanto isso, nas GM as menores Tar variaram entre 40 e 100 cm do solo durante todo o período noturno (Figura 4). Essa diferença de nível em que ocorreram as Tar mínimas no dossel nas GT e GM se devem à diferença de IAF e altura média do dossel quando foram registradas as geadas (Apêndice E e F). Nas GT a altura média do dossel foi 100 cm, nível de maior troca energética e resfriamento. Nas GM, houve maior drenagem do ar frio do topo do dossel até o nível de 40 cm do solo. O maior IAF indica que as folhas foram a superfície de maior troca energética em GM, o que também explica as oscilações do nível com menor Tar nas GM, uma vez que a maior altura e o maior IAF dificultaram a drenagem do ar frio e favoreceram o movimento convectivo de ar, uma vez que o topo do dossel se esfriou com maior intensidade do que os terços médio e inferior (GEIGER, 1965; JACOBS et al., 1996).

Nas condições de GF, a Tar foi mais baixa a 40 cm do solo do que nos outros níveis até as 21h (Figura 4). Entre as 21h e 05h, em função da menor perda radiativa e maior velocidade do vento em relação as GT e GM (Figura 1 e Figura 3), verificou-se resposta isotérmica entre os níveis de 40 e 100 cm do solo, que apresentaram as menores Tar. Somente as 07h, com a incidência dos primeiros raios solares, e o aquecimento do topo do dossel, a Tar a 40 cm do solo foi menor do que a 100 cm do solo. Nos DF, após as 19h, a resposta foi isotérmica em todo o perfil vertical até as 05h (Figura 4), sendo que somente as 07h, devido ao aumento da Tar a 100 e 150 cm do solo, foram registrados os menos valores a 40 cm do solo (Figura 4).

A pouca variação vertical da Tar nos DF, embora alguns décimos menores, pode ser atribuída a ocorrência de vento, mesmo que de baixa velocidade (Tabela 1; Figura 3), e ou ocorrência de nevoeiro a partir de determinado horário da noite, visto que nos diferentes

níveis a diminuição da temperatura do ar a partir das 23h foi pequena, menor do que $1,6^{\circ}\text{C}$ (Figura 4DF) até o momento mais frio no amanhecer.

4.5.3 Perfil de temperatura mínima do ar no período reprodutivo da canola em diferentes intensidades de frio

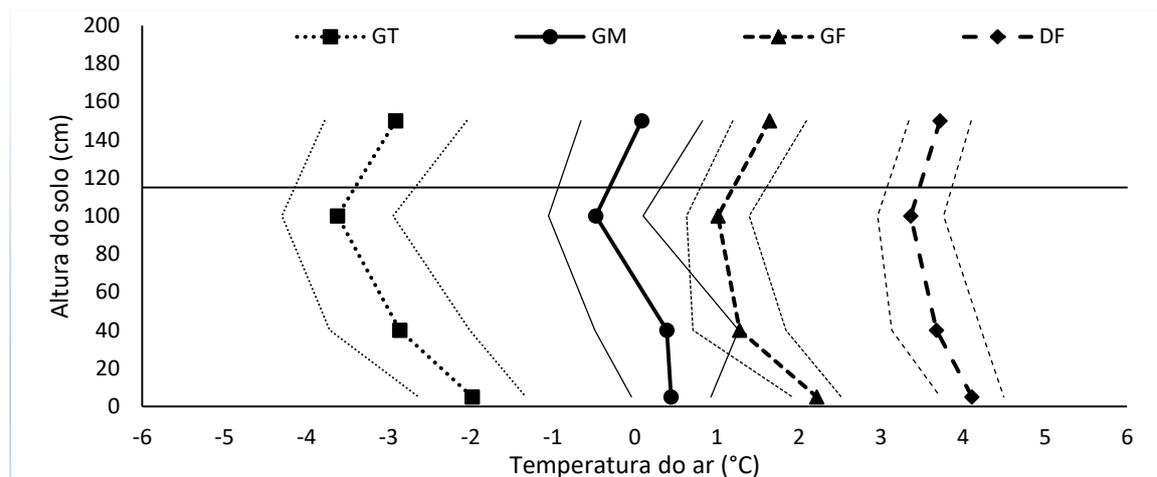
Os perfis verticais de T_n no dossel de canola para todo o período reprodutivo ficaram bem estabelecidos (Figura 5), uma vez que os mesmos diferiram entre si, exceto em 40 cm do solo entre as GM e GF. Isso significa que a classificação da intensidade de frio para as geadas, utilizando como critério a T_n na referência (R), foi eficiente para caracterizar a condição térmica do perfil de Tar no dossel da canola no período reprodutivo em noites frias e com geada, principalmente próximo às estruturas reprodutivas (80 a 150 cm do solo).

A forma dos perfis de T_n apresentou pequena variação entre as diferentes intensidades de geada para todo o período reprodutivo. Verificou-se que o gradiente entre a T_n mais baixa e mais alta nos perfis de GT, GM, GF e em DF foi de 1,64, 0,91, 1,21 e $0,75^{\circ}\text{C}$, respectivamente (Figura 5). As menores T_n ocorreram em 100 cm, independentemente da intensidade de frio, ou seja, no terço superior do dossel e próximo às estruturas reprodutivas. Baldocchi et al. (1983) para a soja, Jacobs et al. (1996) para o milho, Tazzo et al. (2008) para a batata, Winkel et al. (2009) para a quinoa e Loose et al. (2011) para o girassol, também registraram a menor T_n no terço superior do dossel no período noturno.

No IF ocorreram somente GF e DF (Figura 6A), que diferiram entre si nos níveis de 100 e 150 cm do solo, porém, estes níveis estavam acima do dossel, uma vez que a altura média do mesmo no IF foi 77 cm (Apêndice E). Os perfis de T_n para o FP e EG diferiram entre si, principalmente, nos níveis de 100 e 150 cm do solo, ou seja, próximo às estruturas reprodutivas (Figura 6B e 6C). Segundo Monteith e Unsworth (1990) e Loose et al. (2011), o perfil de Tar dentro do dossel é diretamente influenciado pelo estágio de desenvolvimento da cultura e por características biométricas das plantas, tais como altura de plantas e índice de área foliar (IAF), por interferirem diretamente no balanço de energia. O nível de exposição das folhas a céu aberto é o nível de troca noturna de energia radiante com a atmosfera (HELDWEIN, 1993). Quando o saldo de radiação é negativo é nesse nível que ocorre o resfriamento mais acentuado das folhas e órgãos reprodutivos na respectiva fase

e, conseqüentemente, o ar em contato com essas estruturas mais expostas também apresenta resfriamento mais acentuado.

Figura 5 - Perfil vertical de temperatura mínima do ar média e intervalo de confiança (95%), em dossel de canola em grande parte do período reprodutivo (estádios fenológicos de D2 a FF) nos experimentos de 2016 e 2017, em noites com ocorrência de geada de intensidade forte (GT), moderada (GM), fraca (GF) e dias frios (DF), medida em quatro níveis acima do solo (5, 40, 100 e 150 cm). A linha na horizontal representa a altura média do topo do dossel. Passo Fundo, RS – 2019.



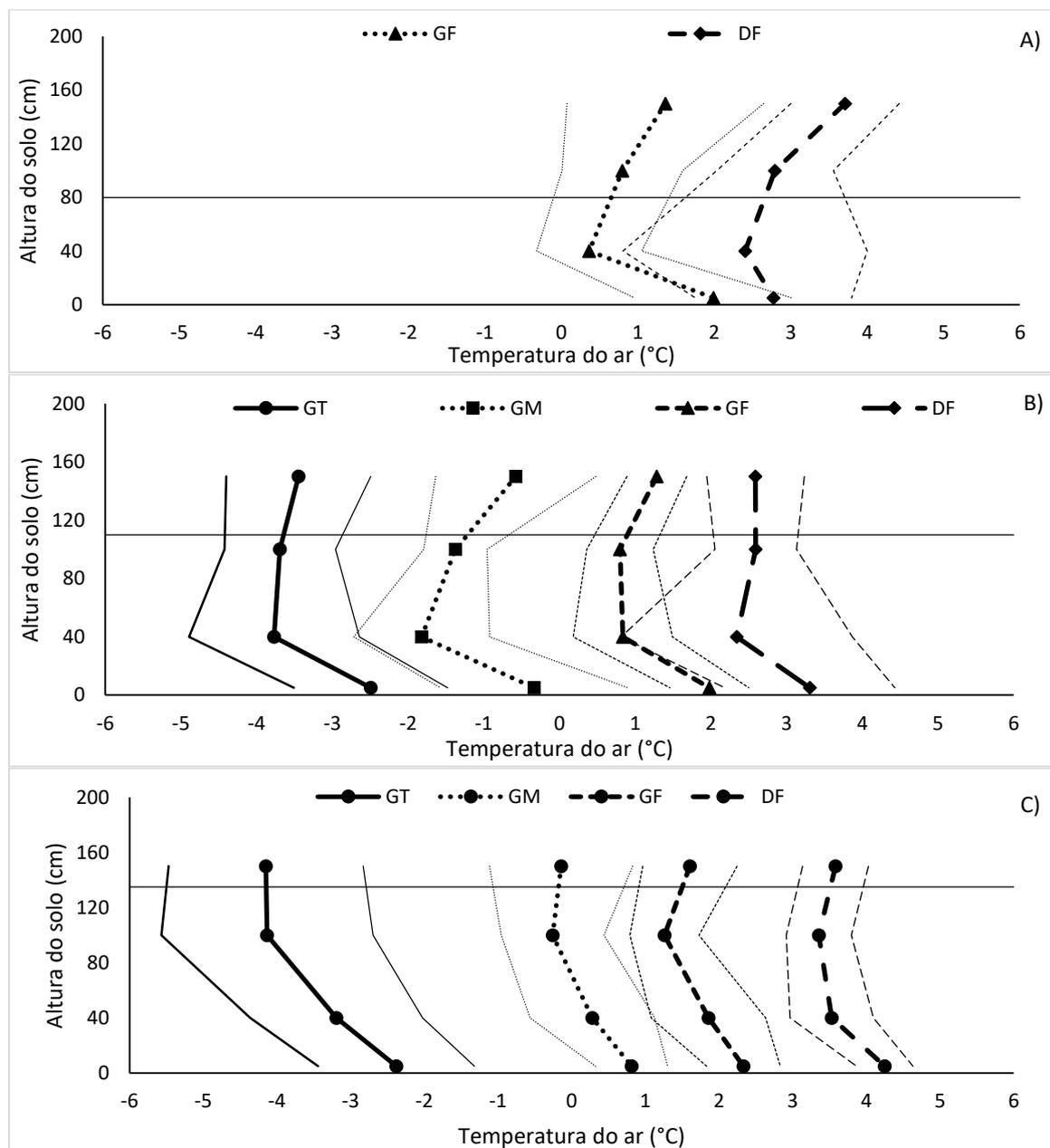
Fonte: Autor

No IF, os menores valores de Tn foram registrados em 40 cm do solo (Figura 6A). A baixa estatura do dossel (77 cm), IAF médio de 3,52 (Apêndice E e F) e poucas estruturas reprodutivas diferenciadas no terço superior do dossel, com reduzida ocupação do espaço aéreo, indicam que a altura de 40 cm acima do solo apresentou os menores valores de Tn porque a área foliar de maior exposição das plantas foi o nível de maior troca energética entre dossel e atmosfera durante a noite. Segundo Fochesatto et al. (2016), no período vegetativo da canola, as folhas são as estruturas com maior interação com a radiação fotossinteticamente ativa. Isso indica que, por estarem totalmente expostas, em noites com intensa perda energética pelo processo de radiação, as folhas são a superfície de maior troca energética do dossel com a atmosfera.

Além disso, as características botânicas da canola no período reprodutivo, principalmente no IF, favorecem o acúmulo de ar frio no terço superior do dossel. Após a alongação do ramo principal, as folhas que compõem a quase totalidade do IAF localizam-se nos dois terços inferiores do dossel (THOMAS, 2014). Estas folhas dificultam a drenagem do ar mais frio do terço superior do dossel até o solo e isolam o topo do dossel da radiação de

ondas longas provenientes do solo, que poderiam atenuar o resfriamento das estruturas das plantas mais expostas, e do ar no terço superior.

Figura 6 - Perfil vertical da temperatura mínima do ar média em dossel de plantas de canola e intervalo de confiança (95%), nos experimentos de 2016 e 2017, em noites com ocorrência de geada de intensidade forte (GT), moderada (GM) e fraca (GF) e em dias frios (DF), medida em quatro níveis acima do solo (5, 40, 100 e 150 cm) no início do florescimento (A), durante o período do florescimento (B) e durante o enchimento de grãos da canola (C). A linha na horizontal representa a altura média do topo do dossel. Passo Fundo, RS – 2019.



Fonte: Autor

A interferência da área foliar no perfil vertical de T_n é comprovada pelo fato de que em todas as condições térmicas no IF, FP e EG, exceto por IF em DF, a maior T_n foi registrada a 5 cm do solo, pois as folhas funcionaram como anteparo à troca de energia radiativa com a atmosfera (ROSENBERG, 1974; TAZZO et al., 2008; LOOSE et al., 2011). Tazzo et al. (2008), em cultivo de batata, e Loose et al. (2011), na cultura do girassol, também verificaram que a T_a próxima ao solo foi maior do que nos demais níveis no período noturno, atribuindo essa resposta à proteção que a área foliar dos níveis superiores proporciona à perda energética do solo, fazendo com que o R_n de ondas longas a 5 cm do solo tenda a ser próximo de zero durante a noite.

No FP, assim como em IF, os menores valores de T_n foram verificados a 40 cm do solo. Porém, em função do crescimento das plantas (Apêndice E), verificou-se menor gradiente de T_n entre os níveis de 40 e 100 cm do solo nos perfis de GF e DF, quando comparado com o IF (Figura 6). Além do crescimento das plantas, o desenvolvimento de botões florais e flores em siliquas, no terço superior do dossel, significa aumento da superfície vegetal neste nível. O aumento do volume ocupado por estruturas reprodutivas no terço superior, interfere diretamente no balanço de radiação e, conseqüentemente, no balanço de energia, uma vez que o aumento do índice de área de estruturas reprodutivas provoca o deslocamento gradual do nível de maior troca energética das folhas até o topo do dossel (ROSENBERG, 1974).

A interferência do desenvolvimento das estruturas reprodutivas e do crescimento das plantas (Apêndice E) no deslocamento do nível de maior troca energética é comprovada pela resposta dos perfis de T_n no EG, quando a menor T_n ocorreu a 100 cm, em todas as condições térmicas, se comparado com IF e FP (Figura 6). A mudança de nível de troca energética entre dossel e atmosfera, evidenciada pela mudança de nível com menor T_n desde o IF até o EG (de 40 para 100 cm), está de acordo com Rosenberg (1974), quando o mesmo relata que a camada de troca de energia entre a superfície e a atmosfera acompanha a elevação da estatura do dossel e incremento de IAF. No caso da canola, em função de sua arquitetura, a área foliar mais exposta foi a camada de troca de energia com a atmosfera até o florescimento, quando iniciou o incremento do índice de área de estruturas reprodutivas, que aliado ao aumento da estatura do dossel, deslocou a camada de troca energética para 100 cm do solo. O índice de área de estruturas reprodutivas não foi determinado, mas Fochesatto et al. (2016), em condições semelhantes as destes experimentos, encontraram valor médio de 2,4.

A redução do IAF em EG em relação a FP (Apêndice F), em função da senescência das folhas no primeiro terço do dossel, diminuiu o efeito de isolamento dos terços superiores à radiação de ondas longas provenientes do solo, uma vez que o gradiente de Tn entre os níveis 5 e 40 cm do solo diminuiu de FP para o EG e o gradiente entre os níveis 40 e 100 cm do solo aumentou do FP para o EG (Figura 5).

O maior resfriamento do ar no topo do dossel em função das trocas energéticas entre o dossel e a atmosfera, em noites com resfriamento radiativo, resulta em resfriamento do ar adjacente às superfícies radiantes, no caso, as síliquis. Assim, os menores valores de Tn no topo do dossel, a partir do florescimento, ratificam a importância que o volume ocupado pelas estruturas reprodutivas tem no balanço de energia em noites com ocorrência de geada. Em função destes resultados, é possível afirmar que a partir do FP da canola, em noites com ocorrência de geada, o terço superior do dossel apresenta a maior intensidade de resfriamento do ar, ou seja, com maior probabilidade de serem expostas à valores de Tar críticos. Em ambiente controlado, para plantas em período reprodutivo, a Tar de -3 a -4°C pode provocar abortamento de estruturas reprodutivas, morte de óvulos, morte de grãos e acúmulo de clorofila nos mesmos (McCLINCHEY; KOTT, 2008; DALMAGO et al., 2010; EDWARDS; HERTEL, 2011; THOMAS, 2014). No artigo 1, em plantas não aclimatadas, foi demonstrado que a Tar de -6°C provocou a morte de até 79% das plantas no período reprodutivo, reduziu a massa seca de grãos em até 70% e provocou aumento de até 120% no abortamento de estruturas reprodutivas.

No entanto, Gusta e Wisnieski (2013) relatam que podem existir diferenças nos danos provocados pelo frio às plantas quando as avaliações são realizadas em ambiente controlado se comparado com experimentos conduzidos no campo. Os autores relatam que essas divergências ocorrem devido à dificuldade para simular adequadamente, em câmaras de crescimento, o balanço de radiação e energia noturno de geadas com resfriamento radiativo. Nesse sentido, Dalmago et al. (2010), em ambiente controlado, verificaram morte de plantas de canola com Tar de -6°C , enquanto Kovaleski (2015), em experimento realizado a campo, encontrou morte de plantas de canola com Tar de $-1,3^{\circ}\text{C}$. Portanto, apesar da validade dos resultados obtidos em condições controladas, estes resultados demonstram que os danos às estruturas reprodutivas da canola também podem ocorrer com Tar superior a aqueles danos encontrados em ambiente controlado. Desta forma, considerando os valores críticos para o período reprodutivo (-3°C), e os valores para o início do desenvolvimento da canola ($-1,3^{\circ}\text{C}$), e os valores de Tn nos perfis verticais e seus intervalos de confiança nos níveis de 100 a 150 cm do solo (Figura 1), nível em que as

estruturas reprodutivas da canola se posicionam, é possível afirmar que as GT e GM apresentam condições favoráveis para a ocorrência de danos às estruturas reprodutivas da canola.

4.5.4 Temperatura das estruturas reprodutivas

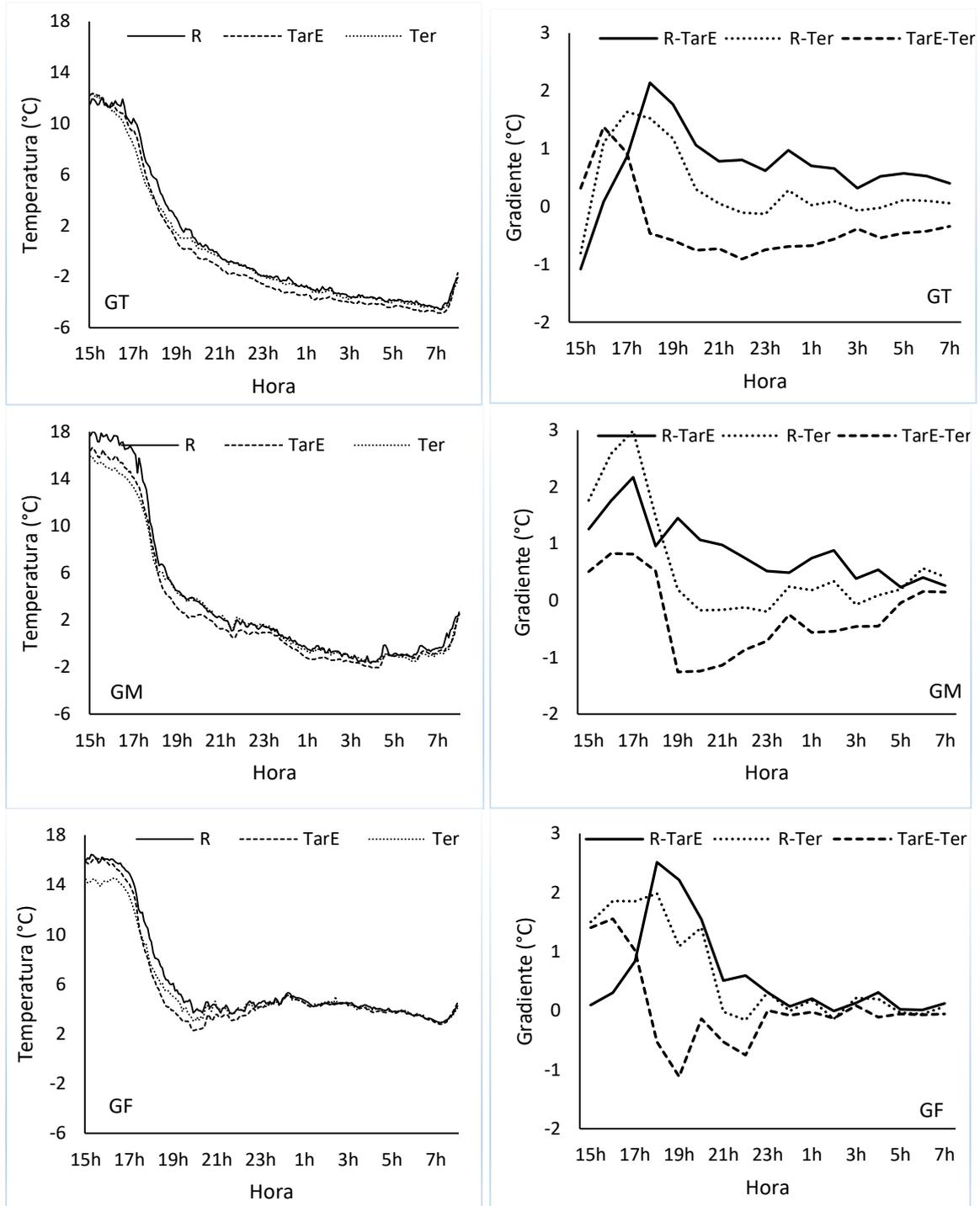
Nas condições térmicas de GT, GM, GF, DF e dias normais (DN) verificou-se elevada variabilidade dos dados de R, TarE e Ter, principalmente no período diurno (15h a 18h) (Apêndice G). Após as 18h, em GT, a variabilidade dos dados reduziu gradativamente até as 07h, mas não foi possível estabelecer diferença entre os valores de R, TarE e Ter, sendo que em DF foi verificada resposta semelhante (Apêndice G). Em GF e DN a alta variabilidade dos dados persistiu até as 22h, diminuindo após esse horário e assim permanecendo até as 7h. Apesar disso, assim como em GT e DF, não foi possível estabelecer diferença entre os valores de R, TarE e Ter em todo o período (Apêndice G).

Em condição de geada moderada (GM) a menor variabilidade dos dados de R, TarE e Ter possibilitou estabelecer diferenças entre R, TarE e Ter após as 19h. A menor variabilidade em GM, se comparada com GT, GF, DF e DN, se deve ao fato de que ocorreram somente duas geadas durante as avaliações de Ter nessa condição. No período de 19 h à 23h e de 1h a 5h a TarE foi menor do que Ter, no restante do período os valores de TarE e Ter foram equivalentes. Apesar da estatística Box-plot indicar alta variabilidade dos dados, o que impediu o estabelecimento de diferenças entre os valores de R, TarE e Ter, foi possível verificar algumas tendências. No período das 15h às 17h, a TarE foi maior do que a temperatura média das estruturas reprodutivas (Ter) em todas as condições avaliadas (Figura 7 e Apêndice G). No mesmo período, a Tar na R foi maior do que TarE e Ter em GM, GF, DF e DN (Figura 7 e Apêndice G), sendo que em condições de GT a Tar em R foi menor ou igual a TarE (Figura 7 e Apêndice G).

No período de 17h às 21h, verificou-se acentuado resfriamento em todas as condições térmicas avaliadas, principalmente em GT, GM, GF e DF (Figura 7). Em todas as condições térmicas a redução da TarE foi maior do que Ter, sendo que em GT e GM a redução da TarE foi cerca de 2°C maior do que Ter. Dessa forma, as 21h em todas as condições térmicas, a TarE apresentou valor médio menor do que Ter. Em GT, GM e GF, datas com Rn noturno menor (Tabela 1), as 18h15min a TarE já se apresentava menor do que Ter (Figura 7). Essa tendência não foi registrada em DF e DN, quando somente após as 19h verificou-se que TarE foi aproximadamente 0,2°C mais baixa do que Ter (Figura 7).

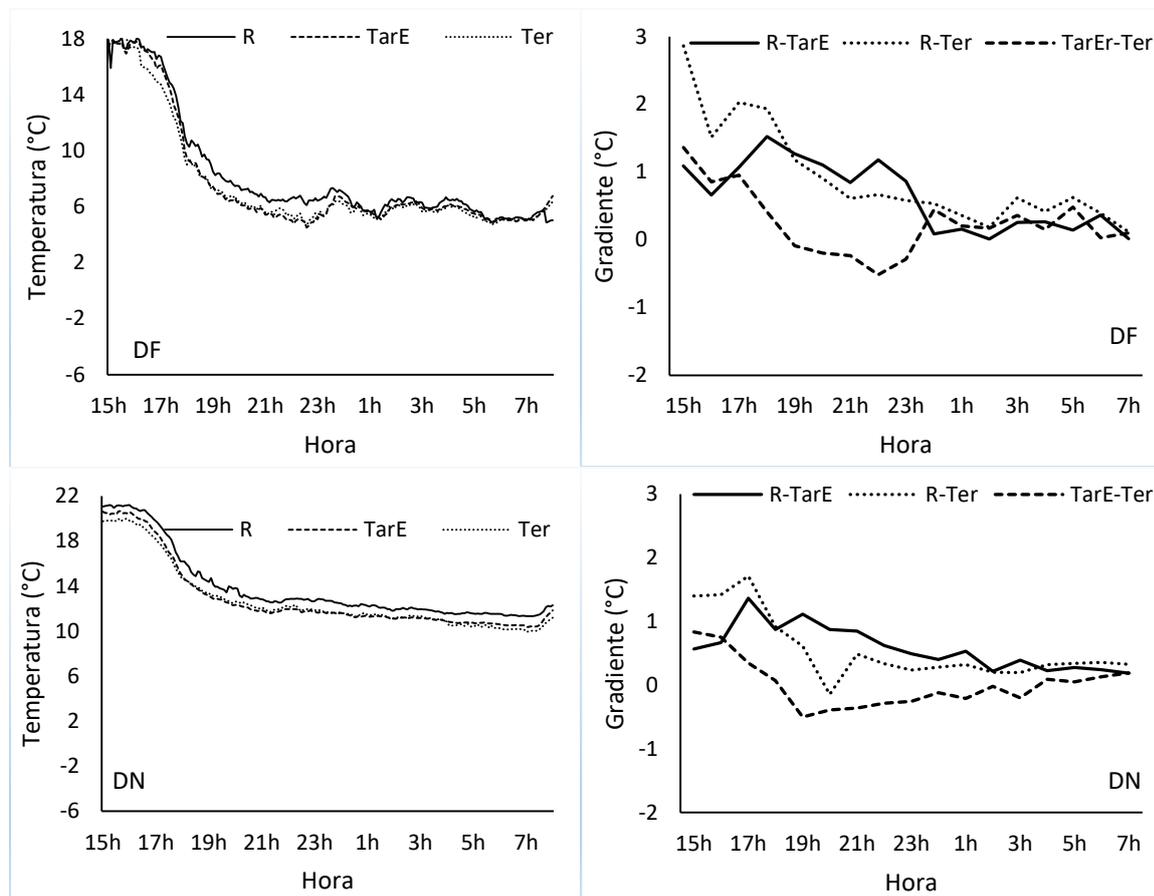
No restante do período noturno destas duas condições (DF e DN), TarE e Ter apresentaram-se sempre próximas, com tendência de TarE apresentar-se cerca de $0,2^{\circ}\text{C}$ menor do que Ter, a não ser pelo período de 04h a 07h nos DN, quando Ter apresentou-se $0,29^{\circ}\text{C}$, em média, menor do que TarE (Figura 7).

Figura 7 - Temperatura média do ar na referência (R), próximo as estruturas reprodutivas (TarE) e temperatura média das estruturas reprodutivas (Ter), nos experimentos de 2016 e 2017, no período diurno (15h as 18h) e noturno (18h as 7h) que antecederam a ocorrência de geada forte (GT), moderada (GM), fraca (GF), dias frios (DF) e dias normais (DN). Passo Fundo, RS – 2019.



Fonte: Autor

Figura 7 - Temperatura média do ar na referência (R), próximo as estruturas reprodutivas (TarE) e temperatura média das estruturas reprodutivas (Ter), nos experimentos de 2016 e 2017, no período diurno (15h as 18h) e noturno (18h as 7h) que antecederam a ocorrência de geada forte (GT), moderada (GM), fraca (GF), dias frios (DF) e dias normais (DN). Passo Fundo, RS – 2019.



Fonte: Autor

Nos DF, no período de 19h as 0h, Tar em R foi 1,21 e 1,05°C, em média, maior que TarE e Ter (Figura 7). No período de 0h as 07h, Tar em R continuou com valores superiores, porém, a diferença média para TarE e Ter diminuiu para 0,23 e 0,36°C, respectivamente (Figura 7). Nos DN, no período diurno (15h a 18h), Tar em R foi 0,86 e 1,44°C maior, em média, do que em TarE e Ter (Figura 7). Essa tendência se manteve durante todo o período noturno, quando das 18h a 07h, Tar em R foi 0,95 e 0,91°C maior, em média, do que em TarE e Ter (Figura 7).

Nas noites com ocorrência de GT, no período noturno (18h as 07h), a TarE foi 0,56 e 0,80°C menor, em média, do que Ter e Tar em R, respectivamente (Figura 7). Em datas com GM, no período das 18h às 04h, TarE foi 0,74 e 0,80°C menor, em média, do que Ter e Tar em R, respectivamente (Figura 7). No período das 04h às 07h, TarE e Ter foram

praticamente equivalentes, porém, 0,32 e 0,37°C menores do que Tar em R, respectivamente (Figura 7). Nas GF, no período das 18h a 0h, a TarE foi 0,63 e 1,08°C menor, em média, do que Ter e Tar em R, respectivamente (Figura 7). No período de 0h as 07h TarE, Ter e Tar em R foram praticamente similares (Figura 7).

A ocorrência de $TarE < Ter$ entre as 19 h e 23 h em noites de GF, DF e DN, entre as 19 h e 5 h em noites de GM e entre as 19 h e 7 h em noites de GT, permite inferir que as folhas abaixo das estruturas reprodutivas continuarem a ser os órgãos com resfriamento mais acentuado, possivelmente por ainda apresentarem proporcionalmente maior superfície exposta, e com isso o ar ao redor se resfriou mais do que as estruturas reprodutivas. Outra possível causa que possa ter contribuído para a ocorrência de $TarE < Ter$ durante os períodos da maior taxa de resfriamento é uma provável passagem de deslocamento catabático de ar frio em meio a área experimental proveniente de áreas vegetadas resfriadas a montante.

4.5.5 Estimativa de temperatura mínima do ar e das estruturas reprodutivas

A análise de correlação entre a Tn em Aut, R e Aut1 com TnE e Tner apresentou coeficientes significativos ($r > 0,94$) em todas as correlações (Tabela 2). Em dias com a Tn menor do que 5°C em R, a análise de correlação entre Aut, R e Aut1 com TnE e Tner foi significativa em todas as correlações ($r > 0,93$) (Tabela 2). A significância dos coeficientes de correlação indica que existe alta relação entre os valores de Tn medidos em Aut, R e Aut1 com a TnE e Tner. Esse resultado demonstra ser viável a geração de modelos de estimativa da TnE e Tner a partir de valores de Tn em Aut, R e Aut1. A obtenção de modelos para estimativa de valores mínimos de Tar no dossel da canola é importante, principalmente, para dias com ocorrência de geada e próximo as estruturas reprodutivas da canola. A estimativa destes valores pode auxiliar na estimativa de dano provocado pelo congelamento em dias com geada.

Tabela 2 - Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre a temperatura mínima do ar na estação meteorológica automática (Aut), instalada em condição padrão, distante 300 m a montante da área experimental, temperatura mínima do ar na referência (R), no experimento, temperatura mínima do ar na estação meteorológica automática em Passo Fundo (Aut1), temperatura mínima do ar próximo às estruturas reprodutivas (TnE) e temperatura mínima das estruturas reprodutivas (Tner) durante o período reprodutivo da canola e em dias com temperatura mínima do ar menor que 5°C durante o período reprodutivo da canola no ano de 2016. Passo Fundo, RS – 2019.

Todo período reprodutivo da canola					
	R	Aut	Aut1	TnE	Tner
R	1	0,96*	0,98*	0,99*	0,99*
Aut	0,96*	1	0,97	0,96*	0,94*
Aut1	0,98*	0,97*	1	0,98*	0,95*
TnE	0,99*	0,96*	0,98*	1	0,99*
Tner	0,99*	0,94*	0,95*	0,99*	1
Dias com Tn menor que 5°C em R					
	R	Aut	Aut1	TnE	Tner
R	1	0,89*	0,94*	0,98*	0,99*
Aut	0,89*	1	0,93*	0,91*	0,93*
Aut1	0,94*	0,93*	1	0,97*	0,94*
TnE	0,98*	0,91*	0,97*	1	0,99*
Tner	0,99*	0,93*	0,94*	0,99*	1

*correlação significativa pelo teste t a 5% de probabilidade de erro;

Os modelos para estimativa da TnE e Tner gerados com a Tn medida em R como variável independente, apresentaram menor dispersão dos dados do que os modelos gerados com Tn medida em Aut1 e, principalmente, do que Aut como variável independente, uma vez que estes apresentaram coeficiente de determinação mais alto (Tabela 3 e Figura 8). A mesma resposta foi verificada para os modelos gerados em dias com Tn menor do que 5°C em R (Tabela 3 e Figura 9). Os modelos em função de Aut1, Aut e R explicam 97, 92 e 99% dos valores de TnE, respectivamente (Tabela 3 e Figura 8). Para estimativa de Tner os modelos em função de Aut1, Aut e R explicam 90, 88 e 99% dos valores, respectivamente (Tabela 3 e Figura 8).

Em dias com Tn em R menor do que 5°C a precisão foi menor, uma vez que Aut1, Aut e R explicam 93, 84 e 98% dos valores de TnE e 88, 87 e 98% dos valores de Tner, respectivamente (Tabela 3 e Figura 9), embora a redução do coeficiente de determinação na estimativa da Tner seja pequena.

Tabela 3 - Coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), coeficiente de determinação (R²) e intervalo de confiança dos coeficientes a e b da regressão entre a temperatura mínima do ar diária na estação meteorológica automática em Passo Fundo (Aut1) e temperatura mínima do ar diária próximo às estruturas reprodutivas (TnE) (Aut1 X TnE), Aut1 e temperatura mínima diária das estruturas reprodutivas (Tner) (Aut1 X Tner), temperatura mínima do ar na estação meteorológica automática (Aut) e TnE (Aut X TnE), Aut e Tner (Aut X Tner), temperatura mínima do ar na referência (R) e TnE (R X TnE), R e Tner (R X Tner) durante o período reprodutivo da canola (Regressões de 1 a 6) e para dias com temperatura mínima do ar menor que 5°C em R (Regressões de 7 a 12) durante o período reprodutivo da canola, no ano de 2016. Passo Fundo, RS – 2019.

Todo período reprodutivo da canola							
Regressão	a	b	R ²	a		b	
				Intervalo de confiança		Intervalo de confiança	
				Inferior	Superior	Inferior	Superior
1. Aut1 X TnE	0,19 ^{ns}	0,98*	0,97	-0,05	0,43	0,95	1,01
2. Aut1 X Tner	1,41*	1,06*	0,90	0,46	2,35	0,91	1,21
3. Aut X TnE	-3,77*	1,15*	0,92	-4,34	-3,20	1,09	1,21
4. Aut X Tner	-2,77*	1,21*	0,88	-4,05	-1,49	1,01	1,40
5. R X TnE	-0,05 ^{ns}	0,99*	0,99	-0,20	0,11	0,97	1,01
6. R X Tner	0,17 ^{ns}	0,98*	0,99	-0,07	0,42	0,95	1,02
Dias com Tn menor que 5°C em R							
7. Aut1 X TnE	0,01 ^{ns}	0,91*	0,93	-0,25	0,27	0,84	0,97
8. Aut1 X Tner	0,64 ^{ns}	0,93*	0,88	-0,37	1,65	0,74	1,13
9. Aut X TnE	-3,44*	0,96*	0,84	-4,07	-2,80	0,84	1,07
10. Aut X Tner	-3,06*	1,09*	0,87	-3,90	-2,22	0,85	1,34
11. R X TnE	-0,03 ^{ns}	1,03*	0,96	-0,22	0,16	0,97	1,08
12. R X Tner	0,09 ^{ns}	0,96*	0,98	-0,26	0,45	0,89	1,04

*coeficiente significativo pelo teste t a 5% de probabilidade de erro;

^{ns}: coeficiente não significativo pelo teste t a 5% de probabilidade de erro;

A menor dispersão dos dados para dias com a Tn de R na variável independente do que Aut e Aut1 era esperada, uma vez que R foi instalada junto à área experimental, enquanto Aut situada na mesma minibacia hidrográfica em área de terreno convexo 300 m a montante e em conta 21 m acima da área experimental, e Aut1 cerca de 8 km do local. Além da distância horizontal, a conformação topográfica da região foi um dos principais fatores a influenciar a dispersão dos dados na geração dos modelos. O relevo da região é ondulado e suavemente ondulado, com elevações que apresentam pendentes longos, que criam depressões fechadas favoráveis ao acúmulo de ar frio, que por apresentar maior densidade escoam até estas depressões, onde se deposita e fica estagnado (SILVA; MINUZZI, 2016).

O efeito da conformação topográfica no gradiente térmico pode ser visualizado na diferença de Tn média entre R e Aut em datas com Tn menor do que 5°C em R, quando as médias de Tn foram 0,66 e 4,26°C em R e Aut, respectivamente. A diferença entre a Tn em R e em Aut está de acordo com os limites encontrados por Bootsma (1976), que em noites límpidas e calmas, verificou gradiente de Tar ao longo de encostas na ordem de 1 a 3°C para cada 10 m de elevação. Lawrence (1958), em noites com resfriamento radiativo encontrou gradiente de Tar na ordem de 0,08°C m⁻¹. Enquanto Harrison (1971) e Hocevar e Martsolf (1971) encontraram aumento da Tar de 4,9 a 6,2°C para relevos com elevação de 100 m.

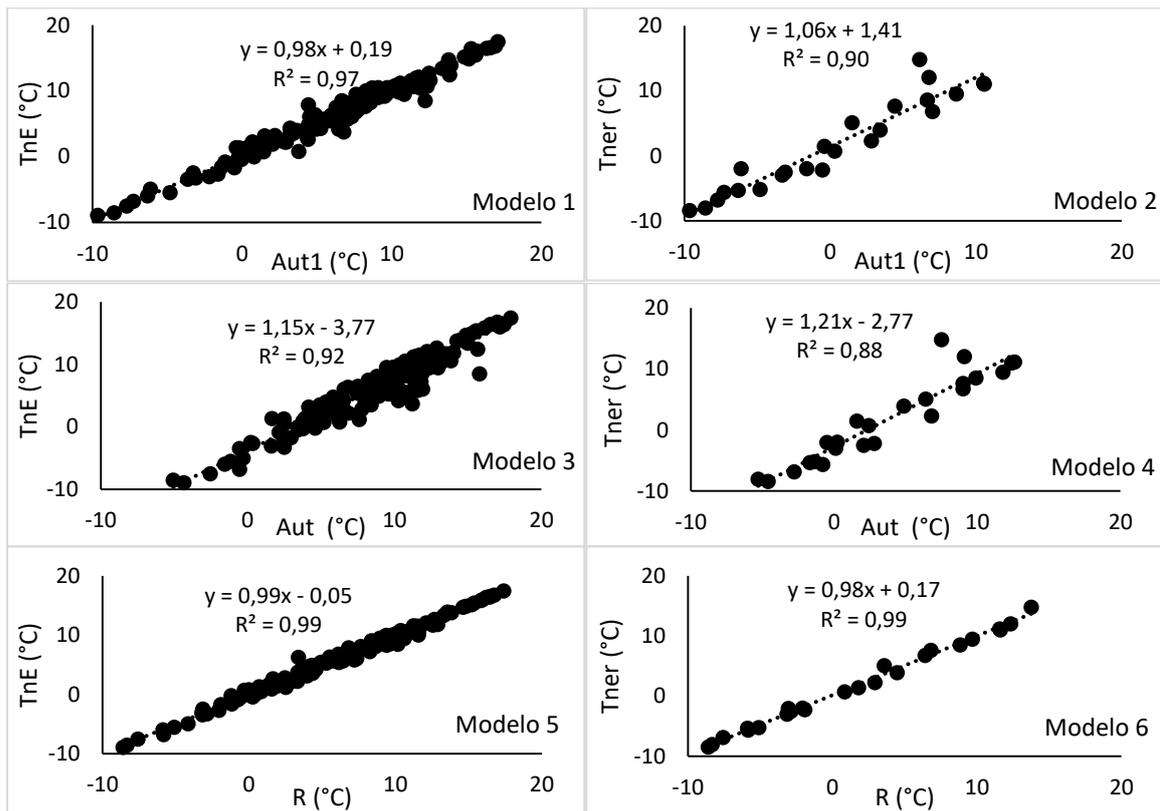
O gradiente entre R e Aut1 foi menor do que entre R e Aut, sendo a Tn média 0,04°C mais alta em Aut1 do que em R. A instalação de Aut e Aut1 foi realizada seguindo os critérios sugeridos por Pedro Jr. et al. (1987), que garantem representatividade local das avaliações meteorológicas. Em função disso, a variação dos gradientes entre R e Aut1 e R e Aut, se deve às características do local, tais como declividade, cobertura da superfície e orientação da exposição do declive (BOOTSMA, 1996; KALMA et al., 1992), de tal modo que o resfriamento do ar em Aut1 foi favorecido em relação a Aut.

Apesar do efeito do relevo no gradiente térmico horizontal, a conformação topográfica do local em que se realizou o experimento representa o relevo encontrado na maioria das propriedades agrícolas da região sul do Brasil. Portanto, o efeito da topografia na variação horizontal da temperatura do ar entre R e as estações retratam as diferenças encontradas em dias frios e com ocorrência de geada na referida região. Dessa forma, a geração de modelos para estimativa de TnE e Tner com dados coletados em depressão do terreno, permite fazer inferências para condições de frio extremo enfrentadas na região sul do Brasil e grande parte do sul do continente americano, onde as geadas são, geralmente, de radiação.

Nesse sentido, o coeficiente angular de todos modelos gerados com a Tn de Aut, Aut1 e R na variável independente foram significativos (Tabela 3 e Figura 8; Tabela 3 e Figura 9). O coeficiente linear dos modelos 2, 3 e 4 foram todos significativos (Tabela 3 e Figura 8), enquanto para as datas em que a Tn em R foi menor que 5°C, foram significativos os coeficientes lineares dos modelos para estimativa da Tner e TnE em função de Aut (Tabela 3 e Figura 9). Os modelos gerados com todos dados de Tn em 2016 apresentaram coeficiente angular para estimativa da TnE de 0,98 a 1,15 e para estimativa de Tner de 0,98 a 1,21 (Tabela 3 e Figura 8). O coeficiente linear dos modelos para estimativa da TnE variou de -3,77 a 0,19 e para Tner variou de -2,77 a 1,41 (Tabela 3 e Figura 8).

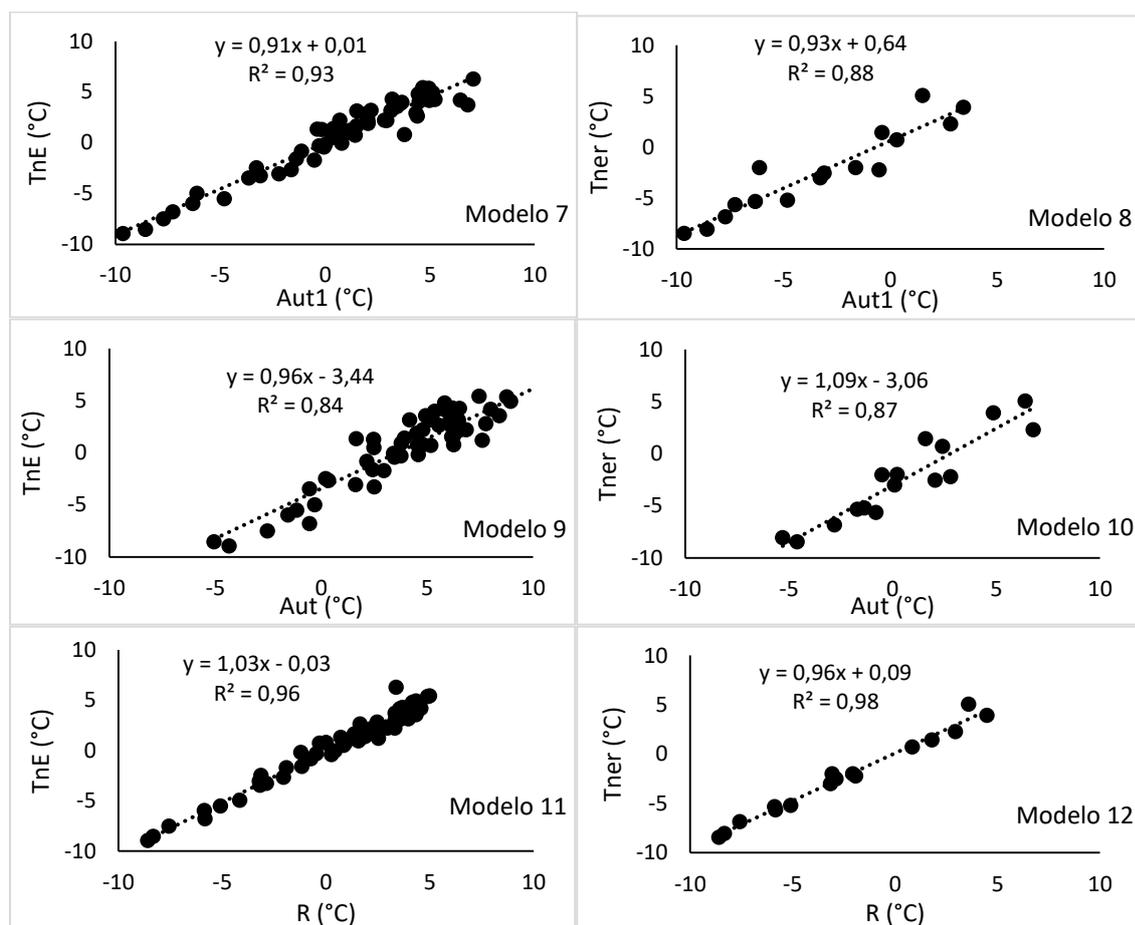
Desta forma, o modelo 3, gerado com todos os dados de Tn no ano de 2016, e o modelo 9, gerado com dados de datas em que a Tn foi menor que 5°C em R, apresentaram as condições estatísticas mais adequadas (coeficiente linear e angular da regressão significativo) para estimativa da TnE (Tabela 3 e Figura 8). Os modelos 2 e 4, gerados com todos os dados de Tn no ano de 2016, e o modelo 10, gerado com dados de datas em que a Tn foi menor que 5°C em R, apresentaram os parâmetros estatísticos mais adequados para estimativa da Tner (Tabela 3 e Figura 9).

Figura 8 - Visualização gráfica dos modelos de regressão da Tabela 3, entre temperatura mínima do ar na estação meteorológica automática em Passo Fundo (Aut1) e temperatura mínima do ar próximo às estruturas reprodutivas (TnE) (Modelo 1), Aut1 e temperatura mínima das estruturas reprodutivas (Tner) (Modelo 2), Aut e TnE (Modelo 3), Aut e Tner (Modelo 4), R e TnE (Modelo 5), R e Tner (Modelo 6) durante o período reprodutivo da canola no ano de 2016. Passo Fundo, RS – 2019.



Fonte: Autor

Figura 9 - Visualização gráfica dos modelos de regressão da Tabela 3, entre temperatura mínima do ar na estação meteorológica automática em Passo Fundo (Aut1) e temperatura mínima do ar próximo às estruturas reprodutivas (TnE) (Modelo 7), Aut1 e temperatura mínima das estruturas reprodutivas (Tner) (Modelo 8), Aut e TnE (Modelo 9), Aut e Tner (Modelo 10), R e TnE (Modelo 11), R e Tner (Modelo 12), em dias com temperatura mínima do ar menor que 5°C em R, em dias com temperatura mínima do ar menor que 5°C, no ano de 2016. Passo Fundo, RS – 2019.



Fonte: Autor

4.5.6 Validação dos modelos de estimativa da temperatura mínima do ar e das estruturas reprodutivas

Os modelos 3 e 9 (Tabela 3; Figura 8 e 9), para estimativa da TnE, e os modelos 2, 4 e 10 (Tabela 3; Figura 8 e 9), para estimativa da Tner, *a priori*, foram considerados adequados para estimativa de Tn para seus respectivos níveis, uma vez que os mesmos podem estimar valores de temperatura com menores erros, sendo mais significativos na estimativa. Porém, independentemente da significância dos coeficientes dos modelos, a estatística de validação de todos os modelos é apresentada

Os coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a TnE e Tner observadas e estimadas por todos os modelos ($r > 0,86$), para o ano de 2017, foram significativos (Tabela 4). Além disso, os modelos gerados em função de Aut e R para estimativa de TnE e Tner, e validados com os dados de Tn em Aut1 de 2017 (modelos 3, 5, 9 e 11, para estimativa da TnE e modelos 4, 6, 10 e 12, para estimativa da Tner), apresentaram coeficiente de correlação de Pearson (r) entre a TnE e Tner observadas significativos ($r > 0,89$). A alta correlação indica que os modelos apresentam potencial de estimativa de valores de TnE e Tner, com grande representatividade em relação aos valores observados. Os modelos 5, 7 e 11, para estimativa da TnE, e os modelos 2, 6 e 10, para estimativa da Tner, apresentaram o coeficiente angular não diferente de 1 (Tabela 4). Porém, somente o modelo 10, para estimativa da Tner, apresentou o coeficiente linear não diferente de 0 (Tabela 4). Para estimativa da TnE, em função dos dados de Aut1 em 2017, o coeficiente angular dos modelos 9 e 11 não diferiram de 1 e o coeficiente linear de todos os modelos diferiram de 0. Para estimativa da Tner, em função dos dados de Aut1 em 2017, os coeficientes angular e linear dos modelos 4 e 10 não diferiram de 1 e 0, respectivamente (Tabela 5). A maioria destes modelos atenderam aos critérios das estatísticas de validação, considerando os parâmetros r , R^2 e intervalo de confiança, mesmo com o coeficiente linear apresentando-se diferente de 0.

A dispersão dos valores de Tn observados e estimados em torno da linha de tendência foi baixa, uma vez que o coeficiente de determinação (R^2) foi sempre maior que 0,74 (Tabela 4 e 5). Além disso, verificou-se menor dispersão dos dados quando foram considerados todos os dados de Tn para geração e validação dos modelos do que quando se adotou alguma restrição (Tabela 4 e 5) provavelmente porque quando não foram utilizadas restrições a abrangência dos modelos foi maior e permitiu melhor ajuste. De forma geral, a dispersão foi menor quando os dados de TnE e Tner foram estimados por R do que por Aut1 e Aut (Tabela 4 e 5), pelo fato de que R foi posicionada junto ao experimento e, conseqüentemente, apresentou melhor ajuste com a Tn no dossel.

Tabela 4 - Coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), coeficiente de determinação (R^2) e intervalo de confiança dos coeficientes dos coeficientes a e b associados a validação dos modelos de regressão entre a temperatura mínima do ar observada (TnE/o) e temperatura mínima do ar estimada (TnE/e) pelo modelo 1 (M1), temperatura mínima das estruturas reprodutivas observada (Tner/o) e temperatura mínima das estruturas reprodutivas estimada (Tner/e) pelo modelo 2 (M2), TnE/o e TnE/e pelo modelo 3 (M3), Tner/o e Tner/e pelo modelo 4 (M4), TnE/o e TnE/e pelo modelo 5 (M5) e Tner/o e Tner/e pelo modelo 6 (M6) durante o período reprodutivo da canola, TnE/o e TnE/e pelo modelo 7 (M7), Tner/o e Tner/e pelo modelo 8 (M8), TnE/o e TnE/e pelo modelo 9 (M9), Tner/o e Tner/e pelo modelo 10 (M10), TnE/o e TnE/e pelo modelo 11 (M11) e Tner/o e Tner/e pelo modelo 12 (M12), em dias com temperatura mínima do ar menor que 5°C durante o período reprodutivo da canola, no ano de 2017. Passo Fundo, RS – 2019. ^(a)

Todo período reprodutivo da canola									
Modelo e origem dados para estimativa	Variável estimada	r	Parâmetros		R^2	a		b	
			a	b		Intervalo de confiança		Intervalo de confiança	
						Inferior	Superior	Inferior	Superior
M1. Aut1	TnE/e	0,97*	-1,94 ^{ns}	1,08 ^{ns}	0,93	-2,53	-1,35	1,03	1,13
M2. Aut1	Tner/e	0,98*	-3,73 ^{ns}	1,06*	0,97	-5,01	-2,45	0,93	1,18
M3. Aut	TnE/e	0,94*	1,97 ^{ns}	0,83 ^{ns}	0,88	1,38	2,55	0,77	0,88
M4. Aut	Tner/e	0,99*	1,39 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,99	0,83	1,95	0,80	0,93
M5. R	TnE/e	0,99*	-1,05 ^{ns}	1,04*	0,99	-1,27	-0,82	1,02	1,06
M6. R	Tner/e	0,99*	-1,45 ^{ns}	1,09*	0,99	-1,96	-0,94	1,03	1,16
Dias com temperatura mínima do ar menor que 5°C em R									
M7. Aut1	TnE/e	0,89*	-1,86 ^{ns}	0,88*	0,79	-3,09	-0,62	0,58	1,18
M8. Aut1	Tner/e	0,98*	3,01 ^{ns}	1,20 ^{ns}	0,97	-4,22	-1,80	1,06	1,34
M9. Aut	TnE/e	0,86*	0,98 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,74	0,08	1,89	0,37	0,84
M10. Aut	Tner/e	0,95*	-0,49*	1,16*	0,99	-2,40	1,42	0,89	1,43
M11. R	TnE/e	0,99*	-1,15 ^{ns}	0,95*	0,98	-1,46	-0,84	0,86	1,04
M12. R	Tner/e	0,99*	-1,36 ^{ns}	1,12 ^{ns}	0,99	-1,87	-0,85	1,05	1,18

^a Modelos conforme descrição na Tabela 4;

*coeficiente significativo pelo teste t a 5% de probabilidade de erro;

^{ns}: coeficiente não significativo pelo teste t a 5% de probabilidade de erro;

Tabela 5 - Coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), coeficiente de determinação (R^2) e intervalo de confiança dos coeficientes dos coeficientes a e b associados a validação dos modelos de regressão entre a temperatura mínima do ar observada (TnE/o) e estimada (TnE/e) próximo às estruturas reprodutivas pelo modelo 3 (M3), temperatura mínima das estruturas reprodutivas observada (Tner/o) e estimada (Tner/e) pelo modelo 4 (M4), TnE/o e TnE/e pelo modelo 5 (M5), Tner/o e Tner/e pelo modelo 6 (M6), durante o período reprodutivo da canola, TnE/o e TnE/e pelo modelo 9 (M9), Tner/o e Tner/e pelo modelo 10 (M10), TnE/o e TnE/e pelo modelo 11 (M11) e Tner/o e Tner/e pelo modelo 12 (M12) em dias com temperatura mínima do ar menor que 5°C durante o período reprodutivo da canola, em função dos dados de estação meteorológica automática em Passo Fundo (Aut1), no ano de 2017. Passo Fundo, RS – 2019.

Modelo e Origem dados para estimativa	Variável estimada	r	Parâmetros		R^2	a		b	
			a	b		Intervalo de confiança		Intervalo de confiança	
						Inferior	Superior	Inferior	Superior
M3. Aut1	TnE/e	0,97*	1,73 ^{ns}	0,92 ^{ns}	0,93	1,30	2,16	0,88	0,96
M4. Aut1	Tner/e	0,98*	0,34*	0,93*	0,97	-0,57	1,25	0,82	1,04
M5. Aut1	TnE/e	0,97*	-1,68 ^{ns}	1,06 ^{ns}	0,93	-2,26	-1,10	1,01	1,11
M6. Aut1	Tner/e	0,98*	-2,45 ^{ns}	1,14 ^{ns}	0,97	-3,60	-1,29	1,01	1,28
M9. Aut1	TnE/e	0,89*	1,09 ^{ns}	0,83*	0,78	0,26	1,92	0,56	1,12
M10. Aut1	Tner/e	0,98*	0,90*	1,03*	0,97	0,02	1,77	0,91	1,15
M11. Aut1	TnE/e	0,89*	-1,75 ^{ns}	0,78*	0,78	-2,96	-0,55	0,51	1,05
M12. Aut1	Tner/e	0,98*	-2,36 ^{ns}	1,17 ^{ns}	0,97	-3,50	-1,21	1,03	1,30

*coeficiente significativo pelo teste t a 5% de probabilidade de erro;

^{ns}: coeficiente não significativo pelo teste t a 5% de probabilidade de erro;

As regressões entre os valores observados e estimados pelos modelos, para o ano de 2017, confirmam a tendência do que os coeficientes angular e linear dos modelos indicam (Figura 10; Figura 11; Figura 12; Figura 13). Os modelos gerados em função de Tn em Aut1 (modelo 1 e 2) superestimaram os valores de TnE e Tner no ano de 2017, uma vez que a estimativa de TnE e Tner a partir de Aut1 foi, em média, 1,10 e 3,24°C mais elevada do que a observada, enquanto os modelos gerados a partir de Aut (modelo 5 e 6) subestimaram os valores de TnE e Tner, principalmente os valores mais baixos (Figura 10 e Apêndice I). A estimativa de TnE e Tner a partir de Aut foi, em média, 0,31 e 0,75°C mais baixa do que a observada (Figura 10 e Apêndice I). Os modelos em função de R (modelo 8 e 9) superestimaram os valores de TnE e Tner, sendo os valores médios estimados 0,58 e 0,85°C mais elevados do que os observados (Figura 10 e Apêndice I).

Na validação dos modelos para dias com Tn inferior a 5°C, verificou-se que os modelos gerados em função de Aut1 (modelo 11 e 12) superestimaram os valores de TnE e Tner, sendo que os valores médios da estimativa foram 2,22 e 1,58°C mais elevados do

que os observados (Figura 11 e Apêndice J). Os modelos obtidos a partir dos dados de Tn em Aut (modelo 9 e 10) subestimaram os valores de TnE e Tner, principalmente para valores mais baixos de TnE (Figura 11 e Apêndice J). Os modelos para estimativa de TnE e Tner (modelo 11 e 12) gerados em função de R superestimaram os valores (Figura 11 e Apêndice J).

Na validação dos modelos obtidos em função de Tn em Aut e R, para os dados de Tn em Aut1, no ano de 2017, verificou-se que os modelos obtidos em função de Aut subestimaram TnE e Tner, enquanto os modelos obtidos em função de R subestimaram TnE e Tner (Figura 12 e Apêndice L), sendo que a mesma tendência foi verificada quando a validação foi realizada para dias com Tn inferior a 5°C (Figura 13 e Apêndice M).

Assim como neste trabalho, Bootsma (1976) também encontrou regressões significativas para os locais com cota mais baixa no terreno, porém, em função da diferença de Tar entre a estação meteorológica e os níveis mais baixos do terreno, estas regressões apresentaram menor precisão. O erro de estimativa da Tn variou de 0,8°C para topo de colinas a 2,3°C para fundos de vales. Tabony (1985) também relatou dificuldade para estimar a distribuição espacial da Tn no Reino Unido, atribuindo à topografia a baixa precisão de seus modelos, que explicaram de 50 a 60% os valores de Tn.

O índice de Bias também apontou tendência dos modelos gerados em função de Aut1 e R de superestimarem os valores, enquanto os modelos gerados a partir de Aut apresentaram tendência de subestimarem os valores. O índice de Bias variou de 0,11 a 2,78 para as estimativas realizadas por Aut1, foi de -1,38 a 0,01 para as estimativas realizadas por Aut e de 0,06 a 3,10 para R (Tabela 6 e 7). O índice de Bias avalia os desvios dos valores estimados em relação aos observados, sendo que quanto mais próximo a 0, menores são os desvios dos valores estimados. Os limites na variação do índice de Bias indicam que os desvios dos valores estimados em função dos modelos gerados pela Tn na Aut são menores do que os desvios dos valores estimados pelos modelos gerados a partir da Tn em Aut1 e R (Tabela 6 e 7).

Apesar dessas tendências verificadas nos modelos, os mesmos apresentaram alto grau de exatidão, de acordo com o índice de concordância d. Os valores de d foram maiores que 0,90 em todos os modelos de estimativa de TnE e Tner, exceto pela TnE estimada pelo modelo 11 a partir de dados de Aut1 (Tabela 6 e 7).

A raiz quadrada média do erro (RQME) e o erro absoluto médio (EAM) entre os valores observados e estimados de TnE e Tner foram menores quando estimados por R do que Aut1 e Aut (Tabela 6 e 7), sendo os mesmos especialmente altos para os modelos

obtidos a partir de Aut1. Essa tendência não foi verificada para a validação dos modelos utilizando dados de Aut1 (Tabela 6 e 7), quando não houve distinção de valores de RQME e EAM entre os modelos. Além disso, na decomposição dos erros associados às estimativas dos modelos, o MSE_s foi menor do que o MSE_a para todos os modelos (Tabela 6 e 7). O MSE_s menor do que o MSE_a é a condição desejável para modelos de estimativa, pois indica que os mesmos não possuem erros associados a medição dos dados ou geração dos modelos (WILLMOTT et al., 1985).

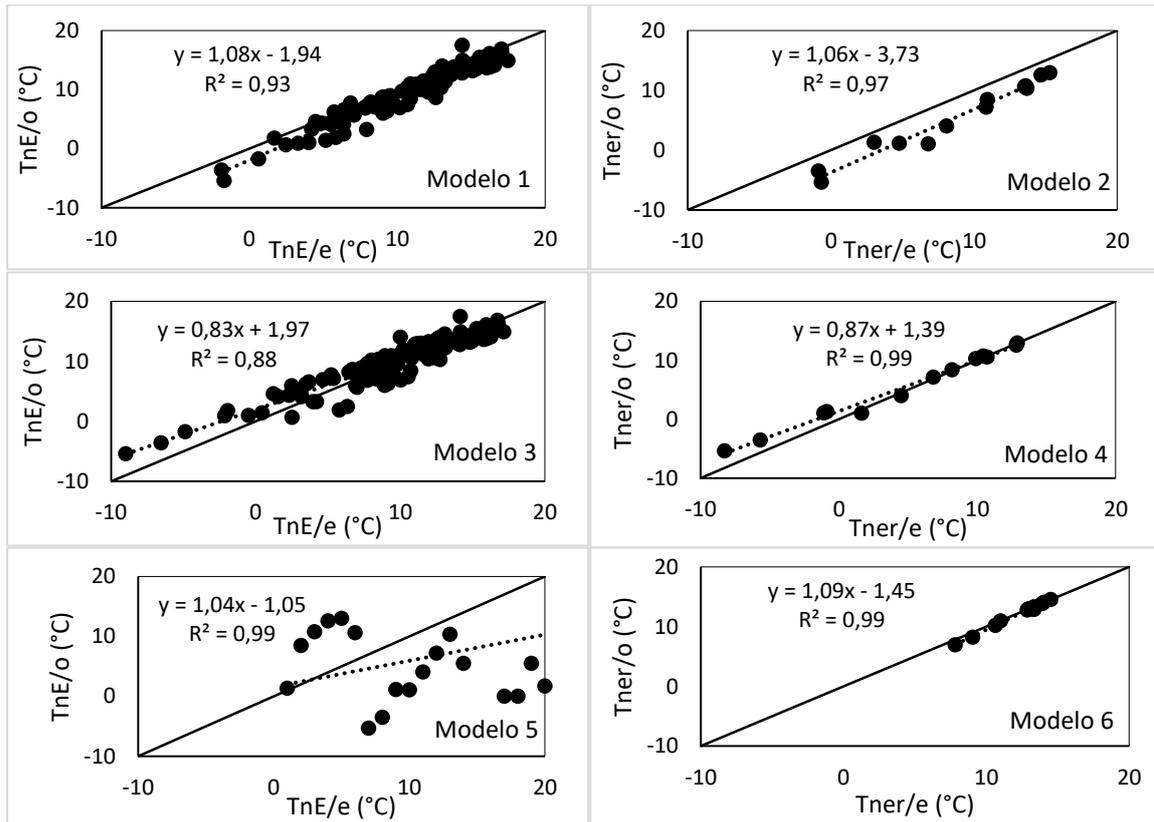
Tabela 6 - Erro médio absoluto (EAM), raiz quadrada média do erro (RQME), índice de Willmott (d), índice BIAS (BIAS), erro quadrático médio aleatório (MSE_a) e erro quadrático médio sistemático (MSE_s) associados a validação dos modelos de regressão entre a temperatura mínima do ar observada (TnE/o) e temperatura mínima do ar (TnE/e) pelo modelo 1 (M1), temperatura mínima das estruturas reprodutivas observada (Tner/o) e temperatura mínima das estruturas reprodutivas estimada (Tner/e) pelo modelo 2 (M2), TnE/o e TnE/e pelo modelo 3 (M3), Tner/o e Tner/e pelo modelo 4 (M4), TnE/o e TnE/e pelo modelo 5 (M5) e Tner/o e Tner/e pelo modelo 6 (M6), durante o período reprodutivo da canola, TnE/o e TnE/e pelo modelo 7 (M7), Tner/o e Tner/e pelo modelo 8 (M8), TnE/o e TnE/e pelo modelo 9 (M9), Tner/o e Tner/e pelo modelo 10 (M10), TnE/o e TnE/e pelo modelo 11 (M11) e Tner/o e Tner/e pelo modelo 12 (M12), em dias com temperatura mínima do ar menor que 5°C durante o período reprodutivo da canola, no ano de 2017. Passo Fundo, RS – 2019.^(a)

Todo período reprodutivo da canola							
Modelo e Origem dados para estimativa	Variável estimada	EAM	RQME	d	BIAS	MSE_a	MSE_s
M1. Aut1	TnE/e	1,22	1,59	0,96	0,11	6,31	1,15
M2. Aut1	Tner/e	3,24	3,41	0,92	0,59	45,87	11,80
M3. Aut	TnE/e	1,45	1,75	0,96	-0,03	4,20	0,61
M4. Aut	Tner/e	0,96	1,37	0,99	-0,14	5,19	1,05
M5. R	TnE/e	0,63	0,76	0,99	0,06	1,75	0,40
M6. R	Tner/e	0,87	1,10	0,99	0,15	4,56	1,17
Dias com temperatura mínima do ar menor que 5°C em R							
M7. Aut1	TnE/e	2,27	2,56	0,80	2,78	18,96	3,92
M8. Aut1	Tner/e	1,64	2,12	0,96	0,29	18,18	5,01
M9. Aut	TnE/e	2,06	2,32	0,87	-1,38	6,62	2,82
M10. Aut	Tner/e	1,73	1,89	0,98	-0,08	6,39	2,57
M11. R	TnE/e	1,24	1,30	0,95	1,56	6,09	1,42
M12. R	Tner/e	0,79	1,02	0,99	0,12	3,83	0,98

Tabela 7 - Erro médio absoluto (EAM), raiz quadrada média do erro (RQME), índice de Wilmott (d), índice BIAS (BIAS), erro quadrático médio aleatório (MSE_a) e erro quadrático médio sistemático (MSE_s) associados a validação dos modelos de regressão entre a temperatura mínima do ar observada (TnE/o) e estimada (TnE/e) próximo às estruturas reprodutivas pelo modelo 3 (A), temperatura mínima das estruturas reprodutivas observada (Tner/o) e estimada (Tner/e) pelo modelo 4 (B), TnE/o e TnE/e pelo modelo 5 (C), Tner/o e Tner/e pelo modelo 6 (D), durante o período reprodutivo da canola, TnE/o e TnE/e pelo modelo 9 (E), Tner/o e Tner/e pelo modelo 10 (F), TnE/o e TnE/e pelo modelo 11 (G) e Tner/o e Tner/e pelo modelo 12 (H), em dias com temperatura mínima do ar menor que 5°C durante o período reprodutivo da canola, no ano de 2017, em função dos dados de estação meteorológica automática em Passo Fundo (Aut1) no ano de 2017. Passo Fundo, RS – 2019.

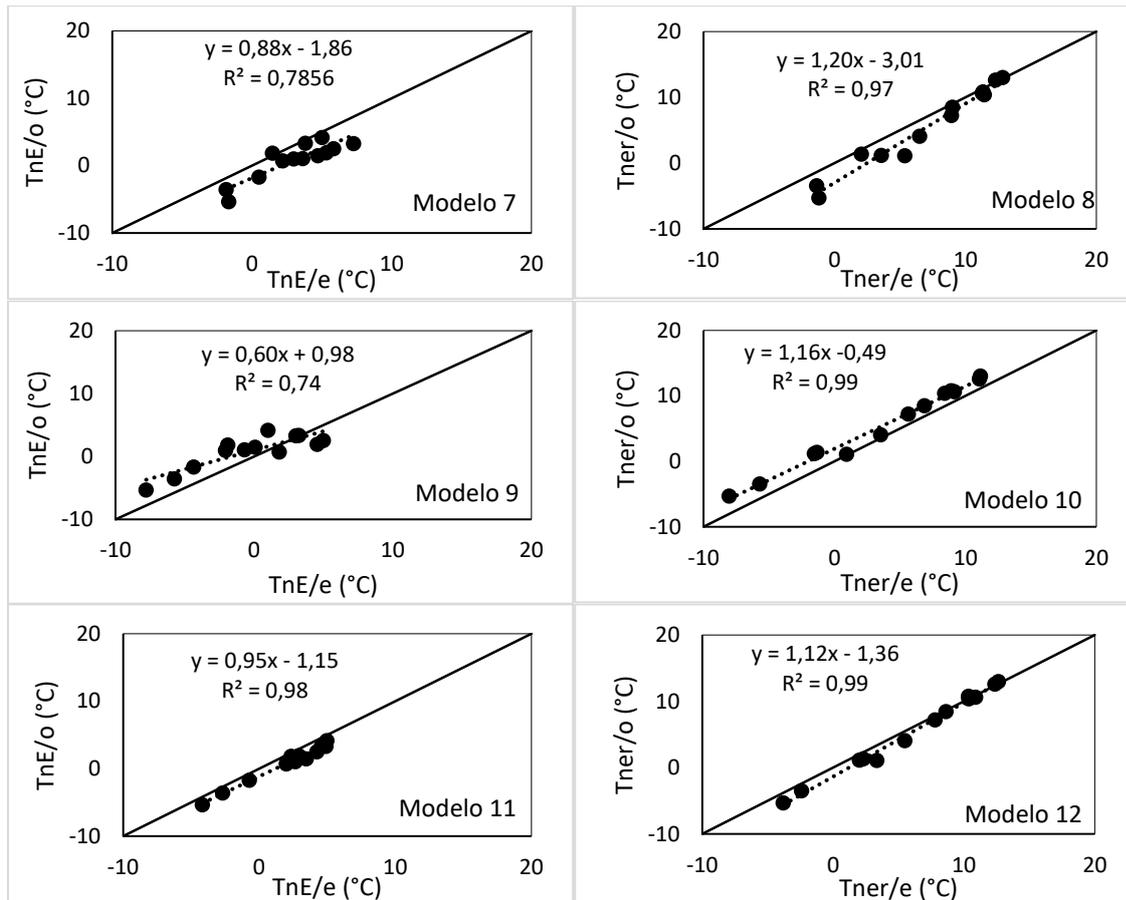
Modelo e Origem dados para estimativa	Variável estimada	EAM	RQME	d	BIAS	MSE_a	MSE_s
M3. Aut1	TnE/e	1,30	1,54	0,97	-0,10	5,26	0,97
M4. Aut1	Tner/e	0,80	1,11	0,99	0,01	1,57	0,16
M5. Aut1	TnE/e	1,15	1,51	0,97	0,10	5,87	1,19
M6. Aut1	Tner/e	1,46	1,92	0,97	0,26	13,42	3,45
M9. Aut1	TnE/e	1,34	1,75	0,90	-1,44	6,26	1,12
M10. Aut1	Tner/e	1,26	1,46	0,98	-0,19	5,51	1,13
M11. Aut1	TnE/e	2,51	2,84	0,78	3,10	21,67	4,06
M12. Aut1	Tner/e	1,35	1,80	0,97	0,22	11,78	3,03

Figura 10 - Visualização gráfica dos modelos de regressão da Tabela 4, entre a temperatura mínima do ar observada (TnE/o) e temperatura mínima do ar estimada (TnE/e) pelo modelo 1 (Modelo 1), temperatura mínima das estruturas reprodutivas observada (Tner/o) e temperatura mínima das estruturas reprodutivas estimada (Tner/e) pelo modelo 2 (Modelo 2), TnE/o e TnE/e pelo modelo 3 (Modelo 3), Tner/o e Tner/e pelo modelo 4 (Modelo 4), TnE/o e TnE/e pelo modelo 5 (Modelo 5) e Tner/o e Tner/e pelo modelo 6 (Modelo 6) durante o período reprodutivo da canola, no ano de 2017. Passo Fundo, RS – 2019.



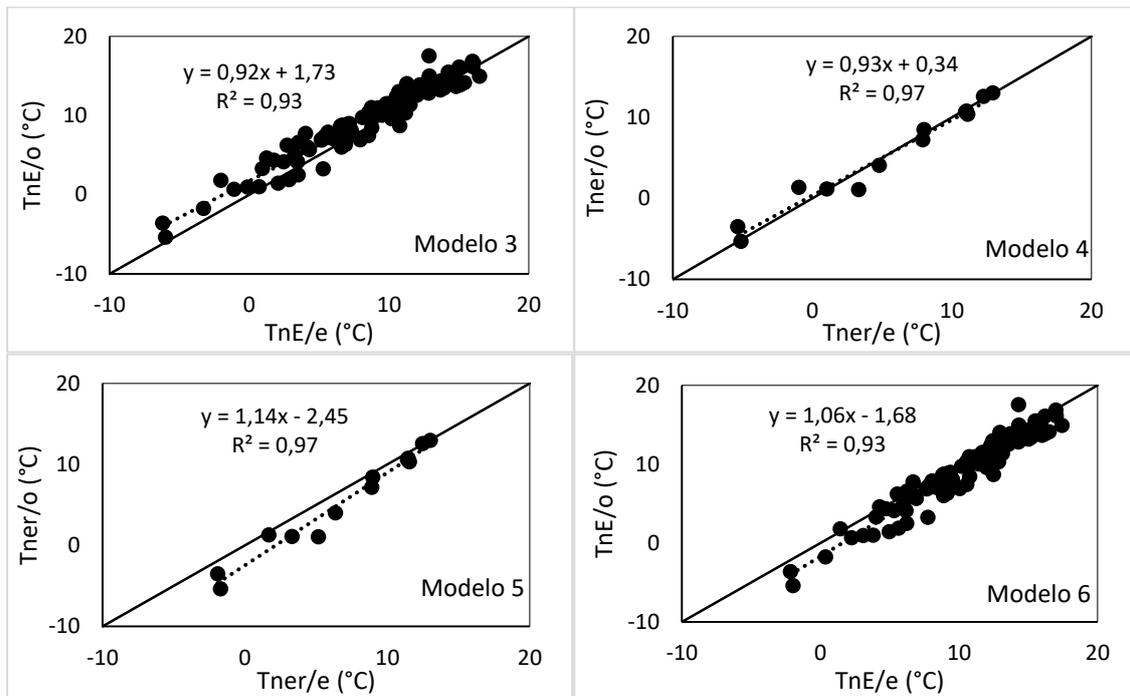
Fonte: Autor

Figura 11 - Visualização gráfica dos modelos de regressão da Tabela 4, entre a temperatura mínima do ar observada (TnE/o) e temperatura mínima do ar (TnE/e) pelo modelo 7 (Modelo 7), TnE/o e TnE/e pelo modelo 9 (Modelo 9), TnE/o e TnE/e pelo modelo 11 (Modelo 11) em dias com temperatura mínima do ar menor que 5°C durante o período reprodutivo da canola, temperatura mínima das estruturas reprodutivas observada (Tner/o) e temperatura mínima das estruturas reprodutivas estimada (Tner/e) pelo modelo 8 (Modelo 8), Tner/o e Tner/e pelo modelo 10 (Modelo 10) e Tner/o e Tner/e pelo modelo 12 (Modelo 12) durante o período reprodutivo da canola, no ano de 2017. Passo Fundo, RS – 2019.



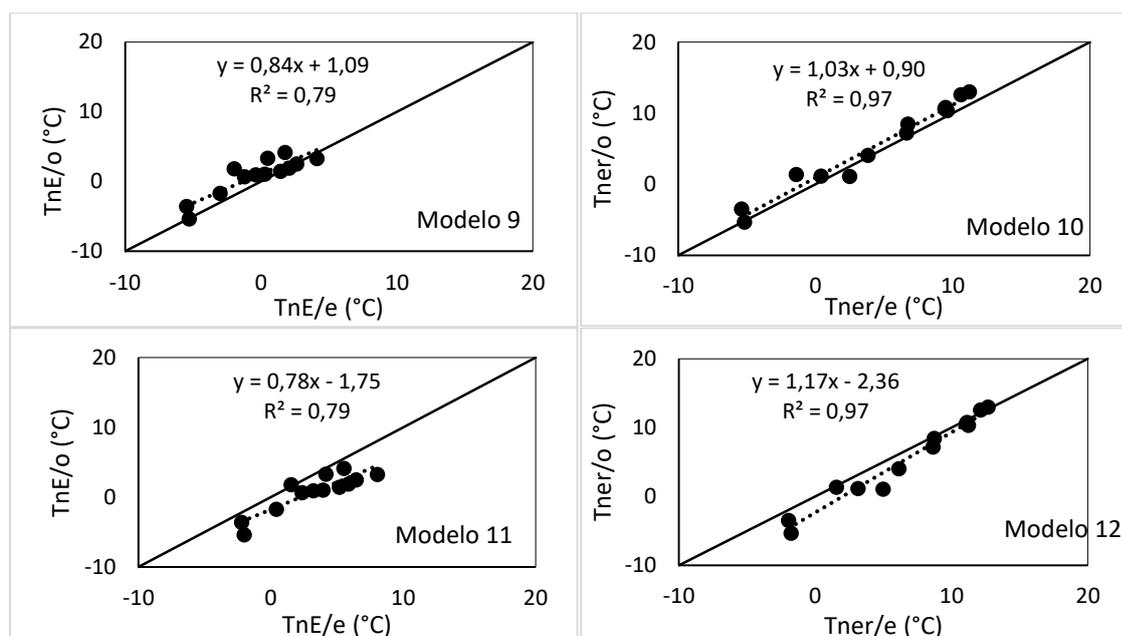
Fonte: Autor

Figura 12 - Visualização gráfica dos modelos de regressão da Tabela 5, entre a temperatura mínima do ar observada (TnE/o) e estimada (TnE/e) próximo às estruturas reprodutivas pelo modelo 3 (Modelo 3), temperatura mínima das estruturas reprodutivas observada (Tner/o) e estimada (Tner/e) pelo modelo 4 (Modelo 4), TnE/o e TnE/e pelo modelo 5 (Modelo 5), Tner/o e Tner/e pelo modelo 6 (Modelo 6), durante o período reprodutivo da canola, em função dos dados de estação meteorológica automática em Passo Fundo – RS, no ano de 2017. Passo Fundo, RS – 2019.



Fonte: Autor

Figura 13 - Visualização gráfica dos modelos de regressão da Tabela 5, entre temperatura mínima do ar observada (TnE/o) e estimada (TnE/e) próximo às estruturas reprodutivas pelo modelo 9 (Modelo 9), TnE/o e TnE/e pelo modelo 11 (Modelo 11), durante o período reprodutivo da canola, temperatura mínima das estruturas reprodutivas observada (Tner/o) e estimada (Tner/e) pelo modelo 10 (Modelo 10), e Tner/o e Tner/e pelo modelo 12 (Modelo 12), em dias com temperatura mínima do ar menor que 5°C durante o período reprodutivo da canola, em função dos dados de estação meteorológica automática em Passo Fundo – RS, no ano de 2017. Passo Fundo, RS – 2019.



Fonte: Autor

Portanto, em função dos resultados obtidos na validação dos modelos e nas estatísticas complementares, verificou-se que, de forma geral, os erros de estimativa foram menores quando se consideraram os dados de Tn de todo o período experimental. Considerando os dados de Tn de todo o período experimental, o modelo 4, para estimativa da Tner, em função dos dados de Aut1 atendeu todas as estatísticas de avaliação de desempenho. O modelo 2 e 3, embora tenham apresentado as estatísticas de avaliação de desempenho satisfatórias, apresentaram o coeficiente angular diferente de 1 ou o coeficiente linear diferente de 0.

Para datas com Tn menor que 5°C, o modelo 10, para estimativa da Tner em função de Aut, atendeu todas as estatísticas de validação do modelo. O modelo também mostrou-se eficiente para estimativa da Tner com os dados de Tn de Aut1. O modelo 9, para estimativa da TnE em função de Aut, atendeu todas as estatísticas de avaliação de

desempenho, porém, apresentou o coeficiente angular diferente de 1 ou o coeficiente linear diferente de 0.

4.6 CONCLUSÕES

- a) A temperatura mínima do ar (T_n) no dossel de plantas de canola, em noites com ocorrência de geada, acontece no terço superior do dossel, expondo as estruturas reprodutivas da canola à máxima intensidade de frio nestas datas;
- b) Os menores valores de temperatura média do ar ocorrem no nível de 40 cm no dossel, no decorrer das noites que originam geadas severas (GT) e geadas moderadas (GM). Em noites de geada fraca (GF) e noites frias sem geada com temperatura do ar menor do que 5°C (DF) o perfil vertical de temperatura média do ar no dossel de canola é isotérmico, principalmente devido a maior velocidade do vento;
- c) É possível estimar a temperatura mínima do ar próximo às estruturas reprodutivas (T_{nE}) e a temperatura mínima das estruturas reprodutivas da canola (T_{ner}), em datas com ocorrência de geada, em função da temperatura mínima do ar (T_n) medida em estações meteorológicas;
- d) O modelo $T_{ner} = 1,21(T_n \text{ Aut}) - 2,77$, para T_n durante todo o período reprodutivo da canola, e o modelo $T_{ner} = 1,09(T_n \text{ Aut}) - 3,06$, apenas para dias com T_n menor que 5°C , podem ser usados para estimar a temperatura mínima das estruturas reprodutivas em dias com ocorrência de geada.

4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENDES, M.O. de O. Temperaturas mínimas próximas ao solo em Pelotas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 4. Londrina, 1985. **Anais...**, Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/ Fundação Instituto Agrônômico. 1985.

AGUIAR, D.; MENDONÇA, M. Climatologia das geadas em Santa Catarina. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1. Florianópolis. **Anais...** GEDN/UFSC, 2004. p.762-773, 2004.

ALFONSI, R.R.; PINTO, H.S.; PEDRO JÚNIOR, M.J. Estimativas das normais de temperaturas média mensal e anual do Estado de Goiás (BR) em função de altitude e latitude. **Caderno de Ciências da Terra**, v.45, p.1-6, 1974.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n.6, p. 711-728, 2013.

ARAÚJO, C. E. S. de. et al. **Previsão de geadas em Santa Catarina**. Florianópolis – SC: Epagri, 2009. 11p. (Relatório do Projeto: Previsão de eventos extremos no sul do Brasil – FINEP 14). Disponível em: <http://www.ciram.com.br/finep14/recursos/Rel_Finep14_Geada.pdf> Acesso em: 18/09/2018.

BALDOCCHI, D.B., VERMA, S.B., ROSENBERG, N.J. Microclimate in the soybean canopy. **Agricultural Meteorology**, v.28, p.321–337, 1983.

BOOTSMA, A. Estimating grass minimum temperatures from screen minimum values and others climatological parameters. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v.16, p.103-113, 1976a.

BROWN, K.W.; COVEY, W. The energy-budget evaluation of the micrometeorological transfer processes within a cornfield. **Agricultural Meteorology**, v.3, p.73-96, 1966.

BURIOL, G.A. et al. Estimativa das médias das temperaturas máximas mensais e anuais do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v.3, p.131-150, 1973.

BURIOL, G.A. et al. Estimativa das médias das temperaturas máximas mensais e anuais do Estado de Santa Catarina. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v.4, p.81-102, 1974.

CARRAFA, M. et al. Características agronômicas e rendimento de grãos de genótipos de canola em Três de Maio, RS, 2015. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CANOLA, 1., Passo Fundo. **Anais...** Embrapa, Brasília, DF. p.189-192, 2017.

CARGNELUTTI FILHO, A. et al. Altitude e coordenadas geográficas na estimativa da temperatura mínima média decendial do ar no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.893-901, 2006.

CELLIER, P.; ITIER, B. Un module de prtvision de la temprature minimale nocturne sous abri eta la surface du sol en conditions de geltes radiatives. **Journal Recherches Atmospheriques**, v.18, p.11-22, 1984.

CELLIER, P. An operational model for prediction minimum temperatures near the soil surface under clear sky conditions. **Journal Applied Meteorology**, v.32, p.871-883. 1993.

DALMAGO, G. A., et al. **Zoneamento agroclimático de canola para o Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa trigo, 2008. 76 p.

DALMAGO, G.A. et al. Aclimação ao frio e dano por geada em canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.9, p.933-943, 2010.

EDWARDS, J.; HERTEL, K. **Canola Growth & Development**. New South Wales: Department of Primary Industries, 2011. 89p.

FERREIRA, M. et al. Estimativa das temperaturas médias mensais e anuais do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v.1, p.21-52, 1971.

FERREIRA, M. et al. Estimativa das temperaturas médias mensais e anuais do Estado de Santa Catarina. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v.4, p.19-38, 1974.

FOCHESATTO, E. et al. Interception of solar radiation by the reproductive structures of canola hybrids. **Ciência Rural**, v.46, n.10, p.1790-1796, 2016.

GATES, D. M. **Ecological biophysics**. New York: Springer, 1980. 611p.

GAUCH, J.G.; HWANG, J.T.G. FICK, G.W. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values. **Agronomy Journal**, v.95, p.1442-1446, 2003.

GEIGER, R.; ARON, R.; TODHUNTER, P. **The Climate Near the Ground**. 5. ed. Springer: Braunschweig, Vieweg, 1995. 528p.

GILLESPIE, T. J.; KING, K. M. Nighttime sink strengths and apparent diffusivities within a corn crop. **Ibid.**, v.8, p.59-67, 1971.

GRODZKI, L. et al. Risco de ocorrência de geada no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.1 p.93-99, 1996.

GUSTA, L. V.; WISNIESKI, M. Understanding plant cold hardiness: an opinion. **Physiology Plantarum**, v.147, p.4-14, 2013.

HARRISON, A. A. A discussion of the temperature of inland Kent with particular reference to night minima in the lowlands. **Meteorological Magazine**, v.100, p.97-111, 1971.

HELDWEIN, A. B. et al. Análise das temperaturas mínimas do ar registradas em Santa Maria, RS. I- Estimativa das temperaturas mínimas do ar a 5 cm da superfície do solo relvado e do solo desnudo. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v.18, p.3-14, 1988.

HELDWEIN, A. B. **Determinação do tempo de molhamento de dosséis por orvalho através de métodos micrometeorológicos e convencionais**. 1993. 206f. Tese (Doutorado). Universidade Técnica de Berlin. Berlin, 1993.

HELDWEIN, A. B.; KRZYSCH, G. Estimativas da temperatura e da pressão de vapor d'água do ar no topo de uma cultura de batata. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p.101-105, 1999.

HOCEVAR, A.; MARTSOLF, J. D. Temperature distribution under radiation frost conditions in a central Pennsylvania valley. **Agricultural Meteorology**, v.8, p.371-383, 1971.

JACOBS, A. F. G.; VAN BOXEL, J. H.; EL-KILANI, R. M. M. Nighttime free convection characteristics within a plant canopy. **Boundary-Layer Meteorology**, v.71, p.375-391, 1994.

JACOBS, A. F. G.; VAN BLOXEL, J. H.; NIEVEEN, J. Nighttime exchange processes near the soil surface of a maize canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.82, p.155-169, 1996.

JOHNSON, C. E. et al. Turbulent transfer in a barley canopy. **Agricultural Meteorology**, v.16, p.17-35, 1976.

KALMA, J. D. et al. **Advances in bioclimatology 2. The Bioclimatology of Frost**. Berlin: Springer, 1992. 158p.

KOVALESKI, S. **Efeitos da geadá na canola (*Brassica napus* L.) em função da distribuição da palha na superfície do solo**. 2015. 155f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2015.

LAWRENCE, E. N. Temperature and topography on radiation nights. **Meteorological Magazine**, v.87, p.71-75, 1958.

LEGG, B. J. Turbulent diffusion within a wheat canopy. I: Measurement using nitrous oxide. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.101, p.597-610, 1975.

LEGG, R. J.; LONG, I. F. Turbulent diffusion within a wheat canopy. II. Results and interpretation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.101, p.611-628, 1975.

LHOMME, J. P.; GUILIONI, L. A simple model for minimum crop temperature forecasting during nocturnal cooling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.123, p.55-68, 2004.

LONGLEY, R. W.; LOUIS-BYNE, M. Frost hollows in west central Alberta. Canada Dept. Transp., Toronto. **Meteorol. Branch Circ.**, v.4532, Tec.639, 1967, 15p.

LOOSE, L. H. et al. **Varição vertical da temperatura em dossel de girassol**. In: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2011, Guarapari - ES. Congresso Brasileiro de Melhoramento de Plantas, 2011.

MASSIGNAM, A. M.; DITTRICH, R. C. Estimativa do número e da probabilidade mensal de ocorrência de geadas para o estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.2, p.213-220, 1998.

MCCLINCHEY, S. L.; KOTT, L. S. Production of mutants with high cold tolerance in spring canola (*Brassica napus*). **Euphytica**, v.162, p.51-67, 2008.

MEDEIROS, S. S. et al. Estimativas e espacialização das temperaturas do ar mínimas, médias e máximas na Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.247-255, 2005.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of environmental physics**. 2 ed. New York: Edward Arnold, 1990. 291p.

OLIVEIRA NETO, S. N. de et al. Estimativa de temperaturas mínima, média e máxima do território brasileiro situado entre 16 e 24° latitude sul e 48 e 60° longitude oeste. **Engenharia na Agricultura**, v.10, p.8-17, 2002.

OUELLET, F.; CHARRON, J. **Cold acclimation and freezing tolerance in plants**. In: Encyclopedia of Life Science. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2013.

PEDRO JÚNIOR, M.J.; CAMARGO, M. B. P. de; MACEDO, L. A. Guia para o observador dos postos agrometeorológicos do Instituto Agrônomo. Boletim Técnico. Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, v. 116, p. 1-59, 1987.

PEDRO JÚNIOR, M. J.; CAMARGO, M. B. P. de; MACEDO, L. A. Guia para o observador dos postos agrometeorológicos do Instituto Agrônomo. Boletim Técnico. **Instituto Agrônomo de Campinas**, Campinas, v.116, p.1-59, 1987.

PENMAN, H. L.; LONG, I. F. Weather in wheat: an essay in micrometeorology. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.86, p.16-50, 1960.

PIÑEIRO, G. et al. How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? **Ecological Modelling**, v.216, p.316-322, 2008.

PIELKE, R. A. **Mesoscale Meteorological Modeling**. Academic Press, Orlando, 1984. 612p.

PINTO, H. S.; ORTOLANI, A. A.; ALFONSI, R. R. Estimativa das temperaturas médias mensais do Estado de São Paulo em função de altitude e latitude. **Caderno de Ciências da Terra**, v.23, p.1-20, 1972.

PINTO, H. S.; ALFONSI, R. R. Estimativa das temperaturas médias, máximas e mínimas mensais no Estado do Paraná, em função de altitude e latitude. **Caderno de Ciências da Terra**, v.52, p.1-28, 1974.

RAHN, J. J.; BROWN, D. M. Estimating corn canopy extreme temperatures from shelter values. **Agric. Meteorol.**, v.8, p.129-138, 1971.

REPO, T. et al. Cold acclimation of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) at its northernmost distribution range. **Environmental and Experimental Botany**, v.63, p.59–70, 2008.

ROSENBERG, J. N. **Microclimate: The biological environment**. New York: Wiley & Sons, 1983. 315p.

SARTORI, M. G. B. A dinâmica do Clima do Rio Grande do Sul: indução empírica e conhecimento científico. **Terra Livre**, v.1, n.20, p.27-49, 2003.

SAUGIER, B. Transports turbulents de CO₂ et de vapeur d'eau au-dessus et à l'intérieur de la végétation. Méthodes de mesure micrométéorologiques. **Acta Oecological**, v.5, p.179-223, 1970.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. **Entendendo a geada, 2012**. Disponível em <<http://www.climaonline.com.br/artigo03.php>> Acesso em: 14 setembro 2018.

SILVA, J. G.; SENTELHAS, P. C. Diferença de temperatura mínima do ar medida no abrigo e na relva e probabilidade de sua ocorrência em eventos de geada no Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.1, p.9-15, 2001.

SILVA, E. P. et al. Fatores abióticos envolvidos na tolerância de trigo a geada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n.10, p.1257-1265, 2008.

SILVA, A.; MINUZZI, R. B. Modelagem estatística para previsão de geada de radiação. **Ciência e Natura**, v.38, p.1453-1460, 2016.

SMITH, E.P; ROSE, K.A. Model goodness-of-fit analysis using regression and related techniques. **Ecological Modelling**, v.77, p.49-64, 1995.

SNYDER, R. L.; MELO-ABREU, J. P. **Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía**. Roma: Organización das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO), 2010. 242p.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre, Emater/RS, 2008. 222 p

TABONY, R. C. Relations between minimum temperatures and topography in Great Britain. **Journal of Climatology**, v.5, p.503-520, 1985.

TAKASHIMA, N. E. et al. Environmental factors affecting yield variability in spring and winter rapeseed genotypes cultivated in the southeastern Argentine Pampas. **European Journal of Agronomy**, v.48, p.88-100, 2013.

TAZZO, I. F. et al. Variação vertical da temperatura do ar em cultivos de batata. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.5, p. 486-492, 2008.

THOMAS, P. The growers' manual: Canola Council of Canada, 2014. Disponível em: <<http://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/crop-development/growth-tages/>>. Acesso em 20 de setembro de 2018.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, n.2, p.184-194, 1981.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v.63, n.11, 1982.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.8995-9005, 1985.

WILLMOTT, C.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v.30, p.79–82, 2005.

WINKEL, T. et al. Assessing the protective effect of vertically heterogeneous canopies against radiative frost: the case of quinoa on the Andean Altiplano. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.1759-1768, 2009.

5 ARTIGO 3 – QUANTIFICAÇÃO E MODELAGEM DE DANOS CAUSADOS POR GEADA EM ÓRGÃOS REPRODUTIVOS DA CANOLA

5.1 RESUMO

Os objetivos deste trabalho foram quantificar e modelar danos causados por geadas em órgãos reprodutivos da canola. Foram realizados dois experimentos à campo, nos anos de 2016 e 2017. Originalmente, os experimentos foram conduzidos em delineamento experimental em blocos ao acaso, com parcela subdividida e arranjo fatorial. As análises de danos provocados por geada em plantas foram realizadas considerando um delineamento amostral fatorial dentro dos blocos do experimento original. Avaliou-se a morte de óvulos após ocorrência de geadas de diferentes intensidades e a evolução do número de óvulos em função da redução da temperatura do ar (Tar) em noite com ocorrência de geada. O abortamento e a evolução de diferentes tipos de estruturas reprodutivas foram avaliados após 3 geadas de diferentes intensidades. Óvulos em botões florais (B) foram mais tolerantes ao frio do que óvulos em flores abertas (F). As regressões para estimativa de morte de óvulos indicam que a morte de óvulos em F e B iniciou com Tar de 2,4 e 1,9°C, respectivamente, enquanto a morte completa dos óvulos ocorreria com Tar de -6,7 e -10,2°C em F e B, respectivamente. A sensibilidade de óvulos em F e siliquis com menos de 2 cm de comprimento (S<2) foi semelhante com Tar de -4,80°C, quando provocou a morte de 70 a 90% dos óvulos. A equação para medir a evolução do número de óvulos em função da redução da Tar em noite com geada indicou que a morte de óvulos iniciou com Tar de 0,81°C e a morte completa de todos os óvulos ocorreria quando a Tar chegasse a -6,52°C. B, F e S<2 apresentam abortamento 27% maior do que siliquis com mais de 2 cm de comprimento, porém, quando B, F e S<2 não abortam apresentam número de grãos 79% maior do que siliquis com mais de 2 cm de comprimento. As plantas de canola no período reprodutivo apresentaram capacidade limitada de aumentar a tolerância ao frio. O comprimento das siliquis foi menor quando houve maior abortamento e foi dependente do número de óvulos viáveis que restaram nas siliquis. Botões florais são as estruturas reprodutivas mais tolerantes ao frio e a morte de óvulos em estruturas reprodutivas pode ser estimada em função da temperatura do ar.

Palavras-chave: Morte de óvulos, abortamento de flores e siliquis, sensibilidade ao frio, congelamento.

5.2 ABSTRACT

The objectives of this study were to quantify and model damage caused by frost on the reproductive organs of canola. Two field experiments were carried out in 2016 and 2017. Originally, the experiments were conducted in a randomized complete block design, with subdivided plot and factorial arrangement. The analyzes of damage caused by frost on plants were performed considering a design sampling factorial within the blocks of the original experiment. It was evaluated the ovules death after frost of different intensities and the evolution of the number of ovules as a function of the reduction of the air temperature (Tar) in night with frost occurrence. Abortion and evolution of different types of reproductive structures were evaluated after 3 frosts of different intensities. Ovules in flower buds (B) were more tolerant to cold than ovules in open flowers (F). Ovules death begins with Tar of 2.4 and 1.9°C in F and B, respectively. Death of all ovules would occur

with Tar of -6.7 and -10.2°C in F and B, respectively. The sensitivity of ovules in F and siliques with less than 2 cm length ($S < 2$) was similar at Tar of -4.80°C , when it caused the death of 70 to 90% of the ovules. The equation that describes the evolution of ovules numbers as a function of Tar reduction in frosty night indicates that ovules death begins with Tar of 0.81°C and total death occurs with Tar of -6.52°C . B, F and $S < 2$ present 27% higher than siliques with more than 2 cm length ($S > 2$). If B, F and $S < 2$ do not abort they present a 79% larger number of grains than $S > 2$. Canola plants in the reproductive period presented limited capacity to increase cold tolerance. The length of the siliques was smaller when there was a longer abortion and it was dependent on the number of viable ovules remaining in the silique. Flower buds are the most cold tolerant reproductive structures and the death of ovules in reproductive structures can be estimated as function of air temperature.

Keywords: Ovules death, abortion of flowers and siliques, sensitivity to cold, freezing.

5.3 INTRODUÇÃO

A canola (*Brassica napus* L.) tem boa adaptabilidade ao frio e por isso apresenta potencial de cultivo em grande parte do Sul do continente Americano. No entanto, devido a alta variabilidade meteorológica na região (TAKASHIMA et al., 2013), é frequente a ocorrência de geadas, as quais tem como característica elevada variabilidade espacial e temporal (SILVA et al., 2008). A ocorrência de geadas afeta, principalmente, o Sul do Brasil, Sul do Paraguai, Centro Sul da Argentina e o Uruguai, com probabilidade de ocorrer em todo o ciclo de desenvolvimento da canola, podendo provocar danos severos no início do ciclo de desenvolvimento, na antese e no enchimento de grãos (McCLINCHEY; KOTT, 2008; DALMAGO et al., 2010; THOMAS, 2014; KOVALESKI, 2015). Nestes períodos, a ocorrência de geada pode comprometer a produtividade, especialmente se as plantas não passarem por período de aclimação à temperatura baixa do ar previamente à ocorrência das mesmas (RAPACZ, 1999; RAPACZ, 2002; HAWKINS et al., 2002; GUSTA et al., 2004; DALMAGO et al., 2010; KOVALESKI, 2015). Além disso, a alta variabilidade meteorológica, que ocorre durante o período de cultivo da canola (TAKASHIMA et al., 2013), intercala períodos com potencial de aclimação das plantas ao frio (RAPACZ, 1999; RAPACZ, 2002; HAWKINS et al., 2002; GUSTA et al., 2004; McCLINCHEY; KOTT, 2008; DALMAGO et al., 2010) com períodos de desaclimação, ou seja, perda da capacidade de tolerância à geada (RIFE; ZENAILLI, 2003), condição que pode potencializar o dano causado pelo fenômeno. Portanto, melhorar a caracterização e quantificar o dano causado, bem como desenvolver a capacidade de estimar o mesmo e

quantificar o risco, torna-se de fundamental importância para a expansão da cultura da canola na região.

A ocorrência de geadas na antese e enchimento de grãos da canola provoca danos de diferentes formas. A principal é o abortamento de flores e síliquas em estádios iniciais de desenvolvimento (WILEN et al., 1994; McCLINCHEY; KOTT, 2008; THOMAS, 2014). As estruturas reprodutivas da canola apresentam maior sensibilidade ao frio quando estas são flores abertas. Síliquas e botões florais fechados seriam menos afetados pelo congelamento provocado por geadas (LARDON; TRIBOI-BLONDEL, 1995; THOMAS, 2014). No entanto, a quantificação dos níveis de danos para cada estrutura reprodutiva, em ambiente natural e como os danos variam, em decorrência das intensidades de geadas, são pouco conhecidos.

Em ambiente controlado, Dalmago et al. (2010) observaram que a temperatura do ar de -4°C na antese foi prejudicial à canola, reduzindo o número de síliquas por planta e o número de grãos por síliqua. Os autores atribuíram esse resultado ao abortamento de estruturas reprodutivas e à morte de óvulos. Porém, os danos provocados pela geada em flores e síliquas, não foram detalhados. Na canola de inverno a morte de óvulos provoca redução do número de grãos por síliqua, e a morte de todos os óvulos de um pistilo provoca o abortamento do mesmo (LARDON; TRIBOI-BLONDEL, 1995), reduzindo o número de síliquas. Ainda em canola de inverno, Lardon e Triboi-Blondel (1994) observaram em condições controladas, que os gametas femininos são mais sensíveis ao frio que os masculinos, e a sensibilidade aumenta desde a meiose até a antese, persistindo após a fertilização até início do desenvolvimento dos grãos. É provável que o padrão de resposta para a canola de primavera seja o mesmo, mas ainda não é conhecido, como também não é conhecida a evolução destas respostas em função de distintas intensidades de geada que ocorrem no ambiente natural. Estudos, mesmo na literatura internacional, que avaliam o efeito da geada em experimentos conduzidos à campo, no período reprodutivo da canola e que conseguem estabelecer e/ou quantificar, claramente, a extensão dos danos provocados pela geada nas estruturas reprodutivas não existem.

No início do enchimento de grãos, mesmo com o aumento do armazenamento de reservas, na forma de amido e óleo, a canola ainda pode sofrer danos decorrentes de geadas. Neste período, Edwards e Ertel (2011) e Thomas (2014), relatam que temperatura do ar de -3°C interrompe o desenvolvimento e mata o embrião, resultando em perdas de produtividade. No ano de 2017 o rendimento médio de grãos na região Sul do Brasil foi 40% menor do que no ano de 2018, devido a ocorrência de geadas (CONAB, 2018). Valores

de temperatura do ar de -3°C são comumente verificados no inverno e início da primavera em latitudes superiores 20°S na América do Sul (KALMA et al., 1992). Por isso, o cultivo de canola nesta região está sujeito a danos provocados por geadas no período reprodutivo, principalmente se os eventos do fenômeno não forem antecidos por um período de aclimação das plantas ao frio (RAPACZ; JANOWIAK, 1999; RAPACZ et al., 2001; RIFE; ZENAILI, 2003, DALMAGO et al., 2010).

Desta forma, sendo a geada um fenômeno natural que ocorre com grande variabilidade na região, de difícil previsibilidade espacial e temporal (SILVA et al., 2008), aliado à expectativa de aumento de danos causados por geadas devido às mudanças climáticas (GU et al., 2008), a caracterização e quantificação dos danos provocados por geadas, no período reprodutivo da canola são importantes para a cultura da canola, que apresenta alto potencial de cultivo na região. Também, esses resultados podem auxiliar no refinamento do zoneamento agroclimático da cultura (DALMAGO et al., 2008), na modelagem do efeito do frio em plantas de canola no período reprodutivo e na composição de metodologias de avaliação de danos em sistemas de seguro agrícola. Assim, os objetivos deste trabalho foram quantificar e modelar danos causados por geadas de diferentes intensidades em órgãos reprodutivos da canola.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1 Caracterização geral

As avaliações foram realizadas em dois experimentos à campo na área experimental da Embrapa Trigo, localizada em Coxilha, RS ($28^{\circ}10'\text{S}$, $52^{\circ}19'\text{W}$ e 686 m de altitude), originalmente elaborados para avaliar respostas de diferentes genótipos de canola em função de épocas de semeadura. O primeiro foi realizado em 2016 e o segundo em 2017. Em 2016 foram utilizadas seis datas de semeadura: 07/04/2016, 15/04/2016, 02/05/2016, 18/05/2016, 03/06/2016 e 15/06/2016, enquanto em 2017 foram quatro datas de semeadura: 08/04/2017, 02/05/2017, 22/05/2017 e 16/06/2017. Em ambos os anos os genótipos de canola utilizados foram: Alht M6, Hyola 61 e Diamond. O período experimental em 2016 foi de 07/04/2016 a 24/11/2016 e em 2017 foi de 08/04/2017 a 17/11/2017.

Os experimentos foram conduzidos no delineamento experimental em blocos ao acaso, com parcela subdividida, com quatro repetições e em esquema fatorial, sendo os fatores: datas de semeadura e genótipo. Assim, em 2016 o esquema fatorial foi 6×3 ,

totalizando 72 unidades experimentais e em 2017 foi 4 x 3, totalizando 48 unidades experimentais. A realização deste estudo em experimentos com o objetivo de avaliar respostas de diferentes genótipos de canola, de ciclo diferentes (CARRAFA et al, 2017), em função de datas de semeadura, dentro do período do zoneamento agroclimático da cultura (DALMAGO et al., 2008), visou garantir a ocorrência de distintos estádios de desenvolvimento reprodutivo da canola no período de maior probabilidade de ocorrência de geada na região de Passo Fundo, RS (Apêndice A). A adoção dessa estratégia foi necessária porque a ocorrência de geadas na região sul do Brasil tem como características elevada irregularidade cronológica, grande variabilidade espacial e interanual, além de imprecisão na previsibilidade (SILVA et al., 2008).

O solo na área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Húmico, pertencente à unidade de mapeamento Passo Fundo (STRECK et al., 2008). O clima da região de Passo Fundo é do tipo Cfa, ou seja, subtropical úmido com verões quentes e sem estação seca definida, pela classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013). De acordo com a normal climatológica de 1961-1990 de Passo Fundo - RS, a precipitação pluvial anual média é de 1.788 mm. Os meses de dezembro e junho apresentam a maior e menor densidade de fluxo de radiação solar global com 22,3 MJ m⁻² dia⁻¹ e 9,3 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente. Os meses de junho, julho e agosto apresentam temperaturas mínimas do ar menores que 10°C, portanto os meses com maior probabilidade de ocorrência de geadas (ALVARES et al., 2013).

5.4.2 Implantação do experimento e tratos culturais

Previamente à semeadura da canola foi realizada coleta de solo para análise química nos dois experimentos. Os pontos de amostragem foram definidos aleatoriamente através de caminhamento na área. A coleta foi realizada para as camadas, 0-10 e 10-20 cm de profundidade.

Para a definição da correção da acidez, fertilização de base e de cobertura utilizou-se como critérios a interpretação da análise química de solo da camada de 0-10 cm e as necessidades da cultura (TOMM et al., 2009). Não foi necessária correção da acidez. Para a adubação de base foram utilizados 250 kg ha⁻¹ de fertilizante NPK (formulação 0-25-25), 100 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio (20% de nitrogênio e 24% de enxofre) e 30 kg ha⁻¹ de multiboro (17% de boro). A adubação de cobertura foi dividida em duas aplicações, sendo a primeira de 100 kg ha⁻¹ de sulfato de amônia (20% de nitrogênio e 24% de enxofre) no

estádio B4 da canola e a segunda com 100 kg ha⁻¹ de ureia (46% de nitrogênio) no estágio D1.

A semeadura foi realizada com uma semeadora protótipo, desenvolvida pela Eembrapa-Trigo, especificamente para a cultura da canola. A mesma foi realizada posteriormente à distribuição do fertilizante de base, com espaçamento entre as linhas de 0,34 m. A quantidade de distribuição de sementes foi realizada a fim de obter a densidade de 40 plantas por m⁻².

5.4.3 Avaliações fenológicas

As avaliações fenológicas foram realizadas nos dois experimentos, durante todo o ciclo da canola, pela observação da data em que houve a mudança de estágio fenológico. Foi seguida a escala fenológica e os critérios estabelecidos pelo CETIOM (Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux et du Chanvre) (Apêndice B). As avaliações fenológicas foram realizadas duas a três vezes por semana, considerando como mudança de estágio fenológico da unidade experimental a data em que se encontravam 50 % das plantas.

5.4.4 Dados meteorológicos

Para a caracterização climática do período antecedente a geadas, e do dia da geada, foram utilizados os dados diários de chuva acumulada, velocidade e direção média do vento do período de três a cinco dias antes da geada, nos anos de 2016 e 2017, da estação meteorológica de Passo Fundo, pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia (8º DISME) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Os dados diários de temperatura mínima do ar (Tn) do período de 1931 a 2016 da estação meteorológica de Passo Fundo foram utilizados para calcular a frequência anual de geadas. O dia foi considerado com ocorrência de geada quando a Tn diária foi menor ou igual a 2°C no abrigo meteorológico (CAMARGO et al., 1993). Além disso, calculou-se a frequência anual de geadas de intensidade forte (Tn diária menor que -2°C), geadas de intensidade moderada (Tn diária de -2 a 0°C) e geadas fracas (Tn diária de 0 a 2°C). O cálculo de determinação da frequência de cada uma das categorias de geada foi feito considerando o período de 1931 a 2016.

5.4.5 Definição das datas com avaliações

As avaliações em plantas foram realizadas no período reprodutivo da canola, adotando-se a escala proposta por CETIOM como base para avaliação fenológica. Assim, considerou-se início do período reprodutivo quando as plantas estavam em estágio fenológico D1 (inflorescência visível) e fim do período reprodutivo o estágio MF (maturação fisiológica). Avaliações foram realizadas previamente e após a ocorrência de geadas, nos estádios fenológicos E (botão separado), F1 (antese, primeiras flores abertas), F2 (Alongamento da haste principal, várias flores abertas), G1 (Queda de pétalas, 10 primeiras siliquis com 2 cm), G3 (Siliquis com mais de 4 cm) e FF (Final do florescimento).

A definição das datas com provável ocorrência de geada, e consequentemente de avaliações, foi baseada na análise dos boletins meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e do Instituto Meteorológico da Noruega (YR). Além dessa análise, no ano de 2016 foi necessário considerar o efeito topográfico local, uma vez que o experimento foi instalado em uma depressão do relevo, que favorece o acúmulo de ar frio (SILVA; MINUZZI, 2016). Portanto, a temperatura do ar registrada no local do experimento, geralmente, apresentava-se menor do que as previsões meteorológicas indicavam. Assim, por vezes, em datas que não se previam geadas em escala regional, no local do experimento se registrou geada (temperatura mínima do ar menor do que 2°C a 1,5 m acima da superfície do solo (CAMARGO et al., 1993; SENTELHAS et al., 1995). Também, em função de que a ocorrência de geadas na região sul do Brasil está relacionada à invasão de frentes frias, associadas a anticlone de origem polar, condições que podem permanecer por dias consecutivos, as avaliações foram realizadas após o registro da temperatura diária do ar mais baixa, nestes períodos em que foram registradas geadas consecutivas.

Dessa forma, considerando o período reprodutivo da canola, a previsão de ocorrência de geada e a confirmação das geadas, as avaliações foram realizadas após as datas de: 20/06/2016 (Geada1), 08/07/2016 (Geada2), 18/07/2016 (Geada3), 10/08/2016 (Geada4), 22/08/2016 (Geada5), 20/06/2017 (Geada6), e 18/07/2017 (Geada7). As avaliações realizadas foram: mortalidade de óvulos após ocorrência de geadas; evolução do número de óvulos viáveis em função da variação da temperatura do ar em noite com ocorrência de geada; abortamento de estruturas reprodutivas após ocorrência de geadas; comprimento e número de grãos em siliquis remanescentes de estruturas reprodutivas.

5.4.6 Morte de óvulos provocada pelo frio

5.4.6.1 Mortalidade de óvulos após ocorrência de geadas

A viabilidade do número de óvulos foi avaliada nos dois experimentos, em botões florais fechados e flores abertas, antes e após a ocorrência de geadas. Estas estruturas reprodutivas foram coletadas na haste principal, de plantas distintas, localizadas no centro da unidade experimental, em área de aproximadamente 1 m² e em plantas nos estádios fenológicos F1, F2 e G1. As flores abertas e botões florais fechados foram coletados no primeiro e segundo terço da haste principal da planta de canola selecionada, uma vez que a literatura indica que, devido à menor disponibilidade de fotoassimilados, no terço superior da haste principal ocorre maior abortamento natural de estruturas reprodutivas (TAYO; MORGAN, 1975; LARDON; TRIBOI-BLONDEL, 1995). Portanto, a avaliação das estruturas localizadas no terço superior, poderia ser uma causa de variação não provocada pela ocorrência de geadas.

A coleta das estruturas reprodutivas foi realizada, no máximo, 48 horas antes e no máximo, 48 horas depois da geada. Foram utilizadas quatro flores abertas e quatro botões florais fechados de cada unidade experimental que apresentavam as respectivas estruturas para compor a média da unidade experimental. Logo após a coleta, o pistilo de cada uma das estruturas reprodutivas foi aberto transversalmente com auxílio de bisturi (LARDON; TRIBOI-BLONDEL, 1994), e o número de óvulos normais (vivos) foi contabilizado com auxílio de lupa eletrônica, modelo SMZ-10, marca Nikon. Foram considerados óvulos viáveis aqueles que se apresentavam normais e verdes (LARDON; TRIBOI-BLONDEL, 1994). Com a diferença entre o número de óvulos viáveis antes e após a ocorrência da geada, calculou-se a porcentagem de óvulos mortos devido a geada. As avaliações de viabilidade de óvulos foram realizadas após as geadas: Geada1, Geada2, Geada3, Geada4, Geada5, Geada6 e Geada7 (Tabela 1).

Tabela 1 - Datas com ocorrência do menor valor de temperatura mínima do ar (Geadas) antes da avaliação de viabilidade de óvulos em botões florais fechados e flores abertas, temperatura mínima do ar na referência (Tn) e intensidade de frio (Intensidade). Passo Fundo, RS – 2019.

Data	Geadas	Tn (°C)	Intensidade
Geadas1	20/06/2016	-3,21	Geadas forte
Geadas2	08/07/2016	0,91	Geadas fraca
Geadas3	18/07/2016	-5,10	Geadas forte
Geadas4	08/08/2016	-0,47	Geadas moderada
Geadas5	22/08/2016	-3,15	Geadas forte
Geadas6	20/06/2017	2,06	Dia frio
Geadas7	18/07/2017	-4,04	Geadas forte

A análise dos dados foi feita utilizando modelos lineares generalizados, considerando um delineamento amostral fatorial dentro dos blocos do experimento original. Os fatores considerados foram geadas e estruturas reprodutivas, com os níveis: geadas ocorridas em 20/06/2016 (Geadas1), 08/07/2016 (Geadas2), 18/07/2016 (Geadas3), 10/08/2016 (Geadas4), 22/08/2016 (Geadas5), 20/06/2017 (Geadas6) e 18/07/2017 (Geadas7) e estruturas reprodutivas de botões florais fechados (B) e flores abertas (F), respectivamente. Para a análise de variância foram utilizados os softwares: R, com a função *glm* e complementadas com análises do software SAS, com o procedimento PROC GLM. A comparação de médias foi feita pelo teste de Tukey, com 5% de probabilidade de erro. Na análise dos resíduos testou-se a aderência dos erros à distribuição normal, a homocedasticidade da variância, a correlação entre os resíduos por testes estatísticos específicos e análise gráfica. Também foi verificada a presença de pontos influentes nos resíduos a partir dos erros padronizados.

5.4.6.2 Evolução do número de óvulos viáveis em função da variação da temperatura do ar em noite com ocorrência de geada

Para complementar as avaliações de viabilidade de óvulos realizadas nos experimentos de 2016 e 2017, nas datas com ocorrência de geadas de 2017 também foram coletadas estruturas reprodutivas com o objetivo de avaliar a evolução do número de óvulos viáveis em função da redução da temperatura do ar durante as noites com ocorrência de

geadas. No entanto, em 2017 somente em 18 e 19/07/2017 foi registrada ocorrência de geada, de forma que essa avaliação foi realizada apenas para a noite de ocorrência da Geada7 (fim do dia 17 e início do dia 18/07/2017).

Para caracterização do desenvolvimento da canola no dia de ocorrência da Geada7, em 15 plantas de cada unidade experimental contabilizou-se o número de B, F e síliquas. Para estimativa do número de flores abertas a partir do início do florescimento, foi utilizado o modelo desenvolvido por Bolis et al. (2009) para calcular a taxa de emissão de flores.

Para a realização desta avaliação foram selecionadas quatro unidades experimentais, sendo uma em cada bloco do experimento original, em que as plantas se encontravam no estágio fenológico F2, em transição para G1, período em que as estruturas reprodutivas da canola apresentam grande sensibilidade à ocorrência de danos por frio (LARDON; TRIBOI-BLONDEL, 1994). Quando a temperatura do ar se aproximou de 0°C, o que ocorreu em torno de 20h do dia 17/07/2017, iniciaram-se as coletas aleatórias de hastes principais de 4 plantas por unidade experimental. Além das 20hs, foram realizadas coletas de quatro hastes por unidade experimental, às 22h, 24h, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h e 7h. Nos mesmos horários foi medida a temperatura média do ar do período que antecedeu a coleta das hastes para relacionar com a viabilidade de óvulos presente em cada coleta.

As hastes foram seccionadas das plantas em corte do tipo bisel, e em no máximo 15 minutos após a retirada das plantas foram acondicionadas em solução composta por água e sacarose. As hastes foram mantidas na posição vertical e colocadas em abrigo com temperatura do ar acima de 0°C, onde permaneceram até as 10h do dia 18/07/2017. No período das 10hs de 18/07/2017 às 8hs do dia 19/07/2017 as hastes foram acondicionadas em câmara de crescimento, com temperatura do ar de 18°C e mantidas em solução composta por água e sacarose. Em função de que todos os B se localizavam no terço superior da haste principal, optou-se por substituir a avaliação em B pela avaliação em S<2, que estavam posicionadas predominantemente no primeiro terço da haste e, portanto, menos influenciadas pelo abortamento natural, decorrente da disponibilidade de fotoassimilados.

As avaliações de viabilidade de óvulos em F e S<2 iniciaram 36h após o início das coletas, com as hastes que haviam sido coletadas as 20h da noite de 17/07/2017, e assim sucessivamente, de modo que desde a coleta até a avaliação de viabilidade dos óvulos o intervalo de tempo permaneceu próximo a 36h. Foram avaliadas três F e três S<2 por unidade experimental, por horário de coleta, sendo uma em cada haste, ou seja, foram utilizadas três das quatro hastes coletadas, para compor o valor do número de óvulos viáveis

de cada unidade experimental e horário de coleta, respectivamente. As F e as S<2 foram escolhidas aleatoriamente no primeiro terço da inflorescência da haste principal.

A avaliação de viabilidade de óvulos seguiu o procedimento de Lardon e Triboi-Blondel (1994), em que os pistilos de F e as S<2 foram abertos transversalmente com auxílio de bisturi. O número de óvulos normais (vivos) foram contabilizados com auxílio de lupa eletrônica, modelo SMZ-10, marca Nikon. O número de óvulos viáveis das estruturas reprodutivas coletadas às 20h foi considerado como referência, ou seja, 100% de óvulos viáveis e utilizado para calcular o percentual de mortalidade dos óvulos em cada horário, em decorrência da redução da temperatura do ar durante a noite/madrugada.

A análise dos dados foi feita utilizando modelos lineares generalizados, considerando um delineamento amostral dentro dos blocos do experimento original, com quatro repetições. Para a análise de variância e de regressão foram utilizados os softwares: R, com a função *glm* e complementadas com análises do software SAS, com o procedimento PROC GLM. Na análise dos resíduos testou-se a aderência dos erros à distribuição normal, a homocedasticidade da variância, a correlação entre os resíduos por testes estatísticos específicos e análise gráfica. Também foi verificada a presença de pontos influentes nos resíduos a partir dos erros padronizados.

5.4.7 Danos de geada em estruturas reprodutivas após ocorrência de geada

Para avaliar o efeito da geada no período reprodutivo da canola foram marcados diferentes tipos de estruturas reprodutivas nos dois dias subsequentes às geadas de 18/07/2016 (Geada3), 22/08/2016 (Geada5) e 18/07/2017 (Geada7). Em função dos diferentes estádios reprodutivos, foram marcados até cinco tipos de estruturas reprodutivas: botões florais fechados (B), flores abertas (F), siliquas com menos de 2 cm de comprimento (S<2), siliquas com 2 a 4 cm de comprimento (2<S<4) e siliquas com mais de 4 cm de comprimento (S>4). Na Geada3, as estruturas reprodutivas marcadas foram B, F, siliquas com menos de 4 cm de comprimento (S<4) e siliquas com mais de 4 cm de comprimento, porém, em função de observações visuais de abortamento de siliquas com menos de 2 cm de comprimento após esta geada, na Geada5 e Geada7 a categoria S<4 foi dividida em S<2 e 2<S<4. Assim, as S<4 marcadas na Geada3 foram consideradas 2<S<4, uma vez que não foi feita distinção entre estas e S<2.

Na Geada5 não foram marcadas S>4, uma vez que a marcação de estruturas reprodutivas buscou avaliar o efeito da geada nas estruturas reprodutivas que melhor

caracterizassem o estágio de desenvolvimento das plantas no dia da geada. Nesta geada, somente as plantas das sementeiras mais precoces apresentavam $S > 4$, ou seja, no período de desenvolvimento que Lardon e Triboi-Blondel (1994) consideram com menor probabilidade de danos provocados por geadas. Portanto, optou-se pela marcação de B, F, $S < 2$ e $2 < S < 4$.

Foram marcadas estruturas reprodutivas quando as unidades experimentais estavam nos estádios fenológicos: E, F1, F2, G1, G3 e FF. Em cada unidade experimental foram marcadas até três diferentes tipos de estruturas reprodutivas. No estágio fenológico E foram marcadas as estruturas: B, F e $S < 2$. No estágio fenológico F1 foram marcadas as estruturas B, F e na Geada3 as estruturas $2 < S < 4$. Nas unidades experimentais em F2 marcaram-se as estruturas B, F, $S < 2$ e $2 < S < 4$. Quando as unidades experimentais estavam em G1 foram marcadas as estruturas F, $S < 2$, $2 < S < 4$, $S > 4$. As estruturas $S > 4$ foram marcadas quando as plantas estavam no estágio fenológico G3 e FF. Para a Geada3 e a Geada5 foram marcadas 10 repetições por unidade experimental para compor um valor médio da mesma. Na Geada7 foram marcadas 20 repetições por unidade experimental para compor o valor médio da unidade experimental. Portanto, dependendo do estágio fenológico da unidade experimental, foram marcadas entre 10 e 60 estruturas reprodutivas, sendo 10 (Geada3 e Geada5) ou 20 (Geada7), quando marcado somente um tipo de estrutura e entre 30 a 60 estruturas reprodutivas por unidade experimental quando foram marcados três tipos de estrutura.

A avaliação do abortamento das estruturas reprodutivas marcadas foi realizada quinze dias após os eventos de geada, contabilizando o número de estruturas que ainda permaneciam ligadas às plantas. Na colheita, foi contabilizado o número total de cada tipo de estrutura marcada que se desenvolveu em siliqua, o número de grãos em cada uma das síliquas e o comprimento final das síliquas originadas das estruturas reprodutivas marcadas remanescentes.

A análise dos dados foi feita utilizando modelos lineares generalizados, considerando um delineamento amostral dentro dos blocos do experimento original. Os fatores considerados foram geadas e estruturas reprodutivas, com os níveis: geadas (Geada3, Geada5 e Geada7) e estruturas reprodutivas (B, F, $S < 2$, $2 < S < 4$ e $S > 4$). Para a análise de variância foram utilizados os softwares: R (referência), com a função *glm*, sendo complementadas com análises do software SAS, com o procedimento PROC GLM. A comparação de médias foi feita pelo teste de Tukey, com 5% de probabilidade de erro. Na análise dos resíduos testou-se a aderência dos erros à distribuição normal, a

homocedasticidade da variância, a correlação entre os resíduos por testes estatísticos específicos e análise gráfica. Também foi verificada a presença de pontos influentes nos resíduos a partir dos erros padronizados.

5.4.8 Temperatura do ar e das estruturas reprodutivas

A temperatura do ar (Tar) foi medida com sensores termopares de cobre-constantan (Tipo T), com 0,5 mm de diâmetro, instalados em miniabrigos de alumínio de coloração branca. A Tar de referência (R) foi medida a 1,5 m de altura do solo, no centro dos experimentos em área de bordadura, entre as unidades experimentais. A temperatura do ar próximo às estruturas reprodutivas (TnE) foi medida no nível de 100 acima do solo, no centro da unidade experimental. As leituras de Tar em R e da TnE foram realizadas a cada 30 segundos, e a média armazenada a cada 15 minutos em datalogger (marca Campbell, modelo CR 1000).

A ocorrência de aclimação da canola ao frio foi avaliada durante o período reprodutivo da canola, em sequências de no mínimo 3 e no máximo 5 dias, previamente às Geada1, Geada2, Geada3, Geada4, Geada5, Geada6 e Geada7. Em cada período que antecedeu as geadas foi calculada a temperatura média diária do ar e o número de horas em que a canola foi exposta a Tar com potencial para aclimação, utilizando os dados da TnE. Considerou-se que a canola foi exposta à aclimação quando a TnE esteve na faixa de 2 a 12°C (RAPACZ; TOKARZ; JANOWIAK, 2001; RIFE; ZENAILI, 2003).

Para o cálculo de graus dia acumulados após o florescimento foi utilizada a temperatura média diária nos experimentos dos anos de 2016 e 2017, medida em R. Considerou-se como temperatura base inferior o valor de 5°C (NANDA et al., 1996; LUZ et al., 2012; THOMAS, 2014), temperatura ótima 21°C (MORRISON, 1993; THOMAS, 2014) e temperatura base superior 27°C (MORRISON, 1993; BATTISTI et al., 2013; THOMAS, 2014). Os graus dias foram utilizados para caracterizar o desenvolvimento reprodutivo da canola.

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.5.1 Caracterização da ocorrência de geadas

No ano de 2016, considerando como critério a ocorrência de Tn em R menor do que 2°C (CAMARGO et al., 1993), aconteceram 43 geadas no experimento, durante o ciclo de cultivo da canola (abril a novembro), sendo 39 destas registradas durante o período reprodutivo da canola. Das 39 geadas, 13 foram de intensidade forte (Tn em R menor que -2°C), 9 de intensidade moderada (Tn em R entre -2 e 0°C) e 13 de intensidade fraca (Tn em R entre 0 e 2°C) (Apêndice C; Apêndice O). Em 2017 foram registradas 3 geadas no experimento durante o ciclo de cultivo da canola (abril a novembro), duas de intensidade forte e uma de intensidade fraca, sendo as três ocorrências registradas no período reprodutivo (Apêndice C; Apêndice O).

A ocorrência de geadas na região sul do Brasil está relacionada a invasão de frentes frias, associadas a anticlone de origem polar (NIMER, 1989; SARTORI, 2003; AGUIAR; MENDONÇA, 2004). De acordo com os dados diários de chuva, velocidade e direção do vento da estação meteorológica de Passo Fundo, todas as geadas de 2016 e 2017, foram condicionadas, em maior ou menor intensidade, pela influência do anticiclone subtropical do Atlântico Sul e anticiclones de origem polar nos dias antecedentes às geadas, uma vez que todas foram precedidas por ventos predominantemente do quadrante norte, seguidos por chuvas de intensidade e duração variáveis e posterior mudança para ventos do quadrante sudoeste ou sul (Apêndice U).

Na região de Passo Fundo, considerando os dados da estação meteorológica de Passo Fundo, no período de 1931 a 2017, ocorrem, em média, 8,27 geadas por ano, sendo 0,53 de intensidade forte, 1,93 de intensidade moderada e 5,80 de intensidade fraca (INMET, 2018). Além disso, a ocorrência de geadas no ano de 2016 se estendeu desde o terceiro decêndio de abril até o primeiro decêndio de novembro, enquanto em 2017 estas se concentraram nos meses de julho e agosto (Apêndice O). O maior número, intensidade e período de ocorrência de geadas no ano de 2016, em relação à frequência registrada no período de 1931 a 2017 (Apêndice A

), provavelmente se deve à localização do experimento, que foi instalado em uma depressão do relevo. As depressões são favoráveis ao acúmulo de ar frio, que devido a sua maior densidade escoam, preferencialmente, pelas áreas de formato côncavo até estas depressões, onde fica estagnado (SILVA; MINUZZI, 2016).

A canola pode aumentar a tolerância ao frio quando anteriormente exposta à temperatura do ar na faixa de 2 a 12°C (RAPACZ; JANOWIAK, 1999; RIFE; ZENAILI, 2003). Assim, considerando o período de três a cinco dias antes das geadas, verificou-se que previamente a todos os eventos as plantas foram expostas à temperatura do ar com

potencial de aclimação e com potencial de desaclimação no mesmo período, considerando que a desaclimação da canola ocorre com temperatura do ar acima de 12°C (RAPACZ; JANOWIAK, 1999; RIFE; ZENAILI, 2003). Os períodos de aclimação foram curtos, chegando, a no máximo, 40% do tempo (Apêndice R). Segundo Săulescu e Braun (2001), a tolerância à geada é uma condição dinâmica, uma vez que mudanças na temperatura do ar, conteúdo de água nos tecidos vegetais, umidade do solo, nutrição, estágio de desenvolvimento das plantas e condições fisiológicas podem interromper, reverter ou reiniciar o processo de aclimação. De acordo com Gusta e Wisniewski (2013), um dos maiores desafios na manutenção e aumento da produtividade de plantas cultivadas é ajustá-las às mudanças bruscas na temperatura do ar, uma vez que existem plantas que desaclimatam muito rapidamente, enquanto outras se desaclimatam muito lentamente. Segundo Rapacz et al. (2016), ainda não foi estabelecido como períodos de desaclimação podem afetar a tolerância das plantas ao frio. Em teoria, períodos de aquecimento são prejudiciais às plantas quando são sucedidos por geadas, possivelmente por induzirem a planta ao crescimento (TAIZ; ZEIGER, 2017).

5.5.2 Morte de óvulos após ocorrência de geadas

Para a mortalidade de óvulos após ocorrência de geadas observou-se que houve interação entre tipo de estrutura reprodutiva e intensidade de geada. Essa resposta indica que flores abertas e botões florais apresentam diferentes níveis de morte de óvulos em função da intensidade de geada (Tabela 2). Nesse sentido, a morte de óvulos entre botões florais e flores foi semelhante somente quando a T_n não foi baixa o suficiente para provocar danos aos óvulos, o que ocorreu nas geadas dois e seis (Geada2 e Geada6) (Tabela 2), ou então quando a T_n foi tão baixa a ponto de provocar morte total de óvulos nas duas estruturas reprodutivas, o que aconteceu na Geada7 (Tabela 2). Os danos provocados pelo frio aos óvulos, provavelmente, se devem a desidratação celular devido à formação de cristais de gelo nos espaços intercelulares, o que provoca o movimento de água do interior para o exterior da célula, sendo que a formação de gelo no interior das células, geralmente, provoca a morte celular (LEVITT, 1980; GUY, 1990; TAIZ; ZEIGER, 2017).

Tabela 2 - Porcentagem de óvulos inviáveis em botões florais (B) e flores (F) de canola após ocorrência de distintas geadas (Gd). Passo Fundo, RS – 2019.

Estrutura	Geadas avaliadas							Média
	Gd1*	Gd2	Gd3	Gd4	Gd5	Gd6	Gd7	
	Temperatura mínima do ar em R (°C)							
	-3,21	0,91	-5,10	-0,47	-3,15	2,06	-4,04	
B	100,0 Aa**	0,0 Fa	23,3 Cb	18,3 Db	25,0 Cb	2,8 Ea	86,9 Bb	36,6
F	100,0 Aa	0,4 Ga	66,4 Ca	52,9 Da	46,1 Ea	3,0 Fa	90,9 Ba	51,4
Média	100,0	0,2	44,9	35,6	35,6	2,9	88,9	
CV (%)								15,9

*Gd1: Geada1 (20/06/2016); Gd2: Geada2 (08/07/2016); Gd3: Geada3 (18/07/2016); Gd4: Geada4 (10/08/2016); Gd5: Geada5 (22/08/2016); Gd6: Geada6 (20/06/2017); Gd7: Geada7 (18/07/2017).

** Letras minúsculas comparam na coluna e letras maiúsculas comparam na linha pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

As avaliações de mortalidade de óvulos em pistilos de botões florais fechados e flores abertas mostraram que, em uma mesma geada, geralmente de intensidade forte ($T_n < -2^\circ\text{C}$), é possível encontrar pistilos com todos os óvulos viáveis e pistilos com todos os óvulos mortos (Apêndice S e T). Quando os óvulos foram mortos devido ao frio, os mesmos encontravam-se murchos e com coloração esbranquiçada (LARDON; TRIBOIBLONDEL, 1994). Nas geadas de intensidade forte, foram encontrados pistilos que apresentavam o ovário com coloração amarelada e com as paredes flácidas, sendo esse sintoma mais pronunciado em sua base, próximo à ligação com o receptáculo. Pistilos que apresentavam tais danos visuais, geralmente, apresentavam poucos ou nenhum óvulo viável, e pertenciam a flores abertas, embora alguns pistilos com tais sintomas tenham sido encontrados em botões florais. Em função destes sintomas nas paredes externas do ovário, tais estruturas reprodutivas possivelmente abortariam.

Na Geada2 e Geada6, a temperatura do ar não foi suficientemente baixa para provocar danos aos óvulos (T_n em R de 0,91 e $2,06^\circ\text{C}$ na Geada2 e Geada6, respectivamente) (Tabela 2). Em função deste nível térmico, a morte de óvulos em botões florais e flores foi de apenas 0,0 e 0,4% na Geada2 e de 2,8 e 3,0% na Geada6, respectivamente. Enquanto isso, na Geada1 verificou-se mortalidade de todos os óvulos em botões florais e flores, quando a T_n em R foi $-3,21^\circ\text{C}$ (Tabela 2).

Os danos aos óvulos de flores abertas e botões florais após a Geada1 (20/06/2016), quando a T_n foi $-3,21^\circ\text{C}$, provavelmente, tem interferência da temperatura do ar das geadas

de 11/06/2016 e 12/06/2016, quando as plantas de canola estavam em pré-florescimento (estádio fenológico E), e registrou-se T_n em R de $-8,33$ e $-8,59^\circ\text{C}$, respectivamente. Como a antese das primeiras flores ocorreu em 20/06/2016, e no período de 12/06/2016 a 20/06/2016 registrou-se acúmulo de 38,8 graus dia, em 11/06/2016 e 12/06/2016 as flores avaliadas na geada de 20/06/2016 eram botões florais em 11 e 12/06/2016 e estavam no período mais crítico a danos provocados pelo frio, que segundo Lardon e Triboui-Blondel (1994) inicia-se a 90 graus dia antes da antese. Os botões florais que foram avaliados após a Geada1, estavam com 50 a 100 graus dia antes da antese no dia da avaliação, portanto, nas geadas de 11 e 12/06/2016 estes botões florais estavam entrando no período com maior sensibilidade ao frio. Assim, a exposição à temperatura do ar abaixo de -8°C resultou em morte total dos óvulos nestas estruturas.

Nas Geada3, Geada4, Geada5 e Geada7, verificou-se que a morte de óvulos em botões florais foi menor do que em flores, variando de 18,3 a 86,9% para botões florais e de 52,9 a 90,9% em flores abertas (Tabela 2). A avaliação de morte de óvulos em botões florais foi realizada em estruturas que necessitavam de 2 a 5 dias para chegar à antese (25 a 65 graus dia para a antese). Portanto, a menor morte de óvulos em botões florais do que em flores, encontradas neste trabalho, está de acordo com Lardon e Triboui-Blondel (1994), que em condições controladas, em plantas não aclimatadas ao frio, encontraram morte de óvulos em botões florais entre 50 a 60%, no período de 8 a 2 dias antes da antese (100 a 25 graus dia antes da antese), enquanto para botões florais a 2 dias antes da antese (25 graus dia antes da antese) e flores abertas, a morte de óvulos foi superior a 80%.

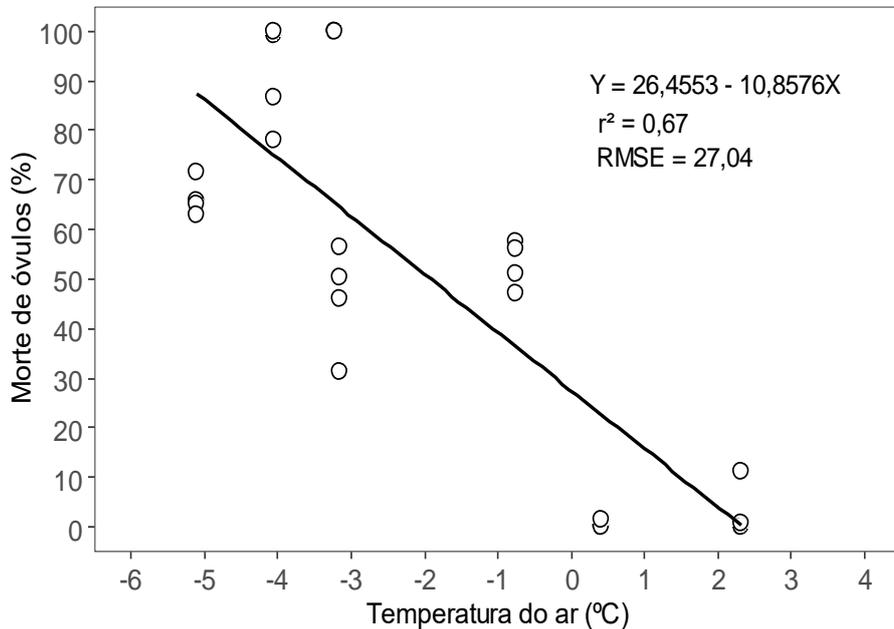
Em outras culturas, os estudos avaliando a sensibilidade a danos por frio nos períodos de pré e pós antese são divergentes quanto a qual destes períodos é mais sensível. Na cultura do trigo, geadas que ocorrem na antese podem resultar em esterilidade completa da espiga, sendo esses danos irreversíveis (LAMGER; OLUGBEMI, 1970; SILVA et al., 2008). No milho, os óvulos são sensíveis desde o início da antese até o início do enchimento de grãos (WESGATE; BOYER, 1985).

Em função de que se verificou maior sensibilidade ao frio em óvulos de flores do que de botões forais, foram desenvolvidas equações de regressão para estimativa de danos em óvulos em função da redução da temperatura do ar, para cada uma das estruturas (Figura 1; Figura 2). Mesmo com coeficiente de determinação relativamente baixo e erro de 27 e 28% (RMSE), para flores e botões florais, respectivamente, os modelos apresentaram os coeficientes significativos, exceto pelo intercepto da equação para botões florais. Os limites do intervalo de confiança para botões florais são 3,01 e 33,19 para o coeficiente linear e -

13,39 e -3,75 para o coeficiente angular, enquanto para flores são 16,73 e 39,23 para o coeficiente linear e -15,16 e -8,28 para o coeficiente angular. A maior inclinação da reta da equação para morte de óvulos em flores, em relação aos botões florais, dada pelo maior coeficiente angular desta equação, demonstra que com a redução da temperatura do ar, a morte de óvulos aumenta mais rapidamente em flores do que em botões (Figura 1 e 2).

A resolução das equações para morte de óvulos em flores e botões florais, considerando valor de $Y=0\%$, quando não existe morte de óvulos, obtêm-se o valor de X , que representa a temperatura do ar em que se iniciam os danos em óvulos em cada uma das estruturas reprodutivas. Assim, a morte de óvulos em flores inicia com temperatura do ar de $2,4^{\circ}\text{C}$, enquanto em botões florais inicia com temperatura do ar de $1,9^{\circ}\text{C}$. Essa diferença parece ser pequena, mas em já geadas fracas a moderadas a diferença de $0,5^{\circ}\text{C}$ pode ser a diferença entre a viabilidade e inviabilidade das estruturas reprodutivas. Além disso, considerando que o parâmetro angular indica maior severidade de dano em flores abertas, as geadas fortes passam a ser significativamente mais prejudiciais para estas estruturas. Por outro lado, a resolução das equações considerando $Y=100\%$, encontram-se os valores de temperatura do ar de $-6,7$ e $-10,2^{\circ}\text{C}$, valores que promovem a morte total de óvulos em flores e botões florais, respectivamente (Figura 1 e 2). No artigo 1 deste trabalho e no estudo desenvolvido por Dalmago et al. (2010), os dois em condições controladas, verificou-se ocorrência de danos significativos e irreversíveis no período reprodutivo da canola, quando as plantas foram expostas à temperatura do ar de -6°C . Para a cultura do trigo, Silva et al. (2010), também em condições controladas, verificaram perda total de grãos devido à exposição à temperatura do ar de -7°C , independentemente do grau de tolerância ao frio. Portanto, os valores extremos de temperatura do ar observados a campo se aproximam muito dos valores letais encontrados em ambiente controlado para a canola e também para o trigo.

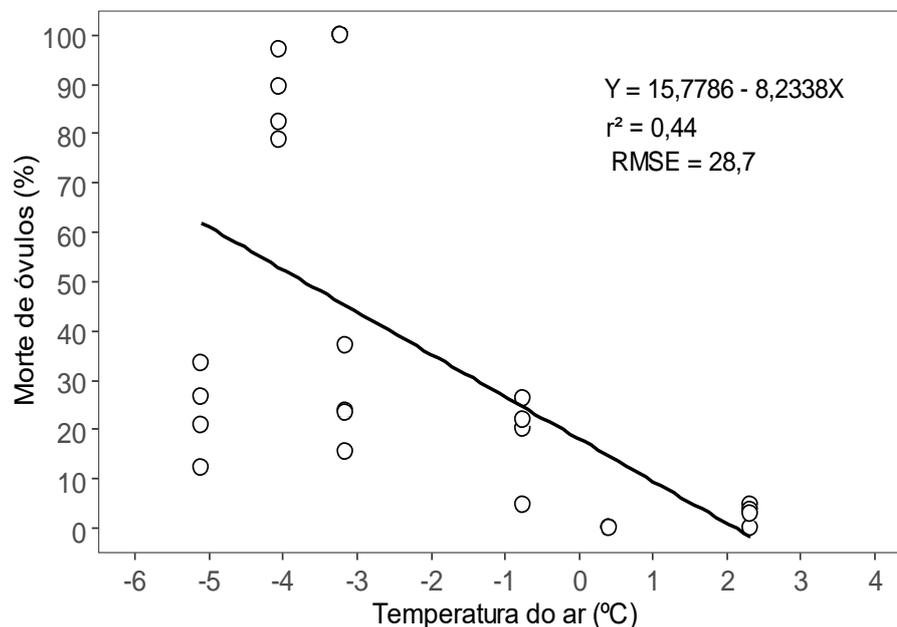
Figura 1 - Morte de óvulos em flores de canola em função da temperatura mínima do ar em dias com geada, medida em R, no centro da área experimental. Passo Fundo, RS – 2019.



Fonte: Autor

Os valores de temperatura do ar, obtidos pela resolução das equações para danos de 0 e 100% a óvulos, são valores de referência, que foram gerados em função dos dados coletados neste trabalho, portanto, podem não expressar os valores de temperatura do ar com a acurácia necessária para atribuir os níveis exatos de início dos danos e 100% de danos em óvulos. Porém, não foram encontrados outros trabalhos, na literatura nacional e internacional, que avaliaram danos aos óvulos de estruturas reprodutivas em pré e pós antese, em geadas com diferentes intensidades, em condições de campo. Lardon e Tribou-Blondel (1994) caracterizaram a sensibilidade ao frio em diferentes períodos de desenvolvimento das estruturas reprodutivas da canola, mas, essa caracterização foi realizada somente com plantas sem aclimação e com temperatura do ar de -3°C . Portanto, isso torna os resultados deste trabalho praticamente inéditos para a cultura da canola, sendo os parâmetros das equações indicadores robustos da morte de óvulos em flores e botões florais, por terem sido obtidos em um ambiente com alta variabilidade meteorológica durante o ciclo da cultura (SILVA et al, 2008).

Figura 2 - Morte de óvulos em botões florais de canola em função da temperatura mínima do ar em dias com geada, medida em R, no centro da área experimental. Passo Fundo, RS – 2019.



Fonte: Autor

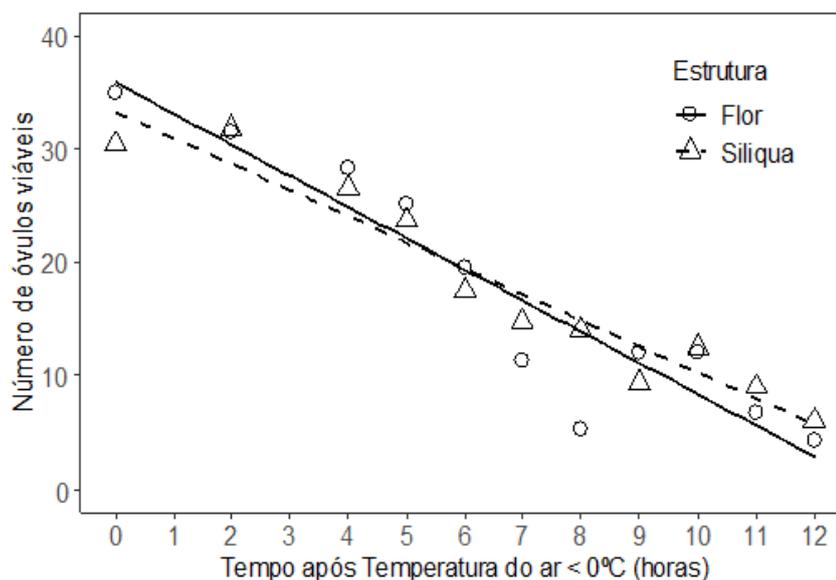
A temperatura do ar previamente a ocorrência das geadas parece ter influenciado o nível de danos que a intensidade do frio provocou aos óvulos nas diferentes estruturas reprodutivas da canola. Nas Geada4 e Geada5, a média da morte de óvulos foi a mesma (35,6%), porém a Tn na Geada4 foi de $-0,47^{\circ}\text{C}$ e na Geada5 foi de $-3,15^{\circ}\text{C}$. Previamente à Geada4, as plantas foram expostas à temperatura do ar com potencial de aclimação em 27% do tempo, enquanto antes da Geada5 as plantas foram expostas a temperatura do ar com potencial de aclimação por 37% do tempo (Apêndice R). Na Geada7, com mortalidade média de 88,9% dos óvulos, registrou-se a menor exposição à temperatura do ar com potencial de aclimação, quando somente em 18% do tempo as plantas foram expostas à temperatura do ar na faixa de 2 a 12°C (Apêndice R). Na Geada3, com Tn inferior a Geada7 (Tn de $-5,10$ e $-4,04^{\circ}\text{C}$ na Geada3 e Geada7, respectivamente) e menor morte de óvulos (44,9%, em média), as plantas foram expostas à temperatura do ar na faixa de 2 a 12°C durante 29% do tempo (Apêndice R). Embora o tempo relativo de aclimação seja baixo para caracterizar a ocorrência de uma aclimação completa e efetiva ao frio, é uma indicação segura de aumento da tolerância ao frio também durante a fase reprodutiva da canola.

Apesar da existência de indícios de que a exposição à temperatura do ar com potencial de aclimatação, previamente a ocorrência de geadas, reduz a morte de óvulos devido ao frio, não foram encontrados estudos que relacionassem nível de aclimatação das plantas com aumento da tolerância à morte de óvulos. No artigo 1, em condições controladas, mesmo que com alta variabilidade, verificou-se que a exposição das plantas à geada provocou redução do número de óvulos, principalmente em plantas não expostas à aclimatação. Para cereais, Fowler et al. (1996); Mahfozzi et al. (2001) e Tryschuk et al. (2014), afirmam que plantas sem requerimentos vernalizantes possuem limitada capacidade de aumentar a tolerância a frio no período reprodutivo, sugerindo que a exposição ao frio durante a vernalização tem como efeito colateral, maior tolerância, às geadas durante o período reprodutivo.

5.5.3 Evolução do número de óvulos em estruturas reprodutivas em função da redução da temperatura do ar em noite com geada

A avaliação do número de óvulos em flores (F) e em síliquas com menos de 2 cm de comprimento ($S < 2$), durante a noite que antecedeu a ocorrência da Geada7 (18/07/2017), demonstrou que não houve diferença na evolução do número de óvulos viáveis entre as duas estruturas a medida que a T_nE foi reduzindo até o valor mínimo de $-5,37^{\circ}C$. Isso pode ser observado nos limites do intervalo de confiança dos coeficientes linear e angular da equação de regressão de $S < 2$, que estão contidos nos limites do intervalo de confiança da equação de regressão de F (Figura 3; Tabela 3). Essa resposta indica que a sensibilidade a danos provocados por frio em óvulos de flores abertas e em $S < 2$ é semelhante na taxa de redução da temperatura do ar observada na Geada7. Este resultado é semelhante ao encontrado por com Lardon e Triboi-Blondel (1994), que em condições controladas, verificaram que as estruturas reprodutivas possuem máxima sensibilidade no período de dois dias antes da antese até vinte dias após a fertilização dos óvulos.

Figura 3 - Número de óvulos viáveis em flores e embriões em siliquas em função do tempo após temperatura do ar atingir 0°C em noite com ocorrência de geada (18/07/2017). Passo Fundo, RS – 2019.



Fonte: Autor

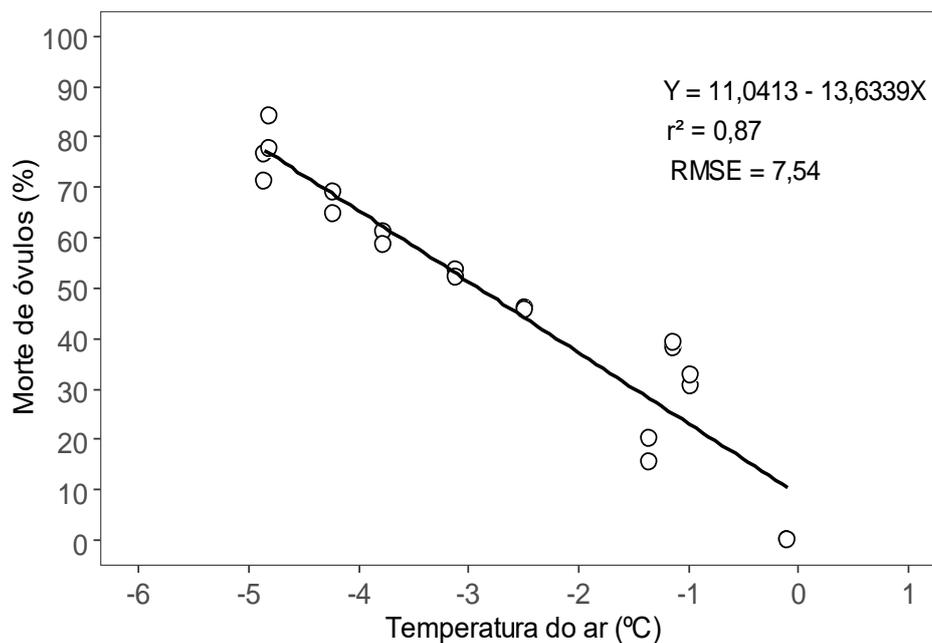
Tabela 3 - Coeficiente linear (a) e angular (b) das equações lineares de estimativa do número de óvulos viáveis em função do tempo (horas) após a temperatura do ar < 0°C e respectivos intervalos de confiança para as estruturas reprodutivas: flor e siliquas de canola. Passo Fundo, RS – 2019.

Estrutura/ Coeficiente	Valor	Intervalo de Confiança		r ²
		Inferior	Superior	
Flor				
a	35,87	30,14	41,60	0,87
b	-2,75	-3,50	-1,99	
Siliqua				
a	33,27	29,72	36,83	0,93
b	-2,30	-2,77	-1,83	

Como não houve diferença de morte de óvulos entre F e S < 2, gerou-se uma única regressão para representar a morte de óvulos em função da temperatura do ar próximo as estruturas reprodutivas (Figura 4). A morte de óvulos apresentou resposta linear, uma vez que os coeficientes linear e angular da regressão foram significativos pelo teste t, a 5% de probabilidade de erro. Os coeficientes da regressão indicam que a morte de óvulos inicia

com a temperatura do ar de $0,81^{\circ}\text{C}$, ou seja, acima de 0°C (Figura 4). Além disso, a resolução da equação de regressão apontou que a morte total de óvulos ocorre com temperatura do ar de $-6,52^{\circ}\text{C}$, valor semelhante ao encontrado nas avaliações após geadas de diferentes intensidades, que foi de $-6,7^{\circ}\text{C}$.

Figura 4 - Regressão entre a temperatura do ar próximo as estruturas reprodutivas da canola e morte de óvulos em noite com ocorrência de geada (18/07/2017). Passo Fundo, RS – 2019



Fonte: Autor

Com temperatura do ar entre 0 e -2°C verificou-se maior variabilidade na morte de óvulos do que com valores de temperatura do ar inferiores a -2°C (Figura 4). Essa resposta pode ser explicada devido a diferenças microclimáticas no dossel, próximo as estruturas reprodutivas, durante o período de resfriamento. Conforme verificado no artigo 2, em noites com ocorrência de geadas os menores valores de temperatura do ar são encontrados próximos às estruturas reprodutivas, uma vez que nesse nível ou alguns cm abaixo, ocorre o maior resfriamento do ar, devido a maior troca energética entre dossel e atmosfera. Como as folhas dos terços inferiores do dossel dificultam a drenagem do ar frio até o solo, variações no índice de área foliar no dossel podem aumentar ou diminuir a drenagem desse ar frio, resultando em diferentes níveis de resfriamento próximo às estruturas reprodutivas.

Além disso, previamente a ocorrência de geada de 18/07/2017, as plantas foram expostas por curto período de tempo à aclimatação (Apêndice R), o que pode ter

desencadeado o início do aumento da tolerância a danos provocados por frio em algumas ou em parte das estruturas reprodutivas, enquanto em outras o fenômeno não iniciou. Com temperatura do ar abaixo de -2°C verificou-se mortalidade de óvulos fortemente ligada à redução da temperatura do ar (Figura 4). A resposta com temperatura do ar abaixo de -2°C , pode ser um indicativo que o nível de aclimação atingido previamente à geada de 18/07/2017, promoveu algum efeito de tolerância ao frio somente até temperatura de -2°C . Segundo Rymen et al. (2007), o efeito do frio no desenvolvimento de óvulos ainda carece de estudos, sendo que a resposta de óvulos à temperatura do ar, com potencial de aclimação, ainda não é conhecida.

Na Geada7 as plantas de canola estavam em transição do estágio fenológico F2 para o G1. No período desde o início do florescimento (F1) até a Geada7 verificou-se acúmulo de 60 graus dia, ou seja, um acúmulo térmico abaixo de 100 graus dia, o que representa o período de máxima emissão de flores para a canola (BOLIS et al.,2009; BATTISTI et al., 2013). No dia de ocorrência da geada, a haste principal das plantas apresentava-se, em média, com 14,6 (32% das estruturas reprodutivas) siliquas de aproximadamente 2 cm de comprimento, 12,6 (28% das estruturas reprodutivas) flores abertas e 18,1 (40% das estruturas reprodutivas) botões florais fechados. Segundo Lardon e Triboui-Blondel (1994), a maior sensibilidade da canola à geada ocorre 2 dias antes da antese (25 graus dia antes da antese) até 20 dias após a fertilização dos óvulos. Portanto, na geada de 18/07/2017, 60% das estruturas reprodutivas (flores e siliquas) e mais os botões florais fechados que chegariam à antese em dois dias, apresentavam-se no estágio mais sensível a danos provocados pelo frio.

O número de flores abertas desde o início do florescimento (10/07/2017) até o dia de ocorrência da geada (18/07/2017) foi, em média, de 27,2 flores na haste principal, o que significa uma taxa de emissão de flores de 3,89 por dia. Com o modelo para estimativa de emissão de flores desenvolvido por Bolis et al. (2009) encontrou-se valor médio de 3,6 flores emitidas por dia. Assim, com um cálculo simples entre a taxa de emissão de flores de 3,89 por dia, e o período de tempo de 2 dias, que Lardon e Triboui-Blondel (1994) identificaram como o período anterior à antese com maior sensibilidade à danos por frio nos óvulos em botões florais, verifica-se que 7,8 botões florais apresentavam sensibilidade ao frio semelhante às flores abertas. Portanto, dos 18,1 botões florais na haste principal no dia de ocorrência da Geada7, 7,8 (43%) apresentavam sensibilidade ao frio semelhante à F e $S < 2$.

Na geada de 18/07/2017 a temperatura do ar de $-4,80^{\circ}\text{C}$ (TnE) provocou a morte de 70 a 90% dos óvulos, de F e S<2 (Figura 4), e considerando que 43% dos botões florais tinham a mesma sensibilidade ao frio de F e S<2, isso significa que 77% das estruturas reprodutivas da haste principal tiveram seu potencial produtivo reduzido à faixa de 10 a 30% daquele que possuíam previamente à ocorrência de geada.

A quantificação do número de óvulos viáveis é uma metodologia eficiente para estimar danos provocados por geadas, uma vez que o número de grãos por siliqua é diretamente influenciado pelo número de óvulos viáveis no momento da fertilização, conforme Lardon e Triboi-Blondel (1994). Esta relação também foi encontrada por outros autores em outras espécies. Para *Cryptantha flava*, Casper (1990) verificou que mesmo com presença de 10 grãos de pólen viáveis na base do estilete, não houve fertilização devido à danos provocados pelo frio aos óvulos. Dessa forma, supondo que a haste principal representasse 100% da produção de grãos da canola, e considerando o rendimento médio de grãos da canola cultivada na região sul do Brasil (CONAB, 2018), que é de aproximadamente 1500 kg ha^{-1} , a geada de 18/07/2017 reduziu o potencial de produção de grãos para a faixa de 345 a 690 kg ha^{-1} . Esse resultado é próximo ao rendimento médio de grãos na região sul do Brasil em 2017, que foi de, aproximadamente, 800 kg ha^{-1} (CONAB, 2018) e do rendimento médio de grãos da primeira e segunda data de semeadura, que foi de 330 e 600 kg ha^{-1} , respectivamente.

De acordo com Thakur et al. (2010), os órgãos masculinos são mais sensíveis ao frio do que os órgãos femininos. Para a canola, os grãos de pólen apresentam sensibilidade ao frio durante o desenvolvimento, principalmente quando os mesmos se encontram no estágio binucleado (LARDON; TRIBOI-BLONDEL, 1994). Apesar disso, Lardon e Triboi-Blondel (1994) verificaram que flores com grãos de pólen com 20% de viabilidade apresentaram taxa de fertilização de óvulos semelhante a flores com grãos de pólen com viabilidade normal. Essa resposta se deve à elevada quantidade de pólen produzida pelas flores da canola, que pode produzir mais de 60 mil grãos de pólen por antera (CRESSWELL, 1999). Além disso, grãos de pólen maduros podem manter a viabilidade mesmo quando expostos a temperatura do ar entre 60 e -20°C (BROWN; DYER, 1991; RAO et al., 1992).

5.5.4 Evolução de estruturas reprodutivas marcadas após ocorrência de geadas

A avaliação do abortamento de estruturas reprodutivas após ocorrência de geadas demonstrou que existiu interação entre estruturas reprodutivas e geadas (Tabela 4). Essa resposta indica que existe diferença no nível de abortamento entre estruturas reprodutivas em função da intensidade das geadas (Tabela 4).

Tabela 4 - Percentual de abortamento de botões florais (B), flores (F), siliquis com comprimento menor de 2 cm ($S < 2$), siliquis entre 2 e 4 cm ($2 < S < 4$) e siliquis maiores de 4 cm ($S > 4$), em três distintas geadas. Passo Fundo, RS – 2019.

Geadas	Abortamento de estrutura reprodutiva de canola (%)					Média
	B	F	$S < 2$	$2 < S < 4$	$S > 4$	
Geadas3	27,4 B c	38,1 A b	-	33,3 A b	7,5 C b	26,6
Geadas5	34,2 A b	19,4 C c	35,6 A b	27,5 B c	-	29,2
Geadas7	97,5 A a	95,8 A a	74,2 B a	47,5 C a	24,9 D a	68,0
Média	53,0	51,1	54,9	36,1	16,2	
CV (%)						22,9

* Letras minúsculas comparam na coluna e letras maiúsculas comparam na linha pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Assim, a Geadas7 apresentou maior abortamento de estruturas reprodutivas do que a Geadas3 e Geadas5, devido a T_n na Geadas7 ter sido mais baixa do que na Geadas3 (Tabela 1). No entanto, o maior abortamento de estruturas reprodutivas na Geadas7 em relação a Geadas3, provavelmente, se deve também ao período de tempo que as plantas foram expostas a temperaturas com potencial de aclimação antes das geadas, uma vez que a exposição à temperatura do ar na faixa de 2 a 12°C foi maior previamente a Geadas3 e Geadas5 do que na Geadas7. O abortamento de estruturas reprodutivas na Geadas3 e Geadas5 foi semelhante, 26 e 29%, respectivamente, o que também pode ser explicado pela aclimação previamente à geada, que foi de intensidade semelhante entre ambas. Porém, a T_n na Geadas3 e o período de tempo de aclimação foram menores do que na Geadas5. Por outro lado, o nível de aclimação que as plantas possuíam na Geadas3, pode não ser expresso pela temperatura do ar que as mesmas foram expostas nos cinco dias previamente a esta geada, uma vez que dez dias antes de Geadas3, ocorreram geadas fracas em 07/07 e 08/07/2016 (Geadas2), que não provocaram danos significativos às plantas, mas apresentaram valores de temperatura do ar mais baixos do que nos cinco dias anteriores à Geadas3. Assim, a temperatura do ar na Geadas2 pode ter contribuído para aumentar a

tolerância a danos por frio às plantas na Geada3, e a temperatura do ar no período compreendido entre a Geada2 e a Geada3, provavelmente não provocou a desaclimação das mesmas. De acordo com Gusta e Wisnieski (2013) e Rapacz et al. (2016), ainda não foi estabelecido como períodos de desaclimação podem afetar a tolerância das plantas ao frio, uma vez que a resposta das plantas corresponde à uma interação de fatores, tais como temperatura do ar, umidade do solo, radiação solar, conteúdo de água nos tecidos, nutrição, estágio de desenvolvimento, entre outros (GUSTA; WISNIESKI, 2013; RAPACZ et al. 2016). Portanto, para avaliar a aclimação das plantas previamente geadas, além da análise de temperatura do ar antes dos eventos, é necessário que as avaliações sejam complementadas com análises bioquímicas e fisiológicas relacionadas à avaliação de componentes do metabolismo secundário no citosol (GUSTA; WISNIESKI, 2013).

Na Geada3, o abortamento de $2 < S < 4$ e F foram semelhantes, e maiores do que das demais estruturas (Tabela 4). Na Geada5, verificou-se que o abortamento de F foi menor do que das outras estruturas reprodutivas (Tabela 4). O menor abortamento de F na Geada5, em relação à Geada3 e Geada7, pode estar associado com o maior período de tempo que as plantas foram expostas à temperatura do ar com potencial de aclimação previamente à Geada5 do que na Geada3 e Geada7. Na Geada7, quando o período de aclimação foi o menor dentre as geadas avaliadas (Apêndice R), a sensibilidade ao frio das estruturas reprodutivas ficou bem nítida entre as mesmas, sendo B e F as estruturas com maior abortamento, seguidas por $S < 2$. As estruturas $2 < S < 4$ e $S > 4$ foram aquelas que apresentaram o menor abortamento (Tabela 4).

Apesar das estruturas reprodutivas apresentarem abortamento distinto entre as geadas, as avaliações permitem inferir que B, F e $S < 2$ são as estruturas que apresentam maior abortamento após ocorrência de geadas fortes. No entanto, em síliquis remanescentes de B, F e $S < 2$, o número médio de grãos foi maior do que em $2 < S < 4$ e $S > 4$ (Tabela 5). Também o comprimento final de síliquis remanescentes de B foi maior do que de F, que não diferiu de $S < 2$, e estas não diferiram de $2 < S < 4$ (Tabela 6). Esses resultados estão de acordo com os resultados encontrados nos experimentos realizados em condições controladas (artigo 1), que de forma geral, mostraram que em B, F e $S < 2$ apresentam maior abortamento devido à exposição à geada, porém, quando não abortam e se desenvolvem em síliquis, apresentam maior número de grãos. Dessa forma, apesar da exposição à temperatura do ar com potencial de aclimação reduzir o abortamento de estruturas reprodutivas na Geada3, ao mesmo nível da Geada5, o aumento da tolerância ao frio não foi suficiente para impedir a redução do número de grãos nas síliquis das estruturas

remanescentes. No artigo 1, em condições controladas, verificou-se que a aclimação reduziu a o abortamento de estruturas reprodutivas, mas não aumentou a tolerância dos grãos ao frio. Tais respostas estão de acordo também com Fowler et al. (1996), Mahfozzi et al. (2001) e Tryschuk et al. (2014), que afirmam que cereais de inverno, sem requerimentos vernalizantes, possuem limitada capacidade de aumentar a tolerância a frio no período reprodutivo.

Tabela 5 - Número de grãos em síliques remanescentes após a ocorrência de três geadas distintas com origem de botões florais (B), flores (F), síliques com comprimento menor de 2 cm ($S < 2$), síliques entre 2 e 4 cm ($2 < S < 4$) e síliques maiores de 4 cm ($S > 4$). Passo Fundo, RS – 2019.

Geadas	Número de grãos por síliqua (n°)					Média
	B	F	$S < 2$	$2 < S < 4$	$S > 4$	
Geadas3	3,2	3,8	-	2,1	4,0	3,3 b
Geadas5	11,6	10,6	9,0	8,6	-	9,9 a
Geadas7	0,0	4,1	3,2	3,1	0,0	2,4 b
Média	5,3 A	5,1 AB	5,1 AB	3,8 B	2,0 C	
CV (%)						23,2

* Letras minúsculas comparam na coluna e letras maiúsculas comparam na linha pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Tabela 6 - Comprimento final de síliques remanescentes após a ocorrência de três geadas distintas com origem de botões florais (B), flores (F), síliques com comprimento menor de 2 cm ($S < 2$), síliques entre 2 e 4 cm ($2 < S < 4$) e síliques maiores de 4 cm ($S > 4$). Passo Fundo, RS – 2019.

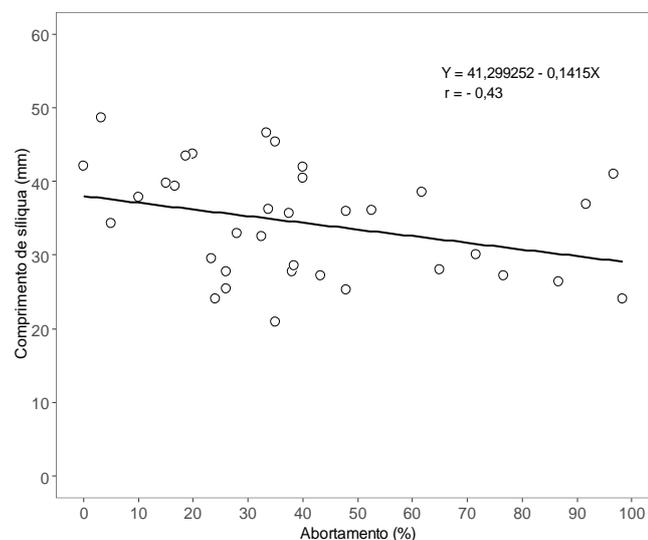
Geadas	Comprimento final de síliques remanescentes (mm)					Média
	B	F	$S < 2$	$2 < S < 4$	$S > 4$	
Geadas3	29,7	31,3	-	23,9	42,0	31,7 c
Geadas5	46,0	43,6	36,0	40,1	-	41,4 a
Geadas7	33,0	30,0	30,5	34,6	47,6	35,6 b
Média	34,8 B	33,2 C	32,3 CD	31,4 D	44,9 A	
CV (%)						2,8

* Letras minúsculas comparam na coluna e letras maiúsculas comparam na linha pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Na literatura, não foram encontrados trabalhos que avaliaram o abortamento de diferentes tipos de estruturas reprodutivas da canola devido a exposição a geadas. Dalmago et al. (2010), em condições controladas, verificaram que a temperatura do ar de -4°C no início do florescimento provocou redução de, aproximadamente, 10% de síliquas em relação a plantas não expostas à geada, enquanto que no fim do florescimento a redução de síliquas foi de 32%. Lardon e Triboui-Blondel (1995), também em condições controladas, verificaram que a temperatura do ar de $-6,5^{\circ}\text{C}$ provocou o abortamento de 40% das flores localizadas na base da haste principal.

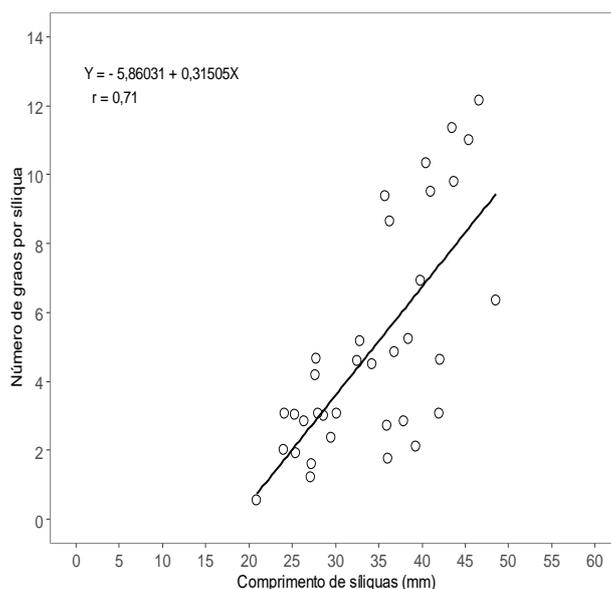
A relação entre o comprimento final das síliquas remanescente de diferentes tipos de estruturas reprodutivas não abortadas e o abortamento de estruturas reprodutivas, apesar de exibir correlação baixa ($r = -0,43$), apresentou coeficiente linear e angular da equação significativos (Figura 5). Embora a dispersão dos dados seja elevada, os coeficientes linear e angular indicam que quanto maior o abortamento de estruturas reprodutivas, menor é o comprimento das síliquas (Figura 5). O abortamento de estruturas reprodutivas está relacionado com o nível de danos que a geada provoca na planta. Portanto, a redução do comprimento das síliquas, em função do abortamento de estruturas, pode ser um indicativo de que a geada provocou danos significativos a processos fisiológicos envolvidos com o desenvolvimento das síliquas e dos grãos.

Figura 5 - Relação entre o percentual de abortamento de estruturas reprodutivas e o comprimento final das síliquas remanescentes das estruturas originais não abortadas. Passo Fundo – RS, 2019. – OBS: os coeficientes da equação linear e o coeficiente de correlação são significativos – $P < 0,05$)



A relação entre o número de grãos em siliquas, originadas de diferentes tipos de estruturas reprodutivas remanescentes de geadas e o comprimento final destas siliquas também apresentou coeficiente linear e angular da equação significativos ($r=0,71$) (Figura 6), sendo mais um indicativo de que o comprimento final das siliquas pode se relacionar com o nível de danos que as geadas provocam nas plantas. Os coeficientes linear e angular da equação permitem inferir, que quanto maior o comprimento final da siliqua, maior o número de grãos presente nesta siliqua (Figura 6). Essa resposta mostra que o crescimento da siliquas em comprimento é dependente do número de óvulos viáveis existentes nas estruturas após as geadas, sendo que poucos óvulos resultam em um menor crescimento da siliquas.

Figura 6 - Número de grãos por siliqua originadas de diferentes estruturas reprodutivas de canola remanescentes após a ocorrência de geadas em função de seu comprimento final na colheita. Passo Fundo – RS, 2019. (OBS: os coeficientes da equação linear e o coeficiente de correlação são significativos – $P < 0,05$)



Fonte: Autor

5.6 CONCLUSÕES

- a) Os óvulos de botões florais fechados de dois a cinco dias antes da antese são mais tolerantes aos danos provocados por geadas do que óvulos de flores abertas;
- b) Óvulos em flores abertas e em siliquas com menos de 2 cm de comprimento apresentam maior sensibilidade a danos por frio de mesma intensidade;

- c) Todos os tipos de estruturas reprodutivas são sensíveis a danos provocados por geadas, sendo que botões florais, flores e síliquas com menos de 2 cm de comprimento abortam mais do que síliquas com 2 a 4 cm de comprimento e síliquas com mais de 4 cm de comprimento. Os botões florais, flores e síliquas com menos de 2 cm de comprimento remanescentes que se desenvolvem em síliquas apresentam maior número de grãos do que síliquas com 2 a 4 cm de comprimento e síliquas com mais de 4 cm de comprimento.
- d) A temperatura do ar com potencial de aclimação previamente ocorrência de geadas, no período reprodutivo da canola reduz o abortamento de estruturas reprodutivas e a mortalidade de óvulos em botões florais e flores.

5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, D.; MENDONÇA, M. Climatologia das geadas em Santa Catarina. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1. Florianópolis. **Anais... GEDN/UFSC**, 2004. p.762-773, 2004.
- BATTISTI, R. et al. Dinâmica floral e abortamento de flores em híbridos de canola e mostarda castanha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.2, p.174-181, 2013.
- BOLIS, L.M. et al. Modelagem da floração da canola em resposta a soma térmica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16...2009, Belo Horizonte, MG. Mudanças climáticas, recursos hídricos e energia para uma agricultura sustentável: anais. Campinas: SBA: Viçosa: UFV: Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009.
- BROWN, A.P.; DYER, A.F. Effects of low temperature storage on the pollen of *Brassica campestris*, *B. oleracea* and *B. napus*. **Euphytica**, v.51, p.215-218, 1991.
- CARRAFA, M. et al. Características agronômicas e rendimento de grãos de genótipos de canola em Três de Maio, RS, 2015. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CANOLA, 1., Passo Fundo. **Anais... Embrapa**, Brasília, DF. p.189-192, 2017.
- CAMARGO, M. B. P. et al. Probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas mensais e anual no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.52, n.2, p.161-168, 1993.
- CASPER, B.B. Timing of embryo abortion and the effect of ovule thinning on nutlet mass in *Cryptantha flava* (Boraginaceae). **Annals of Botany**, v.65, p.489-492, 1990.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 6 – Safra 2018/2019, n. 2 – **Segundo Levantamento**. Brasília, DF, p.138, 2018.
- DALMAGO, G. A., et al. **Zoneamento agroclimático de canola para o Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa trigo, 2008. 76p.
- DALMAGO, G.A. et al. Aclimação ao frio e dano por geada em canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.9, p.933-943, 2010.
- EDWARDS, J.; HERTEL, K. **Canola Growth & Development**. New South Wales: Department of Primary Industries, 2011. 89p.
- FOWLER, D.B. et al. Relationship between low-temperature tolerance and vernalization response in wheat and rye. **Canadian Journal of Plant Science**, v.76, p.37-42, 1996.
- GU, L., et al. The 2007 eastern US spring freeze: increased cold damage in a warming world? **BioScience**, v.58, p.253-262, 2008.
- GUSTA, L. V. et al. The Effect of Water, sugars, and proteins on the pattern of ice nucleation and propagation in acclimated and nonacclimated canola leaves. **Plant Physiology**, v.135, p.1642-1653, 2004.

GUSTA, L. V.; WISNIESKI, M. Understanding plant cold hardiness: an opinion. **Physiology Plantarum**, v.147, p.4–14, 2013.

GUY, C.L. Cold acclimation and freezing stress tolerance: role of protein metabolism. **Annual Review of Plant Physiology**, v.41, p.187–223, 1990.

HAWKINS, G. P. et al. Characterization of freezing tolerance and vernalization in vernal, a spring type *Brassica napus* line derived from a winter cross. **Planta**, v.216, p.220-226, 2002.

KOVALESKI, S. **Efeitos da geada na canola (*Brassica napus* L.) em função da distribuição da palha na superfície do solo**. 2015. 155f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2015.

LANGER, R. H. L. M.; OLUGBEMI, L. B. A study of New Zealand wheat: IV. Effect of extreme temperatures at different stages of development. **New Zealand Journal Agricultural Research**, v.13, p.878–886, 1970.

LARDON, A.; TRIBOI-BLONDEL, A. M. Freezing injury to ovules, pollen and seeds in winter rape. **Journal Experimental Botanical**, v.277, p.1177-1181, 1994.

LARDON, A.; TRIBOI-BLONDEL, A. M. Cold and freeze stress at flowering: effects on seed yields in winter rapeseed. **Field Crops Research**, v. 44, p. 95-101, 1995.

LEVITT, J. **Responses of plants to environmental stresses**, 2 ed. New York: Academic Press, 1980. 497p.

LUZ, G. L da. et al. Temperatura base inferior e ciclo de híbridos de canola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.9, 2012.

MAHFOOZI, S.; LIMIN, A. E.; FOWLER, D. B. Developmental regulation of low temperature tolerance in winter wheat. **Annals of Botany**, v. 87, p. 751–757, 2001.

MCCLINCHEY, S. L.; KOTT, L. S. Production of mutants with high cold tolerance in spring canola (*Brassica napus*). **Euphytica**, v.162, p.51-67, 2008.

MORRISON, M. J.; McVETTY, P. B. E.; SHAYKEWICH, C. F. The determination and verification of a baseline temperature for the growth of westar summer rape. **Canadian Journal of Plant Science**, v.69, p.455-464, 1989.

NANDA, R.; BHARGAVA, S. C.; RAWSON, H. M. Effect of sowing date on rates of leaf appearance, final leaf numbers and areas in *Brassica campestris*, *B. Juncea*, *B. Napus* and *B. Carinata*. **Field Crops Research**, v.42, p.125-134, 1995.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 1989. 421p.

PEREIRA DA CRUZ, R.; MILACH, S. C. K.; FEDERIZZI, L. C. Rice cold tolerance at the reproductive stage in a controlled environment. **Scientia. Agricola**, v.63, n.3, p.255–261, 2006.

RAO, G.; AJAY, J.; SHIVANNA, K. R. Effects of high temperature stress on *Brassica* pollen: viability, germination and ability to set fruits and seeds. **Annals of Botany**, v.68, p.193-198, 1992.

RAPACZ, M. Frost resistance and cold acclimation abilities of spring-type oilseed rape. **Plant Science**, v. 147, p. 55-64, 1999.

RAPACZ, M., JANOWIAK, F. Physiological effects of winter rape (*Brassica napus* var. *oleifera*) prehardening to frost. I. Frost resistance and photosynthesis during cold acclimation. **Journal Agronomy Crop Science**, v.181, p.13–20, 1999.

RAPACZ, M. Regulation of frost resistance during cold de-acclimation and re-acclimation in oilseed rape. A possible role of PSII redox state. **Physiologia Plantarum**, v.115, p.236–243, 2002.

RAPACZ, M.; TOKARZ, K.; JANOWIAK, F. The initiation of elongation growth during long-term low-temperature stay of spring-type oilseed rape may trigger loss of frost resistance and changes in photosynthetic apparatus. **Plant Science**, v.161, p.221-230, 2001.

RAPACZ, M.; JURCZYK, B.; SASAL, M. Deacclimation may be crucial for winter survival of cereals under warming climate. **Plant Science**, v.256, p.5–15, 2017.

RIFE, C. L.; ZEINALI, H. Cold tolerance in oilseed rape over varying acclimation durations. **Crop Science**, v.43, p.96-100, 2003.

RYMEN, B. et al. Cold nights impair leaf growth and cell cycle progression in maize through transcriptional changes of cell cycle genes. **Plant Physiology**, v.143, p.1429–1438, 2007.

SARTORI, M. G. B. A dinâmica do Clima do Rio Grande do Sul: indução empírica e conhecimento científico. **Terra Livre**, v.1, n.20, p.27-49, 2003.

SĂULESCU, N. N.; BRAUN, H. J. **Cold tolerance**. In: REYNOLDS, M.P. et al. (Eds.). Application of physiology in wheat breeding. Mexico: CIMMYT, 2001. p. 111-123.

SENTELHAS, P. C.; ORTOLANI, A. A.; PEZZOPANE, J. R. M. Estimativa da temperatura mínima de relva e da diferença de temperatura entre o abrigo e a relva em noites de geada. **Bragantia**, v.54, n.2, p.437- 445, 1995.

SILVA, E. P. et al. Fatores abióticos envolvidos na tolerância de trigo a geada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n.10, p.1257-1265, 2008.

SILVA, A.; MINUZZI, R. B. Modelagem estatística para previsão de geada de radiação. **Ciência e Natura**, v.38, p.1453-1460, 2016.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal** [tradução: Alexandra Antunes Mastroberri et al.; revisão técnica: Paulo Luiz de Oliveira, 6. Ed., Porto Alegre, RS: Artmed. 888 p. 2017.

TAYO, T. O.; MORGAN, D. G. Quantitative analysis of the growth, development and distribution of flowers and pods in oilseed rape (*Brassica napus*). **Journal Agriculture Science**, v.85, p.103-110, 1975.

THAKUR, P. et al. Cold stress effects on reproductive development in grain crops: an overview. **Environmental and Experimental Botany**, v.67, p.429–443, 2010.

THOMAS, P. The growers' manual: Canola Council of Canada, 2014. Disponível em: <<http://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/crop-development/growth-tages/>>. Acesso em 20 de setembro de 2018.

TRISCHUK, R. G. et al. Cold acclimation, de-acclimation and re-acclimation of spring canola, winter canola and winter wheat: the role of carbohydrates, cold-induced stress proteins and vernalization. **Environmental and Experimental Botany**, v.106, p.156–163, 2014.

WESTGATE, M.E.; BOYER, J.S. Carbohydrate reserves and reproductive development at low water potentials in maize. **Crop Science**, v.25, p.762–769, 1985.

WILEN, R. W. et al. Effects of Abscisic Acid (ABA) and ABA analogs on freezing tolerance, low-temperature growth, and flowering in rapeseed. **Journal Plant Growth Regulation**, v.13, p.235-241, 1994.

6 DISCUSSÃO GERAL

Os menores valores de Tn média no dossel, durante o período reprodutivo da canola, ocorreram a 100 cm do solo, independentemente da intensidade de frio, ou seja, no terço superior do dossel e próximo às estruturas reprodutivas. Isso indica que as estruturas reprodutivas, em noites com ocorrência de geada, são expostas aos menores valores possíveis de temperatura do ar. Baldocchi et al. (1983) para a soja, Jacobs et al. (1996) para o milho, Tazzo et al. (2008) para a batata, Winkel et al. (2009) para a quinoa e Loose et al. (2011) para o girassol, também registraram a menor Tn no terço superior do dossel no período noturno.

Quando a Tn no dossel foi avaliada em diferentes fases do período reprodutivo, verificou-se que no início do florescimento e no florescimento pleno os menores valores de temperatura do ar foram encontrados a 40 cm do solo. Essa resposta se deve a estatura do dossel nestes períodos, ao alto índice de área foliar e poucas estruturas reprodutivas diferenciadas no terço superior do mesmo. Com elevada área foliar, as folhas foram os órgãos com maior troca energética com atmosfera e, portanto, maior resfriamento. Desta forma, a temperatura média das estruturas reprodutivas apresentou-se maior do que a temperatura média do ar próximo a estas estruturas em noites com ocorrência de geada, uma vez que as folhas logo abaixo foram a superfície de maior troca energética com a atmosfera, portanto, com maior resfriamento. Porém, no florescimento pleno, em função do crescimento das plantas, diferenciação das estruturas reprodutivas e aumento do índice de área de estruturas reprodutivas, o gradiente de Tn entre os níveis de 40 e 100 cm do solo foi menor do que no início do florescimento.

A área foliar da canola foi a superfície de troca de energia com a atmosfera até o florescimento, quando iniciou o incremento do índice de área de estruturas reprodutivas (FOCHESATTO et al., 2016). Em função disso, e do aumento da estatura do dossel, no enchimento de grãos o nível de maior perda energética foi deslocado de 40 cm para 100 cm do solo. A mudança de nível de troca energética entre dossel e atmosfera, evidenciada pela mudança de nível com menor Tn desde o início do florescimento até o enchimento de grãos (de 40 para 100 cm do solo), está de acordo com Rosenberg (1974), quando o mesmo relata que a camada de troca de energia entre o dossel e a atmosfera acompanha a elevação da estatura do mesmo e o incremento de superfície vegetal.

Assim, é possível afirmar que a partir do florescimento pleno da canola, em noites com ocorrência de geada, o terço superior do dossel apresenta a maior intensidade de

resfriamento do ar, ou seja, com maior probabilidade das estruturas reprodutivas serem expostas à valores de temperatura do ar críticos. No artigo 3 mostrou-se que a morte de óvulos em flores inicia com temperatura do ar de 2,4°C, enquanto em botões florais inicia com 1,9°C. Essa diferença parece ser pequena, mas 0,5°C pode ser a diferença entre a viabilidade e inviabilidade das estruturas reprodutivas. Para a morte total de óvulos em flores e botões florais, encontrou-se valores de temperatura do ar de -6,7 e -10,2°C, respectivamente.

Tanto em ambiente controlado quanto em ambiente natural, em um mesmo pistilo de flores e botões florais, encontraram-se óvulos viáveis e danificados pela ocorrência geadas (LARDON; TRIBOI-BLONDEL, 1994). Isso indica que estes botões florais e flores podem se desenvolver em siliques produtivas, mesmo que com menor potencial de produção de grãos, do que botões florais e flores não expostos à geadas. Em ambiente natural óvulos de flores apresentaram maior sensibilidade ao frio do que óvulos de botões florais. Por isso, foram desenvolvidas equações de regressão para estimativa de danos em óvulos em função da variação da temperatura do ar, para cada uma das estruturas reprodutivas.

A evolução do número de óvulos, em noite com ocorrência de geadas, mostrou que a sensibilidade ao frio em flores e siliques com menos de 2 cm de comprimento é semelhante. O coeficiente da regressão indica que a morte de óvulos iniciou com a temperatura do ar de 0,81°C. Além disso, a resolução da mesma equação apontou que a morte total de óvulos ocorreria com temperatura do ar de -6,52°C, valor semelhante ao encontrado quando foi avaliado a morte de óvulos em flores após as geadas, que foi de -6,7°C.

No artigo 1, em condições controladas, em plantas sem aclimação, foi demonstrado que a temperatura do ar de -6°C provocou a morte de até 79% das plantas no período reprodutivo, reduziu a massa seca de grãos em até 70% e provocou aumento de até 120% no abortamento de estruturas reprodutivas. Verificou-se que, além do início do ciclo de desenvolvimento (KOVALESKI, 2015), a canola pode aumentar sua tolerância ao congelamento também durante o período reprodutivo, quando expostas a curtos períodos de tempo (3 dias) à regime de temperatura do ar com potencial de aclimação ao frio (DALMAGO et al., 2010), uma vez que houve significativa morte de plantas quando as mesmas foram expostas à geadas sem aclimação. Não foi possível determinar com exatidão porque a temperatura de -6°C provocou morte de plantas não aclimatadas no experimento 1 e não provocou no experimento 2. Acredita-se que as plantas do experimento 2 podem ter sido expostas à déficit hídrico, o que possivelmente desencadeou resposta das

plantas não aclimatadas semelhante às aclimatadas, quando expostas à geada (SILVA et al., 2008).

A aclimação evitou a morte de plantas no período reprodutivo, porém, mostrou limitada capacidade de aumentar a tolerância ao frio das estruturas reprodutivas da canola, uma vez que reduziu o abortamento das estruturas reprodutivas, mas não aumentou a tolerância dos grãos ao congelamento. Essa resposta está de acordo com Fowler et al. (1996); Mahfozzi et al. (2001) e Tryschuk et al. (2014), quando afirmam que plantas sem requerimentos vernalizantes possuem limitada capacidade de aumentar a tolerância a frio no período reprodutivo.

Em ambiente natural as estruturas reprodutivas apresentaram abortamento distinto entre as geadas, indicando que o nível de danos provocados pelo frio relacionou-se com o abortamento das estruturas reprodutivas. Apesar disso, as avaliações permitem inferir que botões florais, flores e siliquis com menos de 2 cm de comprimento apresentam maior abortamento do que siliquis com mais de 2 cm de comprimento. Porém, as siliquis remanescentes de botões florais, flores e siliquis com menos de 2 cm de comprimento apresentaram maior número de grãos e comprimento do que as siliquis com mais de 2 cm de comprimento após ocorrência de geadas. A relação entre comprimento de siliquis e número de grãos mostrou que o crescimento das siliquis em comprimento é dependente do número de óvulos viáveis existentes nas estruturas após as geadas, sendo que poucos óvulos resultam em um menor crescimento da siliquis. Além disso, verificou-se que quanto maior o abortamento, menor o comprimento das siliquis. Esses resultados podem ser indicativos de que as geadas provocaram danos significativos a processos fisiológicos envolvidos com o desenvolvimento das siliquis e dos grãos, em microambientes dentro do dossel de plantas.

Por fim, os resultados obtidos com a geração e validação dos modelos, demonstram que é possível estimar a temperatura do ar no dossel e das estruturas reprodutivas em função da temperatura do ar em estação meteorológica. A temperatura mínima das estruturas reprodutivas pode ser estimada em função de dados de estação meteorológica, com o modelo $T_{ner} = 1,21(T_n \text{ Aut}) - 2,77$ e em dias com T_n menor do que 5°C com o modelo $T_{ner} = 1,09(T_n \text{ Aut}) - 3,06$. Os modelos para estimativa da temperatura mínima do ar próximo as estruturas reprodutivas não atenderam ao menos um dos critérios estatísticos para se tornarem adequados. A grande maioria destes apresentou o coeficiente linear diferente de zero, indicando que o desajuste de tais modelos pode estar relacionado com o efeito topográfico na temperatura do ar. Assim, é recomendável a repetição dos experimentos, em diferentes locais, anos e condições de manejo, para melhorar o

entendimento da relação da temperatura no dossel com estações meteorológicas, e conseqüentemente chegar a modelos com alta acurácia na estimativa da temperatura do ar no dossel. Com essas relações bem compreendidas, é possível buscar a relação de outras variáveis ambientais e micrometeorológicas com a temperatura no dossel, e assim prever possíveis danos em dias anteriores à ocorrência de geadas.

7 CONCLUSÕES

- 1) A temperatura do ar de -6°C em ambiente controlado provoca a morte de plantas de canola não aclimatadas;
- 2) A temperatura do ar de -6°C reduz a produção de matéria seca total das plantas, o número de estruturas reprodutivas, a matéria seca dos grãos, o número de siliques por planta, o número de grãos por síliqua e o número de óvulos viáveis por planta;
- 3) A temperatura mínima do ar no dossel de plantas de canola, em noites com ocorrência de geada, acontece no terço superior do dossel, expondo as estruturas reprodutivas da canola à máxima intensidade de frio nestas datas;
- 4) Os menores valores de temperatura média do ar ocorrem no nível de 40 cm no dossel, no decorrer das noites que originam geadas fortes e geadas moderadas. Em noites de geada fraca e noites frias sem geada, com temperatura do ar menor do que 5°C , o perfil vertical de temperatura média do ar no dossel de canola é isotérmico, principalmente devido a maior velocidade do vento;
- 5) É possível estimar a temperatura mínima do ar próximo às estruturas reprodutivas e a temperatura mínima das estruturas reprodutivas da canola, em datas com ocorrência de geada, em função da temperatura mínima do ar medida em estações meteorológicas;
- 6) Os óvulos de botões florais fechados de dois a cinco dias antes da antese são mais tolerantes a danos provocados por geadas do que óvulos de flores abertas;
- 7) Óvulos em flores abertas e em siliques com menos de 2 cm de comprimento apresentam sensibilidade a danos por frio semelhante;
- 8) Todos os tipos de estruturas reprodutivas são sensíveis a danos provocados por geadas, sendo que botões florais, flores e siliques com menos de 2 cm de comprimento abortam mais do que siliques com 2 a 4 cm de comprimento e siliques com mais de 4 cm de comprimento. Os botões florais, flores e siliques com menos de 2 cm de comprimento remanescentes que se desenvolvem em siliques apresentam maior número de grãos do que siliques com 2 a 4 cm de comprimento e siliques com mais de 4 cm de comprimento.
- 9) A temperatura do ar com potencial de aclimação reduz o abortamento de estruturas reprodutivas e a mortalidade de óvulos em botões florais e flores.

Em função dos resultados com os experimentos de 2016 e 2017, é possível indicar as próximas etapas para caracterização e quantificação dos danos provocados por geadas no período reprodutivo da canola:

- a) Com as avaliações de mortalidade de óvulos em função da temperatura do ar, foram obtidas equações de regressão que identificaram a temperatura do ar de início da morte de óvulos e a temperatura com morte de todos os óvulos em botões florais e flores. Apesar da importância desses parâmetros, salienta-se que é necessária a validação dos mesmos, com a repetição destas avaliações, com maior número de repetições, em diferentes locais e maior número de anos. Avaliações após ocorrência de geadas em estruturas reprodutivas em outros estádios de desenvolvimento podem aumentar a compressão dos danos provocados pelo congelamento na canola;
- b) Embora a literatura afirme que a viabilidade de 20% dos grãos de pólen é suficiente para não afetar negativamente a fertilização dos óvulos, recomenda-se avaliar a resposta dos gametas masculinos após ocorrência de geadas, e como essa resposta interfere na fertilização;
- c) A resposta das estruturas reprodutivas expostas a geadas foi identificada, mas o estudo pode ser ampliado com avaliação da dinâmica floral e desenvolvimento das flores em síliquas, antes e após geadas, avaliando a capacidade da canola compensar os danos provocados por geadas;
- d) Avaliações bioquímicas e fisiológicas para identificação e quantificação da aclimação, aliadas a análise da temperatura do ar, previamente a ocorrência de geadas são necessárias para quantificar a interferência da temperatura do no nível de aclimação, e quanto diferentes níveis de aclimação interferem nos danos provocados por geadas em ambiente externo;
- e) Neste estudo não foram realizadas avaliações buscando verificar possíveis diferenças de tolerância ao frio entre os genótipos. Portanto, após a caracterização e quantificação dos danos provocados por geada, pode ser realizado detalhamento destes em diferentes genótipos e condições de manejo;
- f) Avaliação da interferência de outros fatores abióticos (disponibilidade nutricional no solo e tecidos, condição hídrica do solo e atmosférica, entre outros) nos danos provocados por geadas nas plantas;

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGENDES, M.O. de O. Temperaturas mínimas próximas ao solo em Pelotas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 4. Londrina, 1985. **Anais...**, Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/ Fundação Instituto Agrônômico. 1985.
- AGUIAR, D.; MENDONÇA, M. Climatologia das geadas em Santa Catarina. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1. Florianópolis. **Anais... GEDN/UFSC**, 2004. p.762-773, 2004.
- ALFONSI, R.R.; PINTO, H.S.; PEDRO JÚNIOR, M.J. Estimativas das normais de temperaturas média mensal e anual do Estado de Goiás (BR) em função de altitude e latitude. **Caderno de Ciências da Terra**, v.45, p.1-6, 1974.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n.6, p. 711-728, 2013.
- ANDRADE, R. L. de. **Dinâmica do microclima e fluxo de calor sensível armazenado no dossel vegetativo da caatinga no semiárido do Brasil**. 2015. 83f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2015.
- ARAÚJO, C. E. S. de. et al. **Previsão de geadas em Santa Catarina**. Florianópolis – SC: Epagri, 2009. 11p. (Relatório do Projeto: Previsão de eventos extremos no sul do Brasil – FINEP 14). Disponível em: <http://www.ciram.com.br/finep14/recursos/Rel_Finep14_Geada.pdf> Acesso em: 18/09/2018.
- AROCA, R. et al. Difference in root low temperature response of two maize genotypes differing in chilling sensitivity. **Plant Physiology Biochemistry**, v.39, p.1067–1075, 2001.
- ASHWORTH, E.N. et al. Ice formation and tissue response in apple twigs. **Plant Cell and Environment**, v.11, p.703–710, 1988.
- ASHWORTH, E.N. Formation and spread of ice in plant tissues. **Hortic. Ver.**, v.13, p.215–255, 1992.
- BALDOCCHI, D.B., VERMA, S.B., ROSENBERG, N.J. Microclimate in the soybean canopy. **Agricultural Meteorology**, v.28, p.321–337, 1983.
- BATTISTI, R. et al. Dinâmica floral e abortamento de flores em híbridos de canola e mostarda castanha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.2, p.174-181, 2013.
- BEGG, J. E. et al. Diurnal energy and water exchanges in bulrush millet in art area of high solar radiation. **Agricultural Meteorology**, v.1 (4), p.294-312. 1964.
- BOLIS, L.M. et al. Modelagem da floração da canola em resposta a soma térmica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16...2009, Belo Horizonte, MG. Mudanças climáticas, recursos hídricos e energia para uma agricultura sustentável: anais. Campinas: SBA: Viçosa: UFV: Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009.

BOOTSMA, A. Estimating grass minimum temperatures from screen minimum values and others climatological parameters. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v.16, p.103-113, 1976a.

BROOKING, I.R. Male sterility in *Sorghum bicolor* L. Moench induced by low night temperature. I: Timing of the stage of sensitivity. **Australian Journal Plant Physiology**. v.3, p.589–596, 1976.

BROWN, K.W.; COVEY, W. The energy-budget evaluation of the micrometeorological transfer processes within a cornfield. **Agricultural Meteorology**, v.3, p.73-96, 1966.

BROWN, A.P.; DYER, A.F. Effects of low temperature storage on the pollen of *Brassica campestris*, *B. oleracea* and *B. napus*. **Euphytica**, v.51, p.215-218, 1991.

BURCHETT, S.; NIVEN, S.; FULLER, M.P. The effect of cold-acclimation on the water relations and freezing tolerance *Hordeum vulgare* L. **Cryo Letters**, v.27, p.295–303, 2006.

BURG, M.B.; FERRARIS, J.D. Intracellular organic osmolytes: function and regulation. **Journal of Biological Chemistry**, v.283, p.7309-7313, 2008.

BURIOL, G.A. et al. Estimativa das médias das temperaturas máximas mensais e anuais do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v.3, p.131-150, 1973.

BURIOL, G.A. et al. Estimativa das médias das temperaturas máximas mensais e anuais do Estado de Santa Catarina. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v.4, p.81-102, 1974.

CARAMORI, P. H. et al. Zoneamento agroclimático para o pessegueiro e a nectarineira no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Cruz das Almas, v.30, n.4, p.1040-1044, 2008.

CARGNELUTTI FILHO, A. et al. Altitude e coordenadas geográficas na estimativa da temperatura mínima média decendial do ar no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.893-901, 2006.

CAMARGO, M. B. P. et al. Probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas mensais e anual no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.52, n.2, p.161-168, 1993.

CARRAFA, M. et al. Características agronômicas e rendimento de grãos de genótipos de canola em Três de Maio, RS, 2015. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CANOLA, 1., Passo Fundo. **Anais...** Embrapa, Brasília, DF. p.189-192, 2017.

CASPER, B.B. Timing of embryo abortion and the effect of ovule thinning on nutlet mass in *Cryptantha flava* (Boraginaceae). **Annals of Botany**, v.65, p.489–492, 1990.

CELLIER, P.; ITIER, B. Un module de prtvision de la temprature minimale nocturne sous abri eta la surface du sol en conditions de geltes radiatives. **Journal Recherches Atmospheriques**, v.18, p.11-22, 1984.

CELLIER, P. An operational model for prediction minimum temperatures near the soil surface under clear sky conditions. **Journal Applied Meteorology**, v.32, p.871-883. 1993.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 6 – Safra 2018/2019, n. 2 – **Segundo Levantamento**. Brasília, DF, p.138, 2018.

CRESSWELL, J. E. The influence of néctar and pollen availability on pollen transfer by individual flowers of oil-seed rape (*Brassica napus*) when pollinated by bumblebees (*Bombus lapidarius*). **Journal of Ecology**, v.87 (4), p.670–677, 1999.

CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.2, p.9-16, 1994.

DAHAL, K. et al. The effects of phenotypic plasticity on photosynthetic performance in winter rye, winter wheat, and *Brassica napus*. **Physiologia Plantarum**, v.144: p.169–188, 2012.

DALMAGO, G. A., et al. **Zoneamento agroclimático de canola para o Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa trigo, 2008. 76 p.

DALMAGO, G. A. et al. Canola. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola** Brasília, DF: INMET, 2009. p. 131-149.

DALMAGO, G.A. et al. Aclimação ao frio e dano por geada em canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.9, p.933-943, 2010.

DALMAGO, G. A. et al. Filocrono e número de folhas de canola em diferentes condições ambientais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n. 6, p.573-581. 2013.

DALMAGO, G. A. Use of solar radiation in the improvement of spring canola (*Brassica napus* L., Brassicaceae) yield influenced by nitrogen topdressing fertilization **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.26, n.1, p.223-237, 2018.

DIEPENBROCK, W. Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.67, p.35-49, 2000.

EDWARDS, J.; HERTEL, K. **Canola Growth & Development**. New South Wales: Department of Primary Industries, 2011. 89p.

FELDHAKE, C.M. Forage frost protection potential of conifer silvopastures. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.112, p.123–130, 2002.

FENNEL, A.; MARKHART, A.H.; Rapid acclimation of root hydraulic conductivity to low temperature. **Journal of Experimental Botany**, v.49, p.879–884, 1998.

FERREIRA, M. et al. Estimativa das temperaturas médias mensais e anuais do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v.1, p.21-52, 1971.

- FERREIRA, M. et al. Estimativa das temperaturas médias mensais e anuais do Estado de Santa Catarina. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v.4, p.19-38, 1974.
- FOCHESATTO, E. et al. Interception of solar radiation by the reproductive structures of canola hybrids. **Ciência Rural**, v.46, n.10, p.1790-1796, 2016.
- FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.26, n.3, p.411-418, 1991.
- FOWLER, D.B. et al. Relationship between low-temperature tolerance and vernalization response in wheat and rye. **Canadian Journal of Plant Science**, v.76, p.37-42, 1996.
- FOWLER, D.B.; LIMIN, A.E.; RITCHIE, J.T. Low-temperature tolerance in cereals: model and genetic interpretation. **Crop Science**, v.39, p.626-633, 1999.
- FRIEDT, W.; SNOWDON, R. **Oiseed rape**. In: VOLMANN, J.; RAJCAN, I. (Ed.). Oil crops. New York: Springer, 2009. Disponível em: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-0-387-77594-4_4.pdf> Acesso em: 20 agosto de 2018.
- FUCHS, M.; TANNER, C. B. Error analysis of Bowen ratios measured by differential psychrometry. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v.7, p.329-334, 1970.
- FUJIKAWA, S.; JITSUYAMA, Y.; KURODA, K. Determination of the role of cold acclimation-induced diverse changes in plant cells from the viewpoint of avoidance of freezing injury. *Journal of Plant Research*, v.112, p.237-244, 1999.
- GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; PEREIRA, A. B. Balanço de radiação e fluxo de calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado com pepineiro. **Bragantia**, v.60, p.139-147, 2001.
- GATES, D. M. **Ecological biophysics**. New York: Springer, 1980. 611p.
- GAUCH, J.G.; HWANG, J.T.G. FICK, G.W. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values. **Agronomy Journal**, v.95, p.1442-1446, 2003.
- GEIGER, R.; ARON, R.; TODHUNTER, P. **The Climate Near the Ground**. 5. ed. Springer: Braunschweig, Vieweg, 1995. 528p.
- GILLESPIE, T. J.; KING, K. M. Nighttime sink strengths and apparent diffusivities within a corn crop. **Ibid.**, v.8, p.59-67, 1971.
- GRODZKI, L. et al. Risco de ocorrência de geada no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.1 p.93-99, 1996.
- GU, L., et al. The 2007 eastern US spring freeze: increased cold damage in a warming world? **BioScience**, v.58, p.253-262, 2008.

GULDEN, R. H.; WARWICK, S. I.; THOMAS, A. G. The biology of Canadian Weeds. 137. *Brassica napus* L. and *B. rapa* L. **Canadian Journal of Plant Science**, v.88, n.5, p.951-996, 2008.

GUSTA, L. V. et al. The Effect of Water, sugars, and proteins on the pattern of ice nucleation and propagation in acclimated and nonacclimated canola leaves. **Plant Physiology**, v.135, p.1642-1653, 2004

GUSTA, L.V.; WISNIESKI, M.E.; TRISCHUK, R.G. **Patterns of freezing in plants: the influence of species, environment, and experimental procedures**. In: GUSTA, L.V.; WISNIESKI, M.E.; TANINO, K.K. (eds.) *Plant Cold Hardiness: From the Laboratory to the Field*. Cambridge: CABI, 2009. p.214–225.

GUSTA, L. V.; WISNIESKI, M. Understanding plant cold hardiness: an opinion. **Physiology Plantarum**, v.147, p.4–14, 2013.

GUY, C.L. Cold acclimation and freezing stress tolerance: role of protein metabolism. **Annual Review of Plant Physiology**, v.41, p.187–223, 1990.

HARRISON, A. A. A discussion of the temperature of inland Kent with particular reference to night minima in the lowlands. **Meteorological Magazine**, v.100, p.97-111, 1971.

HAWKINS, G. P. et al. Characterization of freezing tolerance and vernalization in vernal, a spring type *Brassica napus* line derived from a winter cross. **Planta**, v.216, p.220-226, 2002.

HELDWEIN, A. B. et al. Análise das temperaturas mínimas do ar registradas em Santa Maria, RS. I- Estimativa das temperaturas mínimas do ar a 5 cm da superfície do solo relvado e do solo desnudo. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v.18, p.3-14, 1988.

HELDWEIN, A. B. **Determinação do tempo de molhamento de dosséis por orvalho através de métodos micrometeorológicos e convencionais**. 1993. 206f. Tese (Doutorado). Universidade Técnica de Berlin. Berlin, 1993.

HELDWEIN, A. B.; KRZYSCH, G. Estimativas da temperatura e da pressão de vapor d'água do ar no topo de uma cultura de batata. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p.101-105, 1999.

HOCEVAR, A.; MARTSOLF, J. D. Temperature distribution under radiation frost conditions in a central Pennsylvania valley. **Agricultural Meteorology**, v.8, p.371-383, 1971.

HU, Z. M. et al. Selection responses for molecular markers associated with anthocyanin coloration and low temperature growth traits in crested wheatgrasses. **Canadian Journal of Plant Science**, v.81, p.665–671, 2001.

HÜNER, N. P. A. et al. Photosynthesis of photo inhibition and low temperature acclimation in cold tolerant plants. **Photosynthesis Research**, v.37, p.19–39, 1993.

HURRY, V. M. et al. Effects of a short-term shift to low temperature and of long-term cold hardening on photosynthesis and ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and sucrose phosphate synthase activity in leaves of winter rye (*Secale cereale* L.). **Plant Physiology**, v.106, p.983–990, 1994.

IRIARTE, L. B.; VALETTI, O. E. **Cultivo de Colza**. 1ed. Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária – INTA, Buenos Aires, Argentina, 2008. 156p.

JACOBS, A. F. G.; VAN BOXEL, J. H.; EL-KILANI, R. M. M. Nighttime free convection characteristics within a plant canopy. **Boundary-Layer Meteorology**, v.71, p.375-391, 1994.

JACOBS, A. F. G.; VAN BLOXEL, J. H.; NIEVEEN, J. Nighttime exchange processes near the soil surface of a maize canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.82, p. 155–169, 1996.

JOHNSON, C. E. et al. Turbulent transfer in a barley canopy. **Agricultural Meteorology**, v.16, p.17-35, 1976.

JOHNSON-FLANAGAN, A. M.; THIAGARAJAH, M. R.; POMEROY, M. K. The impact of freezing during maturation on storage products in canola seeds. **Physiologia Plantarum**, v.81, p.301-308, 1991.

JOLY, A. B. **Botânica: introdução a taxonomia vegetal**. 11. ed. São Paulo: Ed. USP, 1993. 777 p.

JORDAN, D. N.; SMITH, W. K. Microclimate factors influencing the frequency and duration of growth season frost for sub-alpine plants. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.77, p.17–30, 1995a.

JULLIEN, A. et al. Characterization of the interactions between architecture and source-sink relationships in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) using the GreenLab model. **Annals of Botany**, London, v.107, n.5, p.765-779, 2011.

KALMA, J. D. et al. **Advances in bioclimatology 2. The Bioclimatology of Frost**. Berlin: Springer, 1992. 158p.

KOVALESKI, S. et al. Filocrono de diferentes genótipos de canola cultivados a campo. In: MOSTRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA TRIGO, 5., 2009, Passo Fundo. **Resumos...**Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do115_13.htm>. Acesso em: 14 julho 2018.

KOVALESKI, S. **Efeitos da geada na canola (*Brassica napus* L.) em função da distribuição da palha na superfície do solo**. 2015. 155f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2015.

KOVI, M. R.; ERGON, A.; ROGNOLLI, O. A. Freezing tolerance revisited-effects of variable temperatures on gene regulation in temperate grasses and legumes. **Current Opinion in Plant Biology**, v.33, p.140–146, 2016.

KRÜGER, C. A. M. B.; MEDEIROS, S. L. da; SILVA, J. A. G. Soma térmica e seus efeitos nos caracteres adaptativos e de produção na cultura da canola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16. 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFV, 2009. p. 1-5. 1 CD-ROM.

KRÜGER, C. A. M. B. **Arranjo de plantas e seus efeitos na produtividade de grãos e teor de óleo em canola**. 2011. 89f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2011.

LANGER, R. H. L. M.; OLUGBEMI, L. B. A study of New Zealand wheat: IV. Effect of extreme temperatures at different stages of development. **New Zealand Journal Agricultural Research**, v.13, p.878–886, 1970.

LARCHER, W. **Physiological Plant Ecology - Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups**. 3. ed. Berlin: Springer, 1995. 513p.

LARDON, A; TRIBOI-BLONDEL, A. M. Freezing injury to ovules, pollen and seeds in winter rape. **Journal Experimental Botanical**, v.277, p.1177-1181, 1994.

LARDON, A.; TRIBOI-BLONDEL, A. M. Cold and freeze stress at flowering: effects on seed yields in winter rapeseed. **Field Crops Research**, v. 44, p. 95-101, 1995.

LAWRENCE, E. N. Temperature and topography on radiation nights. **Meteorological Magazine**, v.87, p.71-75, 1958.

LEACH, J. E. et al. Effects of high plant populations on the growth and yield of winter oilseed rape (*Brassica napus*). **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.132, p.173–180, 1999.

LEGG, B. J. Turbulent diffusion within a wheat canopy. I: Measurement using nitrous oxide. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.101, p.597-610, 1975.

LEGG, R. J.; LONG, I. F. Turbulent diffusion within a wheat canopy. II. Results and interpretation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.101, p.611-628, 1975.

LEVITT, J. **Responses of Plants to Environmental Stresses**. 1. ed. New York: Academic Press, 1972. 497p.

LEVITT, J. **Responses of plants to environmental stresses**, 2 ed. New York: Academic Press, 1980. 606p.

LHOMME, J. P.; GUILIONI, L. A simple model for minimum crop temperature forecasting during nocturnal cooling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.123, p.55–68, 2004.

LONGLEY, R. W.; LOUIS-BYNE, M. Frost hollows in west central Alberta. Canada Dept. Transp., Toronto. **Meteorol. Branch Circ.**, v.4532, Tec.639, 1967, 15 p.

LOOSE, L. H. et al. **Variação vertical da temperatura em dossel de girassol**. In: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2011, Guarapari - ES. Congresso Brasileiro de Melhoramento de Plantas, 2011.

LOZANO, R. et al. Tomato flower abnormalities induced by low temperatures are associated with changes of expression of MADS-box genes. **Plant Physiology**, v.117, p.91–100, 1998.

LUZ, G. L da. et al. Temperatura base inferior e ciclo de híbridos de canola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.9, 2012.

MARTINO, D. L.; ABBATE, P. E. Frost damage on grain number in wheat at different spike developmental stages and its modelling. **European Journal of Agronomy**, v.103, p.13-23, 2019.

MAHFOOZI, S.; LIMIN, A. E.; FOWLER, D. B. Developmental regulation of low temperature tolerance in winter wheat. **Annals of Botany**, v. 87, p. 751–757, 2001.

MASAYA, P.; WHITE, J. W. **Adaptation to photoperiod and temperature**. In: VAN SCHOONHOVEN, A.; VOYSEST, O. (Eds.). Common Beans Research for Crop Improvement. Cali: CAB International and CIAT, 1991. p.455–500

MASSIGNAM, A. M.; DITTRICH, R. C. Estimativa do número e da probabilidade mensal de ocorrência de geadas para o estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.2, p.213-220, 1998.

MCCLINCHEY, S. L.; KOTT, L. S. Production of mutants with high cold tolerance in spring canola (*Brassica napus*). **Euphytica**, v.162, p.51-67, 2008.

MEDEIROS, S. S. et al. Estimativas e espacialização das temperaturas do ar mínimas, médias e máximas na Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.247-255, 2005.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of environmental physics**. 2 ed. New York: Edward Arnold, 1990. 291p.

MORRISON, M. J.; McVETTY, P. B. E.; SHAYKEWICH, C. F. The determination and verification of a baseline temperature for the growth of westar summer rape. **Canadian Journal of Plant Science**, v.69, p.455-464, 1989.

MOTA, F. S. **Meteorologia agrícola**. 5.ed. São Paulo: Nobel, 1981. 376p.

NANDA, R.; BHARGAVA, S. C.; RAWSON, H. M. Effect of sowing date on rates of leaf appearance, final leaf numbers and areas in *Brassica campestris*, *B. Juncea*, *B. Napus* and *B. Carinata*. **Field Crops Research**, v.42, p.125-134, 1995.

NIED, A. H. **Parâmetros bioclimáticos e respostas da canola ao ambiente físico**. 150 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 2013.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 1989. 421 p.

NISHIYAMA, I. **Damage due to extreme temperatures**. In: MATSUO, T. et al. (Eds.), *Science of the Rice Plant*. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1995. p.769–812.

OLIVEIRA, H. T. **Climatologia das temperaturas mínimas e probabilidade de ocorrência de geada no Estado do Rio Grande do Sul**. 81f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre. 1997

OLIVEIRA NETO, S. N. de et al. Estimativa de temperaturas mínima, média e máxima do território brasileiro situado entre 16 e 24° latitude sul e 48 e 60° longitude oeste. **Engenharia na Agricultura**, v.10, p.8-17, 2002.

ÖQUIST, G.; HURRY, V. M.; HÜNER, N. P. A. Low temperature effects on photosynthesis and correlation with freezing tolerance in spring and winter cultivars of wheat and rye. **Plant Physiology**, v.101, p.245–250, 1993.

OUELLET, F., et al. Regulation of a wheat actin-depolymerizing factor during cold acclimation. **Plant Physiology**, v.125, p.360-368, 2001.

OUELLET, F.; CHARRON, J. **Cold acclimation and freezing tolerance in plants**. In: *Encyclopedia of Life Science*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2013.

PEARCE, R. S. Plant freezing and damage. **Annals of Botany**, v.87, p.417-424, 2001.

PEDRO JÚNIOR, M. J.; CAMARGO, M. B. P. de; MACEDO, L. A. Guia para o observador dos postos agrometeorológicos do Instituto Agronômico. Boletim Técnico. **Instituto Agronômico de Campinas**, Campinas, v.116, p.1-59, 1987.

PEDRO JÚNIOR, M. J. et al. **Estimativa das temperaturas médias mensais das máximas e das mínimas para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico, 1991. 11p.

PENMAN, H. L.; LONG, I. F. Weather in wheat: an essay in micrometeorology. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.86, p.16-50, 1960.

PEREIRA DA CRUZ, R.; MILACH, S. C. K.; FEDERIZZI, L. C. Rice cold tolerance at the reproductive stage in a controlled environment. **Scientia Agricola**, v.63, n.3, p.255–261, 2006.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia agrícola**. Piracicaba: Esalq, Departamento de Ciências Exatas, 2007. 192p.

PEZZOPANE, J. E. M. et al. Radiação líquida e temperatura de folha no interior de estufa com cobertura plástica, durante o período noturno. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.3, p.1-4, 1995.

PIELKE, R. A. **Mesoscale Meteorological Modeling**. Academic Press, Orlando, 1984. 612p.

PILAU, F. G. et al. Balanço de energia de uma área de soja sob plantio direto pelo método da razão de Bowen. **In: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju. Anais**. Aracaju: Embrapa, 2007.

PIÑEIRO, G. et al. How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? **Ecological Modelling**, v.216, p.316-322, 2008.

PINTO, H. S.; ORTOLANI, A. A.; ALFONSI, R. R. Estimativa das temperaturas médias mensais do Estado de São Paulo em função de altitude e latitude. **Caderno de Ciências da Terra**, v.23, p.1-20, 1972.

PINTO, H. S.; ALFONSI, R. R. Estimativa das temperaturas médias, máximas e mínimas mensais no Estado do Paraná, em função de altitude e latitude. **Caderno de Ciências da Terra**, v.52, p.1-28, 1974.

PINTO, H. S. et al. Estimation of frost damage in coffee trees in the State of São Paulo, Brazil. **In: Conference on Agriculture and Forest Meteorology, 13., Boston, 1977. Boston, American Meteorological Society, 1977.**

PORTÉ, A.; HUARD, F.; DREYFUS, P. Microclimate beneath pine plantation, semimature pine plantation and mixed broadleaved-pine forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.126, p.175-182, 2004.

RAHN, J. J.; BROWN, D. M. Estimating corn canopy extreme temperatures from shelter values. **Agric. Meteorol.**, v.8, p.129-138, 1971.

RAO, G.; AJAY, J.; SHIVANNA, K. R. Effects of high temperature stress on *Brassica* pollen: viability, germination and ability to set fruits and seeds. **Annals of Botany**, v.68, p.193-198, 1992.

RAPACZ, M. Frost resistance and cold acclimation abilities of spring-type oilseed rape. **Plant Science**, v. 147, p. 55-64, 1999.

RAPACZ, M., JANOWIAK, F. Physiological effects of winter rape (*Brassica napus* var. *oleifera*) prehardening to frost. I. Frost resistance and photosynthesis during cold acclimation. **Journal Agronomy Crop Science**, v.181, p.13-20, 1999.

RAPACZ, M. Regulation of frost resistance during cold de-acclimation and re-acclimation in oilseed rape. A possible role of PSII redox state. **Physiologia Plantarum**, v.115, p.236-243, 2002.

RAPACZ, M.; TOKARZ, K.; JANOWIAK, F. The initiation of elongation growth during long-term low-temperature stay of spring-type oilseed rape may trigger loss of frost resistance and changes in photosynthetic apparatus. **Plant Science**, v.161, p.221-230, 2001.

RAPACZ, M. et al. Overwintering of herbaceous plants in a changing climate. Still more questions than answers, **Plant Science**, v.225, p.34-44, 2014.

RAPACZ, M.; JURCZYK, B.; SASAL, M. Deacclimation may be crucial for winter survival of cereals under warming climate. **Plant Science**, v.256, p.5–15, 2017.

REPO, T. et al. Cold acclimation of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) at its northernmost distribution range. **Environmental and Experimental Botany**, v.63, p.59–70, 2008.

RIFE, C. L.; ZEINALI, H. Cold tolerance in oilseed rape over varying acclimation durations. **Crop Science**, v.43, p.96-100, 2003.

ROBERTSON, M. J.; HOLLAND, J. F. Production of risk of canola in the semi-arid subtropics of Australia. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.55, p.525-538, 2004.

ROSENBERG, J. N. **Microclimate: The biological environment**. New York: Wiley & Sons, 1983. 315p.

RYMEN, B. et al. Cold nights impair leaf growth and cell cycle progression in maize through transcriptional changes of cell cycle genes. **Plant Physiology**, v.143, p.1429–1438, 2007.

SARTORI, M. G. B. A dinâmica do Clima do Rio Grande do Sul: indução empírica e conhecimento científico. **Terra Livre**, v.1, n.20, p.27-49, 2003.

SATAKE, T.; HAYASE, H. Male sterility caused by cooling treatment at the Young microspore stage in rice plants. Estimations of pollen developmental stage and the most sensitive stage to coolness. **Crop Science Society of Japan**, v.39, p.468–473, 1973

SAUGIER, B. Transports turbulents de CO₂ et de vapeur d'eau au-dessus et à l'intérieur de la végétation. Méthodes de mesure micrométéorologiques. **Acta Oecologica**, v.5, p.179-223, 1970.

SĂULESCU, N. N.; BRAUN, H. J. **Cold tolerance**. In: REYNOLDS, M.P. et al. (Eds.). Application of physiology in wheat breeding. Mexico: CIMMYT, 2001. p. 111-123

SCHILLING, B. S. **Physiological and molecular responses of spring and winter canola (*Brassica napus*) during cold acclimation**. 150f. Tese (PhD). University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, 2004.

SENTELHAS, P. C.; ORTOLANI, A. A.; PEZZOPANE, J. R. M. Estimativa da temperatura mínima de relva e da diferença de temperatura entre o abrigo e a relva em noites de geada. **Bragantia**, v.54, n.2, p.437- 445, 1995.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. **Entendendo a geada, 2012**. Disponível em <<http://www.climaonline.com.br/artigo03.php>> Acesso em: 14 setembro 2018.

SHAMSI, M. et al. Study of the effects of planting date on the phenological and morphological features, the seed yield, and the components of the yield of oilseed rape. **International Journal of Biology**, v.4, n.1, p. 49-56, 2012.

SHARAFIZADEH, M. et al. Effect of planting date and planting pattern on quality and quantity yield of canola hybrid seed (hyola 401). **American-Eurasian Network for Scientific Information**, p. 4-8, 2012.

SILVA, J. G.; SENTELHAS, P. C. Diferença de temperatura mínima do ar medida no abrigo e na relva e probabilidade de sua ocorrência em eventos de geada no Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.1, p.9-15, 2001.

SILVA, E. P. et al. Fatores abióticos envolvidos na tolerância de trigo a geada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n.10, p.1257-1265, 2008.

SILVA, A.; MINUZZI, R. B. Modelagem estatística para previsão de geada de radiação. **Ciência e Natura**, v.38, p.1453-1460, 2016.

SMITH, E.P; ROSE, K.A. Model goodness-of-fit analysis using regression and related techniques. **Ecological Modelling**, v.77, p.49-64, 1995.

SMITH, E.P; ROSE, K.A. Model goodness-of-fit analysis using regression and related techniques. **Ecological Modelling**, v.77, p.49-64, 1995.

SNYDER, R.; PAW, U.; THOMPSON, J. **Passive frost protection of trees and vines**. University of California: DANR Leaflet, N° 21429, 1987.

SNYDER, R. L.; MELO-ABREU, J. P. **Protección contra las heladas: fundamentos, practica y economia**. Roma: Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO), 2010. 242 p.

SRINIVASAN, A.; JOHANSEN, C.; SAXENA, N. P. Cold tolerance during early reproductive growth of chickpea (*Cicer arietinum* L.): characterization of stress and genotypic variation in pod set. **Field Crops Research**, v.57, n.2, p.181-193, 1998.

STIGTER, C. J.; BIMIE, J.; JANSEN, P. Multi-point temperature measuring equipment for crop environment, with some results on horizontal homogeneity in a maize crop. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v.24, p.223-237, 1976

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre, Emater/RS, 2008. 222 p

STRECK, N. A.; LANGER, J. A.; LAGO, I. Maize leaf development under climate change scenarios. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 1227-1236, 2010.

SZÚCS, P.; VEISZ, O.; BEDO, Z. Frost tolerance of *Triticum durum* (Desf.) genotypes in soils with various moisture contents. **Cereal Research Communications**, Szeged, v.31, n.1-2, p.153-160, 2003.

TABONY, R. C. Relations between minimum temperatures and topography in Great Britain. **Journal of Climatology**, v.5, p.503-520, 1985.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal** [tradução: Alexandra Antunes Mastroberri et al.; revisão técnica: Paulo Luiz de Oliveira, 6. Ed., Porto Alegre, RS: Artmed. 888 p. 2017.

TAKASHIMA, N. E. et al. Environmental factors affecting yield variability in spring and winter rapeseed genotypes cultivated in the southeastern Argentine Pampas. **European Journal of Agronomy**, v.48, p.88-100, 2013.

TAKEOKA, Y. et al. Reproductive Adaptation of Rice to Environmental Stress. Tokyo: Scientific Societies Press/Elsevier, 1992. 237p.

TASSEVA, G. et al. Changes in the endoplasmic reticulum lipid properties in response to low temperature in *Brassica napus*. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.42, p.811-822, 2004.

TAYO, T. O.; MORGAN, D. G. Quantitative analysis of the growth, development and distribution of flowers and pods in oilseed rape (*Brassica napus*). **Journal Agriculture Science**, v.85, p.103-110, 1975.

TAZZO, I. F. et al. Variação vertical da temperatura do ar em cultivos de batata. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.5, p. 486-492, 2008.

THAKUR, P. et al. Cold stress effects on reproductive development in grain crops: an overview. **Environmental and Experimental Botany**, v.67, p.429–443, 2010.

THOMAS, P. The growers' manual: Canola Council of Canada, 2014. Disponível em: <<http://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/crop-development/growth-tages/>>. Acesso em 20 de setembro de 2018.

THOMASHOW, M. F. Plant cold acclimation: freezing tolerance genes and regulatory mechanisms. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.50, p.571-599, 1999.

TOMM, G. O. et al. **Tecnologia para produção de canola no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo. Embrapa Trigo, 2009. 88p.

TONGSON, E. J. U. **Development of frost tolerance in *Brassica napus* using *Arabidopsis* ACYL-COENZYME A-BINDING PROTEIN6**. 251f. Tese (Doctor of Philosophy). Faculty of Veterinary and Agricultural Sciences, Melbourne, 2017.

UEMURA, M.; STEPONKUS, P.L. Modification of the intracellular sugar content alters the incidence of freeze-induced membrane lesions of protoplasts isolated from *Arabidopsis thaliana* leaves. **Plant Cell Environment**, v.26, p. 1083-1096, 2003.

UEMURA, M. et al. Responses of the plasma membrane to low temperatures. **Plant Physiology**, v.126, p.81–89, 2006.

TRISCHUK, R. G. et al. Cold acclimation, de-acclimation and re-acclimation of spring canola, winter canola and winter wheat: the role of carbohydrates, cold-induced stress

proteins and vernalization. *Environmental and Experimental Botany*, v.106, p.156–163, 2014.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Brasília: INMET. 2006. 463p.

VILLA NOVA, N. A. **Estudos sobre balance de energia em cultura de arroz**. 89p. Tese (Livre Docência), Escola Superior de Agronomia Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1973.

VOGG, G. et al. Frost hardening and photosynthetic performance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles. I. Seasonal changes in the photosynthetic apparatus and its function. **Planta**, v.204, p.193-200, 1998.

WALTON, G. Phenology, physiology and agronomy. In: INTERNATIONAL RAPSEED CONGRESS, 10., 1999, Cambera. **Proceedings...** Cambera: Regional Institute, 1999. Disponível em: <<http://www.regional.org.au/au/gcirc>>. Acesso em: 27 setembro 2018.

WANNER, L.A.; JUNTILLA, O. Cold induced freezing tolerance in Arabidopsis. **Plant Physiology**, v.120, p.391–400, 1999.

WESTGATE, M.E.; BOYER, J.S. Carbohydrate reserves and reproductive development at low water potentials in maize. **Crop Science**, v.25, p.762–769, 1985.

WEXLER, A. **Humidity and Moisture**. New York: Reinhold, v.2, 1965.

WILEN, R. W. et al. Effects of Abscisic Acid (ABA) and ABA analogs on freezing tolerance, low-temperature growth, and flowering in rapeseed. **Journal Plant Growth Regulation**, v.13, p.235-241, 1994.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, n.2, p.184-194, 1981.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v.63, n.11, 1982.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.8995-9005, 1985.

WILLMOTT, C.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v.30, p.79–82, 2005.

WINKEL, T. et al. Assessing the protective effect of vertically heterogeneous canopies against radiative frost: the case of quinoa on the Andean Altiplano. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.1759-1768, 2009.

WREGE, M. S. et al. **Atlas climático da região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: EMBRAPA Clima Temperado, 2012. 333p.

APÊNDICE B – ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DA CANOLA

Estádios fenológicos da canola, adaptado de CETIOM, 2004 (Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux et du Chanvre). Passo Fundo, RS – 2019. Fonte: Adaptado de Iriarte e Valetti, (2008).

Estádio	Caracterização	Subperíodo
S	Semeadura	Plântula
A	Cotilédones visíveis (emergência)	
B1	Uma folha verde visível	
B2	Duas folhas verdes visíveis	
B3 a B6	Três a seis folhas visíveis	Roseta
C1	Aparecimento de folhas novas (Final da roseta)	
C2	Entrenós visíveis e vestígios das ramificações secundárias	Alongamento
D1	Inflorescência visível	
D2	Botão coberto com inflorescência secundárias visíveis	
E	Botão separado	
F1	Primeiras flores abertas (antese)	Florescimento
F2	Alongamento da ramificação principal, várias flores abertas	
G1	Queda de pétalas, 10 primeiras siliquas com 2 cm	
G3	Siliquas com mais de 4 cm	
FF	Final do florescimento	Maturação
G4	10% das siliquas com grãos com coloração escura	
G5	90% das siliquas com grãos com coloração escura	

17/07/2016	-3,19	G1	E	F2	G1	D2	F1	F1	D1	D2	V	V	V	V	V	V	V	V	V
18/07/2016	-5,10	G1	E	F2	G1	D2	F1	F1	D1	D2	V	V	V	V	V	V	V	V	V
19/07/2016	0,85	G1	E	F2	G1	D2	F1	F1	D1	D2	V	V	V	V	V	V	V	V	V
20/07/2016	-2,06	G1	E	F2	G1	D2	F1	F1	D1	D2	V	V	V	V	V	V	V	V	V
21/07/2016	-2,87	G1	E	F2	G1	D2	F1	F1	D1	D2	V	V	V	V	V	V	V	V	V
22/07/2016	1,81	G1	E	F2	G1	D2	F1	F1	D1	D2	V	V	V	V	V	V	V	V	V
27/07/2016	1,55	G3	F1	G1	G1	E	F2	F2	D1	E	D1	V	V	V	V	V	V	V	V
28/07/2016	0,26	G3	F1	G1	G1	E	F2	F2	D1	E	D1	V	V	V	V	V	V	V	V
09/08/2016	2,05	G3	G1	G3	G3	F2	G1	G1	E	F2	F2	E	F1	F1	D1	E	D1	V	V
10/08/2016	-0,47	G3	G1	G3	G3	F2	G1	G1	E	F2	F2	E	F1	F1	D1	E	D1	V	V
12/08/2016	1,45	G3	G1	G3	G3	F2	G1	G1	E	F2	F2	E	F1	F1	D1	E	D1	V	V
21/08/2016	-0,74	FF	G3	FF	FF	G1	G3	G3	F2	G1	G1	F2	G1	F2	E	F1	F1	D1	E
22/08/2016	-3,15	FF	G3	FF	FF	G1	G3	G3	F2	G1	G1	F2	G1	F2	E	F1	F1	D1	E
23/08/2016	-1,92	FF	G3	FF	FF	G1	G3	G3	F2	G1	G1	F2	G1	F2	E	F1	F1	D1	E
08/09/2016	0,79	MF	FF	G4	G4	G3	FF	FF	G3	G3	G3	G1	G3	G3	F2	G1	G1	F1	F2
09/09/2016	1,35	MF	FF	G4	G4	G3	FF	FF	G3	G3	G3	G1	G3	G3	F2	G1	G1	F1	F2
15/09/2016	0,70	C	G4	MF	MF	FF	G4	G4	G3	FF	FF	G3	FF	G3	G1	G3	G3	F2	G1
16/09/2016	-0,01	C	G4	MF	MF	FF	G4	G4	G3	FF	FF	G3	FF	G3	G1	G3	G3	F2	G1
20/09/2016	-0,01	C	G4	MF	MF	FF	G4	G4	G3	FF	FF	G3	FF	G3	G1	G3	G3	F2	G1
26/09/2016	-0,32	C	G4	C	C	G4	MF	MF	FF	G4	FF	G3	FF	FF	G3	G3	G3	G1	G3

09/10/2016	-1,22	C	C	C	C	MF	C	C	G4	MF	MF	FF	G4	G4	FF	FF	G4	G3	FF
29/10/2016	1,63	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	MF	G4	MF	MF	FF	G4
Geadas	Tn (°C)	1ª data de semeadura				2ª data de semeadura			3ª data de semeadura			4ª data de semeadura							
		08/04/2017				02/05/2017			22/05/2017			16/06/2017							
18/07/2017	-4,04	FF	E	G3	F2	V	V	V	V	V	V	V	V	V	.	.	.	.	.
19/07/2017	-2,58	FF	E	G3	F2	V	V	V	V	V	V	V	V	V	.	.	.	.	.
21/08/2017	1,97	MF	G3	G4	G3	F1	G1	G1	D2	F1	V	V	V	V	.	.	.	.	.

V: Período vegetativo;

D1: Inflorescência visível;

D2: Botão coberto com inflorescências secundárias visíveis;

E: Botão separado;

F1: Primeiras flores abertas (antese);

F2: Alongamento da ramificação principal, várias flores abertas;

G1: Queda de pétalas, 10 primeiras siliquas com 2 cm;

G3: Siliquas com mais de 4 cm;

FF: Final do florescimento;

G4: 10% das siliquas com grãos com coloração escura;

MF: Maturação fisiológica;

C: Colheita.

APÊNDICE D – DATAS COM AVALIAÇÕES DA TEMPERATURA DAS ESTRUTURAS REPRODUTIVAS

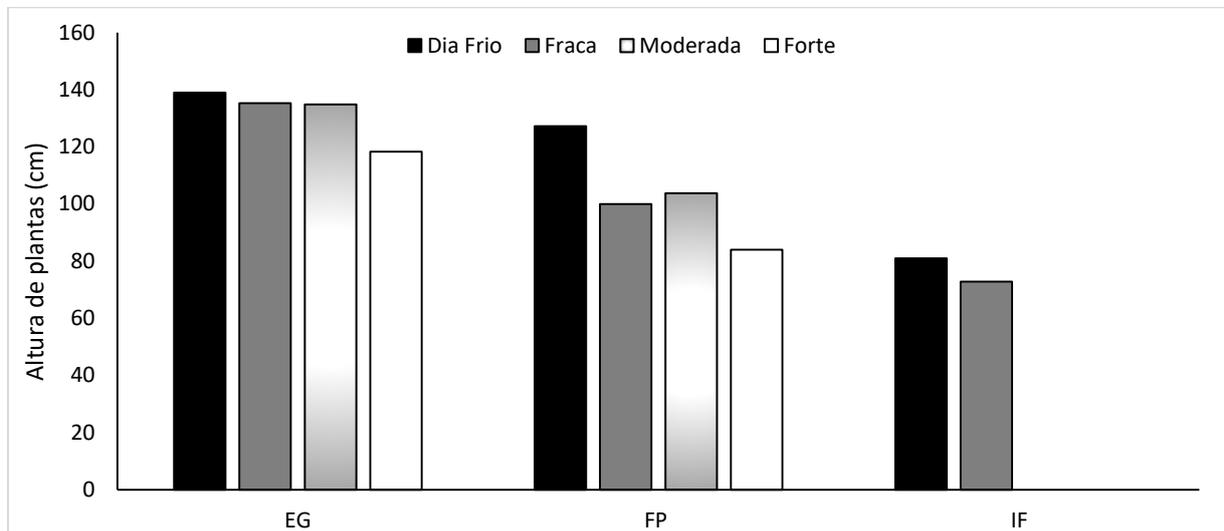
Datas com avaliações de temperatura das estruturas reprodutivas, temperatura mínima diária do ar na referência (R) e próximo as estruturas reprodutivas (TnE), nas respectivas datas, número de botões florais, flores e siliquis com temperatura medida e data de semeadura em que ocorreram as avaliações, nos experimentos de 2016 e 2017. Passo Fundo, RS – 2019.

Datas com medição da temperatura das estruturas	R (°C)	TnE (°C)	Estruturas Reprodutivas			Data de Semeadura
			Número de Botões florais	Número de Flores	Número de Siliquis	
08/06/2016	-2,69	-3,06	2	3	0	1 ^a
09/06/2016	-7,58	-7,50	3	2	0	1 ^a
10/06/2016	-5,87	-5,97	2	2	0	1 ^a
11/06/2016	-8,33	-8,52	3	2	0	1 ^a
12/06/2016	-8,59	-8,93	3	2	0	1 ^a
13/06/2016	-5,83	-6,88	2	2	0	1 ^a
14/06/2016	1,22	-1,06	3	2	0	1 ^a
15/06/2016	4,30	3,14	3	2	0	1 ^a
16/06/2016	11,62	11,18	2	2	0	1 ^a
17/06/2016	12,33	12,32	3	2	0	1 ^a
18/07/2016	-5,10	-4,91	0	8	7	2 ^a
19/07/2016	0,85	-0,10	0	8	7	2 ^a
20/07/2016	-2,00	-2,62	0	8	7	2 ^a
21/07/2016	-2,87	-2,70	0	7	6	2 ^a
22/07/2016	1,81	0,69	0	5	5	2 ^a
23/07/2016	2,58	1,51	0	6	6	2 ^a
25/07/2016	9,68	8,36	0	6	5	2 ^a
26/07/2016	13,76	13,32	0	6	6	2 ^a
22/08/2016	-3,15	-3,15	0	7	9	3 ^a
23/08/2016	-1,92	-1,98	0	7	8	3 ^a
24/08/2016	2,94	2,84	0	7	7	3 ^a
25/08/2016	5,87	5,09	0	7	7	3 ^a
26/08/2016	11,57	11,09	0	5	7	3 ^a
20/06/2017	2,32	1,90	0	4	6	1 ^a
21/06/2017	7,39	7,74	0	5	6	1 ^a
22/06/2017	10,65	10,43	0	5	6	1 ^a

23/06/2017	12,74	12,35	0	5	6	1 ^a
24/06/2017	13,03	12,74	0	5	6	1 ^a
25/06/2017	11,45	5,09	0	4	6	1 ^a
18/07/2017	-4,04	-5,37	0	7	12	2 ^a
19/07/2017	-2,58	-3,52	0	7	11	2 ^a
20/07/2017	1,58	0,33	0	7	10	2 ^a
22/07/2017	5,60	2,71	0	6	6	2 ^a
23/07/2017	8,00	7,17	0	6	6	2 ^a

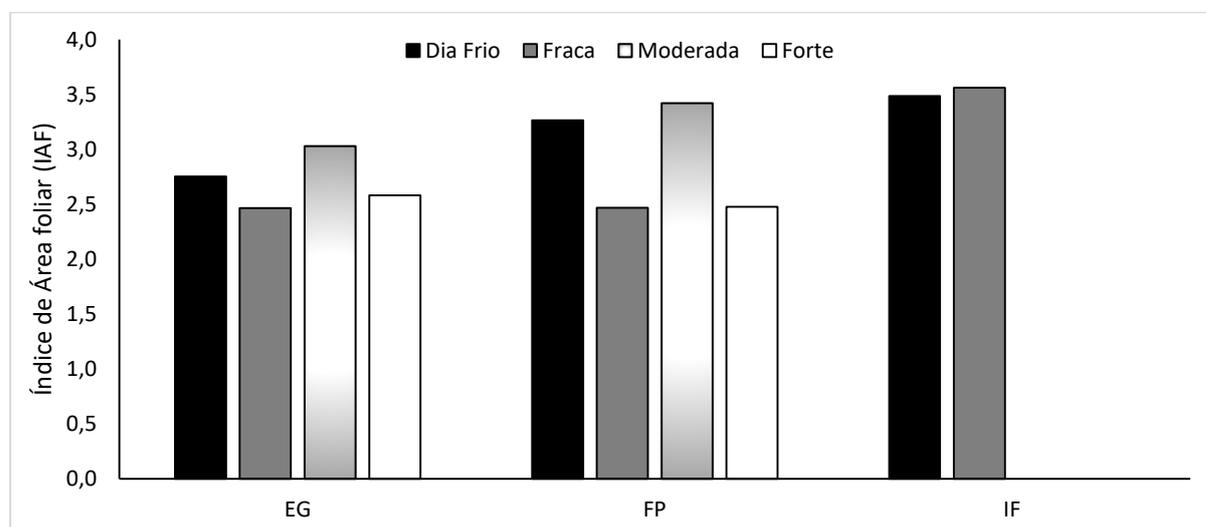
APÊNDICE E – ALTURA DE PLANTAS DA CANOLA

Altura média de plantas (cm) de canola no enchimento de grãos (EG), florescimento pleno (FP) e início do florescimento (IF) em dias frios (DF), geadas fracas (GF), moderadas (GM) e fortes (GT) nos anos de 2016 e 2017. Passo Fundo, RS – 2019.



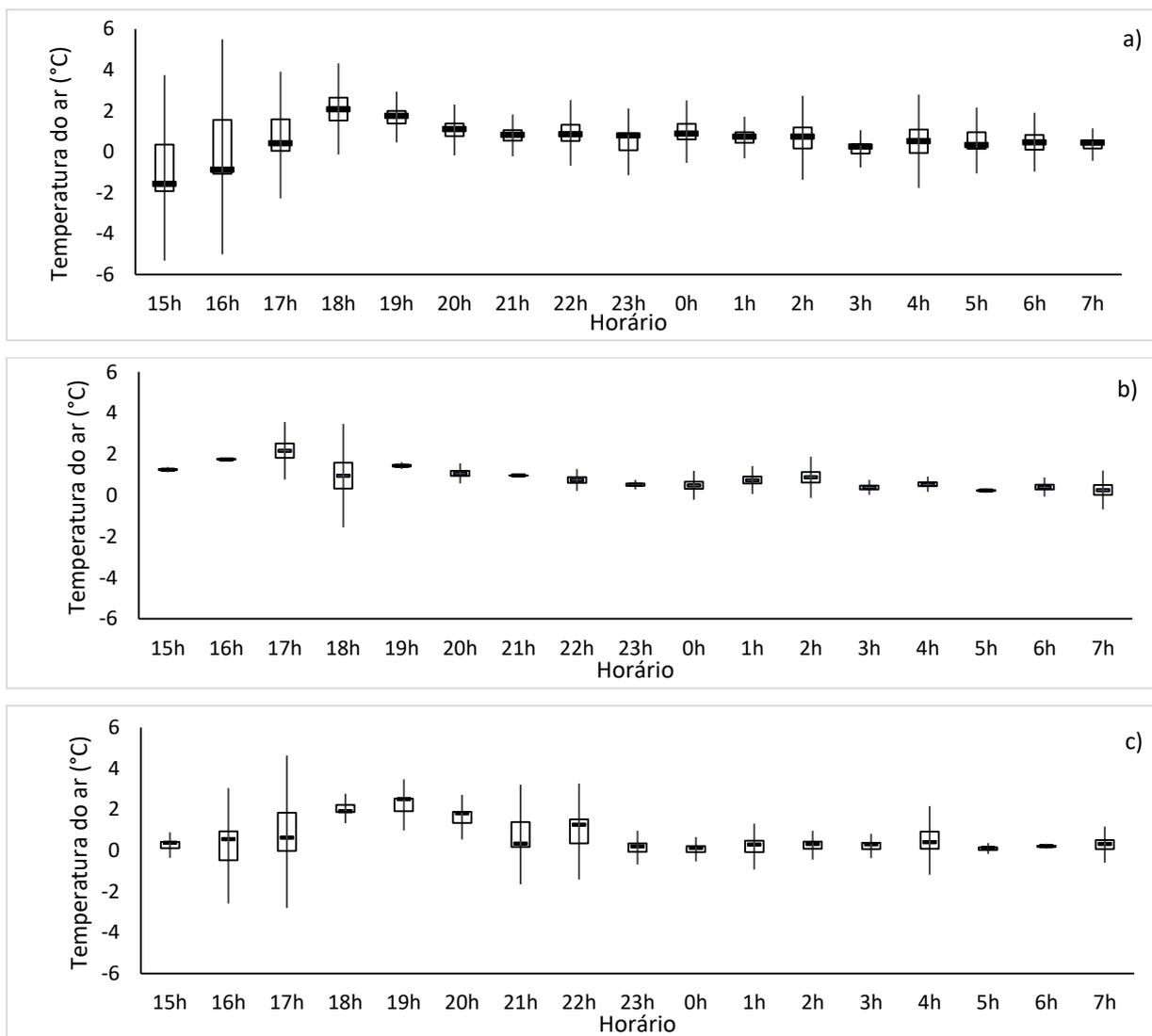
APÊNDICE F – ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF) DE CANOLA

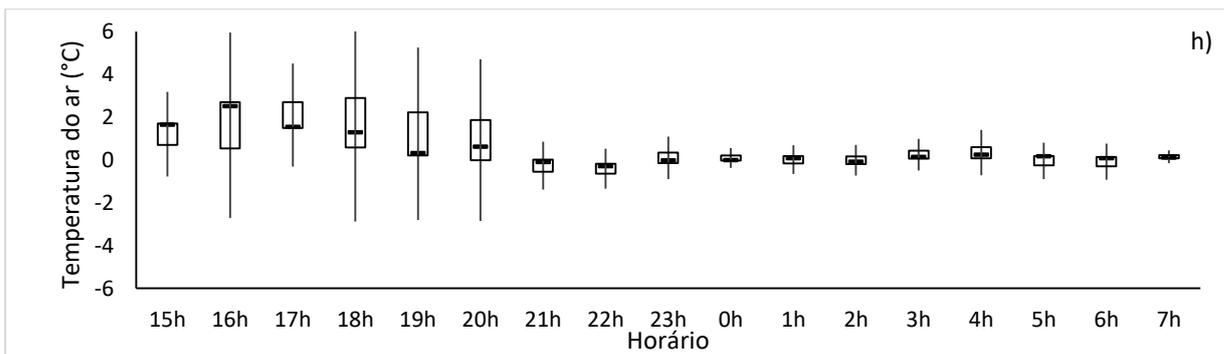
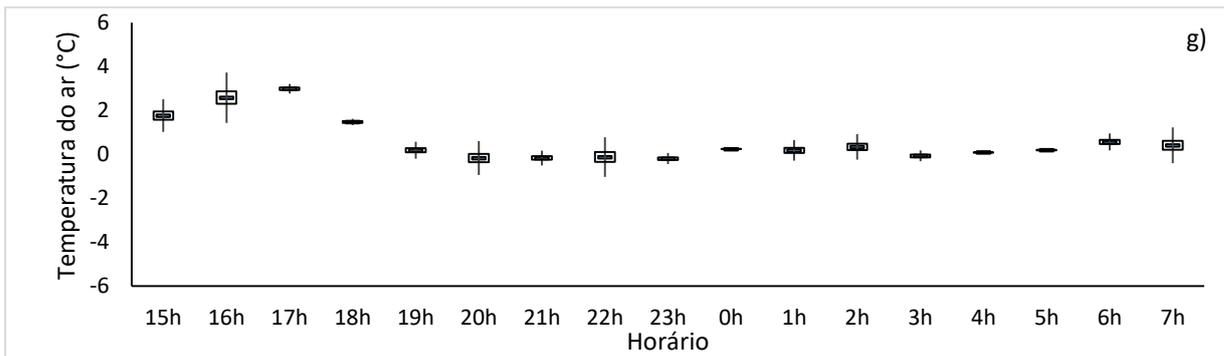
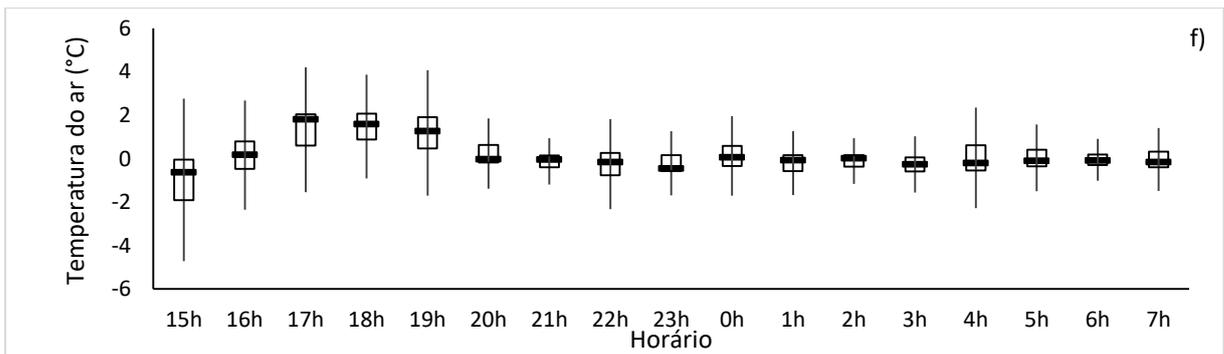
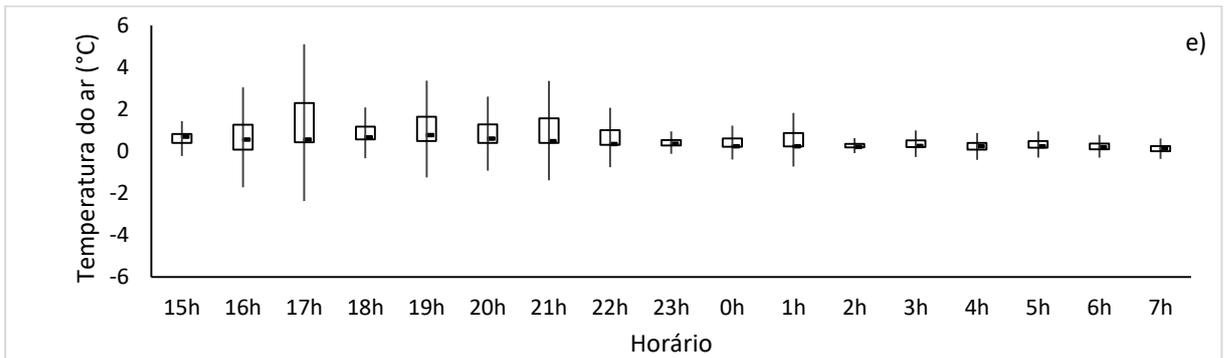
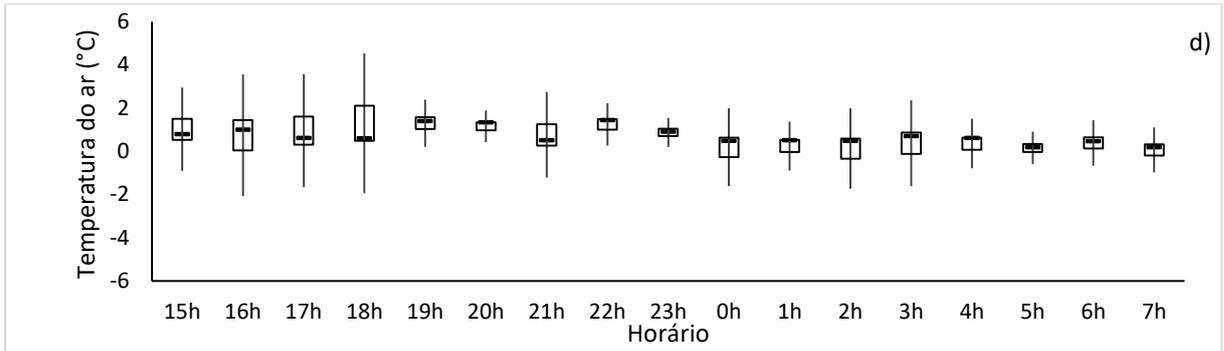
Índice de área foliar (IAF) de canola no enchimento de grãos, florescimento pleno e início do florescimento em dias frios (DF), geadas fracas (GF), moderadas (GM) e fortes (GT) nos anos de 2016 e 2017. Passo Fundo, RS – 2019.

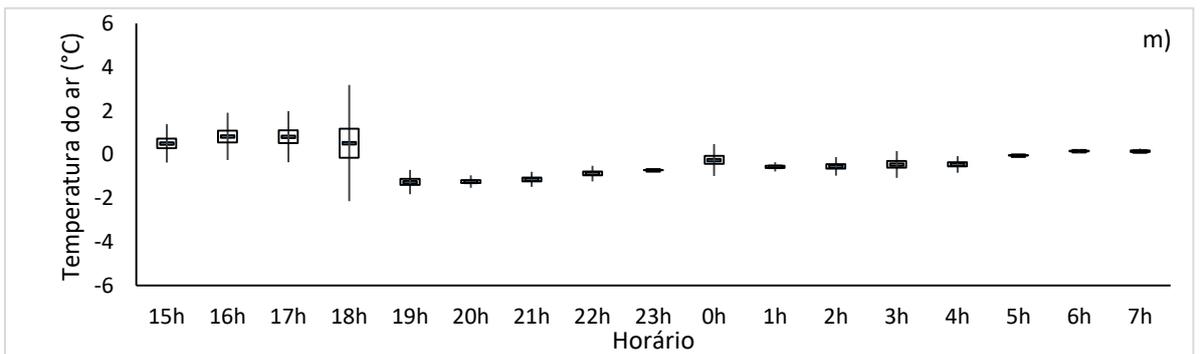
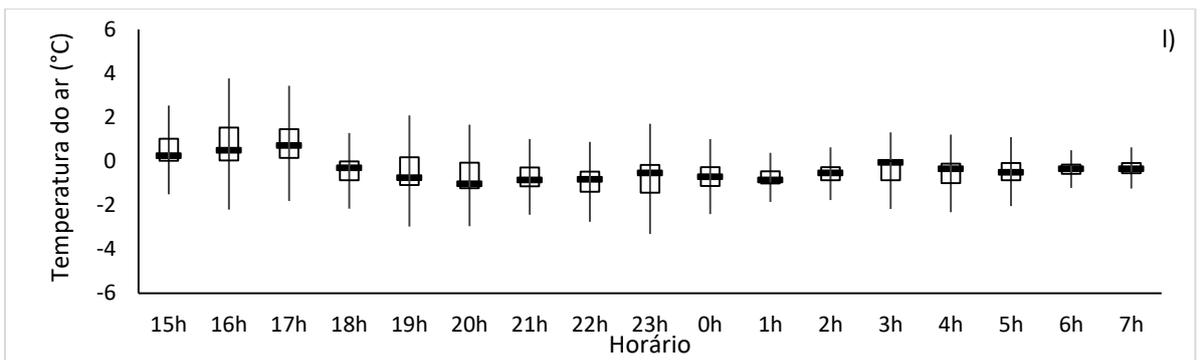
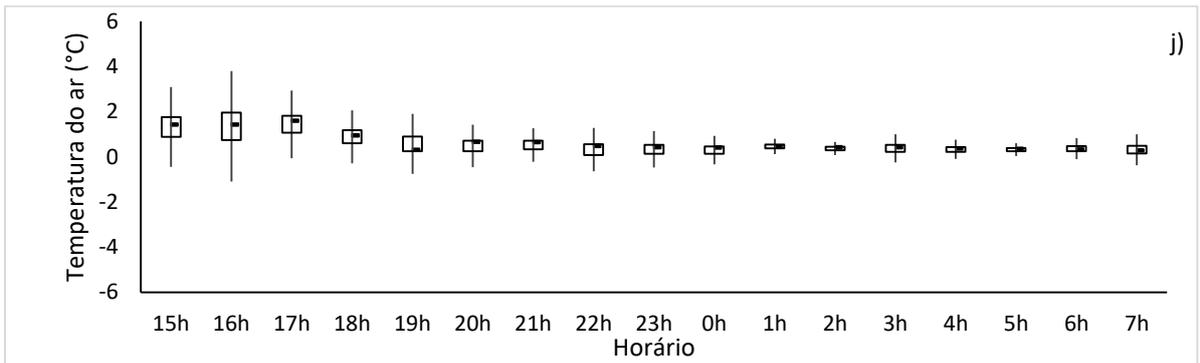
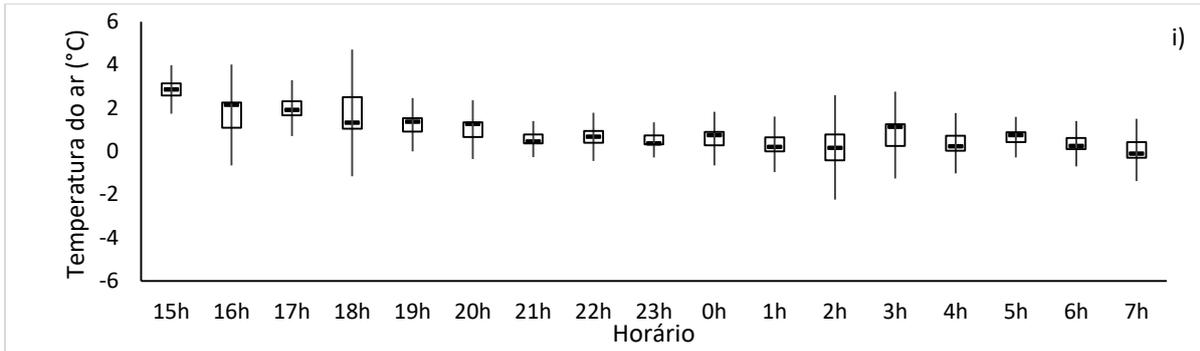


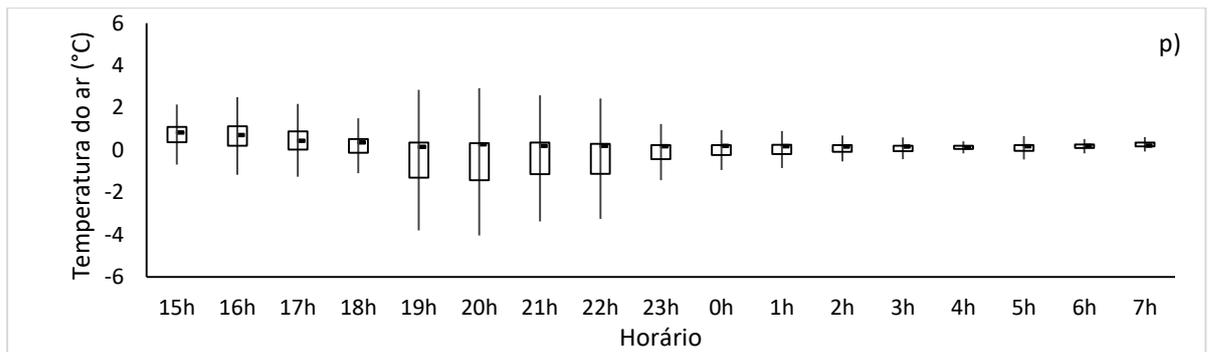
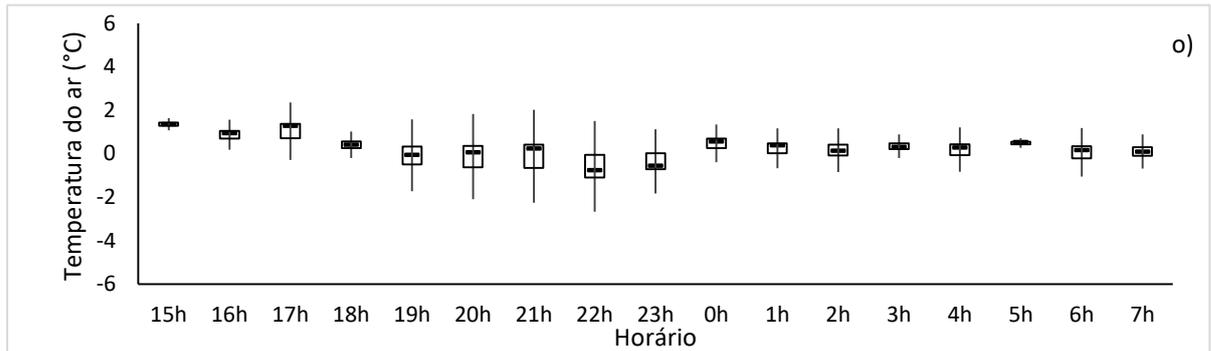
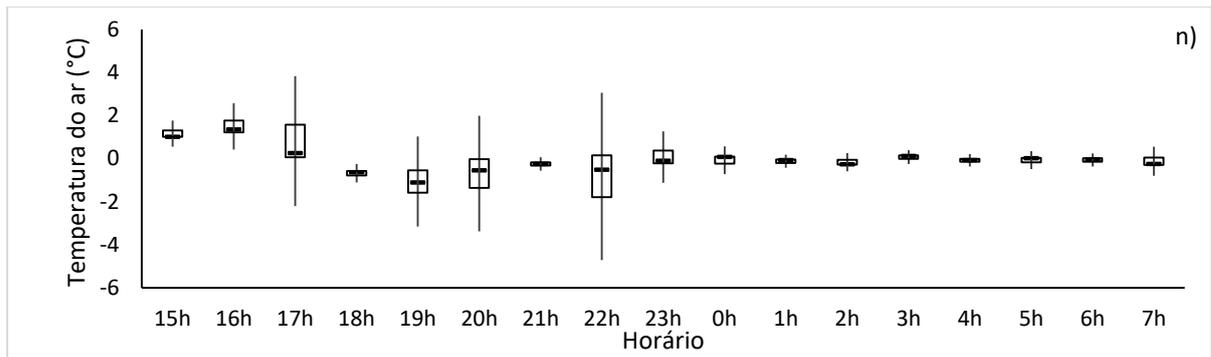
APÊNDICE G - BOX – PLOT ENTRE A DIFERENÇA DA TEMPERATURA DO AR E ESTRUTURAS REPRODUTIVAS

Box-plot da diferença entre a temperatura do ar na referência e próximo as estruturas reprodutivas no período de 15h a 7h de datas que antecederam a ocorrência de GS (a), GM (b), GF (c), DF (d) e DN (e), da diferença entre a temperatura do ar na referência e da temperatura das estruturas reprodutivas no período de 15h a 7h de datas que antecederam a ocorrência de GS (f), GM (g), GF (h), DF (i) e DN (j) e da diferença entre a temperatura do ar próximo as estruturas reprodutivas e da temperatura das estruturas reprodutivas no período de 15h a 7h de datas que antecederam a ocorrência de GS (l), GM (m), GF (n), DF (o) e DN (p) nos anos de 2016 e 2017. Passo Fundo, RS – 2019.



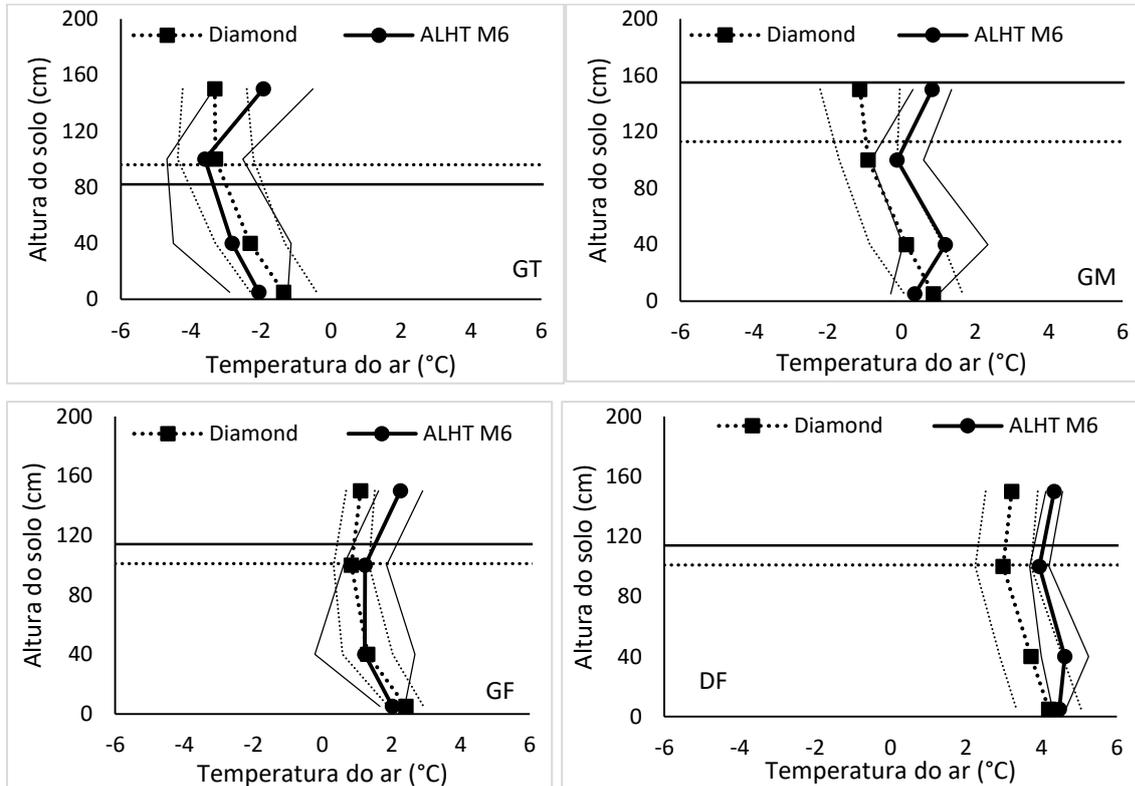






APÊNDICE H – PERFIL DE TEMPERATURA MÍNIMA DO AR NO DOSEL DE DIFERNTES GENÓTIPOS DA CANOLA EM DIFERENTES INTENSIDADE DE GEADA

Perfil de temperatura mínima do ar nas cultivares Alht M6 e Diamond nos níveis de 5, 40, 100 e 150 cm acima do solo em geadas de intensidade forte (GT), moderada (GM), fraca (GF) e dias frios (DF) no ano de 2016. Passo Fundo, RS – 2019.



APÊNDICE I – MÉDIA, DESVIO PADRÃO, VARIÂNCIA, TEMPERATURA MÍNIMA DO AR MAIS ALTA E BAIXA, ASSIMETRIA E CURTOSE DOS MODELOS 1 A 6

Média, desvio padrão, variância, temperatura mínima mais baixa (Tn mínima, temperatura mínima mais alta (Tn máxima), assimetria e curtose da temperatura mínima do ar observada próximo as estruturas reprodutivas da canola (TnE/o), TnE/e estimada pelo modelo 1 (TnE/e M1), TnE/e estimada pelo modelo 3 (TnE/e M3), TnE/e estimada pelo modelo 6 (TnE/e M6), temperatura mínima das estruturas reprodutivas observada (Tner/o), temperatura mínima das estruturas reprodutivas estimada pelo modelo 2 (Tner/e M2), Tner estimada pelo modelo 4 (Tner/e M4), Tner estimada pelo modelo 5 (Tner/e M6), no ano de 2017. Passo Fundo, RS – 2019.

Variável	Média (°C)	Desvio padrão	Variância	Tn mínima (°C)	Tn máxima (°C)	Assimetria	Curtose
TnE/o	9,92	4,30	18,52	-5,37	17,54	-2,63*	2,78*
TnE/e M1	11,02	3,86	14,89	-1,89	17,47	-2,88*	2,95*
TnE/e M3	9,61	4,87	23,72	-8,99	17,16	-2,77*	4,50*
TnE/e M5	10,50	4,10	16,77	-4,07	19,12	-2,63*	3,19*
Tner/o	5,52	6,14	37,64	-5,33	13,00	-0,27 ^{ns}	-0,64 ^{ns}
Tner/e M2	8,76	5,72	32,68	-0,86	15,29	-0,37 ^{ns}	-0,64 ^{ns}
Tner/e M4	4,77	7,04	49,59	-8,26	12,90	-0,31 ^{ns}	-0,44 ^{ns}
Tner/e M6	6,37	5,59	31,23	-3,80	12,99	-0,38 ^{ns}	-0,53 ^{ns}

* Curtose ou assimetria difere de zero, pelo teste t, em 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não significativo

**APÊNDICE J – MÉDIA, DESVIO PADRÃO, VARIÂNCIA, TEMPERATURA
MÍNIMA DO AR MAIS ALTA E BAIXA, ASSIMETRIA E CURTOSE DOS
MODELOS 7 A 12**

Média, desvio padrão, variância, temperatura mínima mais baixa (Tn mínima, temperatura mínima mais alta (Tn máxima), assimetria e curtose da temperatura mínima do ar observada próximo as estruturas reprodutivas da canola (TnE/o), TnE/e estimada pelo modelo 1 (TnE/e M1), TnE/e estimada pelo modelo 9 (TnE/e M9), TnE/e estimada pelo modelo 11 (TnE/e M11), temperatura mínima das estruturas reprodutivas observada (Tner/o), Tner estimada pelo modelo 8 (Tner/e M8), Tner estimada pelo modelo 10 (Tner/e M10), Tner estimada pelo modelo 12 (Tner/e M12), em datas com temperatura mínima do ar menor que 5°C no ano de 2017. Passo Fundo, RS – 2019.

Variável	Média (°C)	Desvio padrão	Variância	Tn mínima (°C)	Tn máxima (°C)	Assimetria	Curtose
TnE/o	0,80	2,78	7,74	-5,37	4,13	-1,54 ^{ns}	1,09 ^{ns}
TnE/e M7	3,02	2,80	7,85	-1,84	7,26	-0,65 ^{ns}	-0,65 ^{ns}
TnE/e M9	-0,31	3,97	15,78	-7,80	4,99	-0,43 ^{ns}	-0,57 ^{ns}
TnE/e M11	2,04	2,89	8,33	-4,18	4,97	-1,47 ^{ns}	0,71 ^{ns}
Tner/o	5,52	6,14	37,64	-5,33	12,99	-0,27 ^{ns}	-0,64 ^{ns}
Tner/e M8	7,10	5,03	25,26	-1,35	12,84	-0,43 ^{ns}	-0,73 ^{ns}
Tner/e M10	3,79	5,66	40,83	-8,03	11,17	-0,34 ^{ns}	-0,48 ^{ns}
Tner/e M12	6,17	5,48	30,01	-3,80	12,66	-0,39 ^{ns}	-0,54 ^{ns}

* Curtose ou assimetria difere de zero, pelo teste t, em 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não significativo

APÊNDICE L – MÉDIA, DESVIO PADRÃO, VARIÂNCIA, TEMPERATURA MÍNIMA DO AR MAIS ALTA E BAIXA, ASSIMETRIA E CURTOSE DOS MODELOS 3 A 6 EM FUNÇÃO DE AUT1

Média, desvio padrão, variância, temperatura mínima mais baixa (Tn mínima, temperatura mínima mais alta (Tn máxima), assimetria e curtose da temperatura mínima do ar observada próximo as estruturas reprodutivas da canola (TnE/o), TnE/e estimada pelo modelo 3 (TnE/e M3), TnE/e estimada pelo modelo 5 (TnE/e M5), temperatura mínima do ar observada próximo as estruturas reprodutivas da canola (TnE/o), Tner estimada pelo modelo 4 (Tner/e M4), Tner estimada pelo modelo 6 (Tner/e M6), para validação dos modelos com os dados da estação meteorológica automática em Passo Fundo no ano de 2017. Passo Fundo, RS – 2019.

Variável	Média (°C)	Desvio padrão	Variância	Tn mínima (°C)	Tn máxima (°C)	Assimetria	Curtose
TnE/o	9,92	4,30	18,52	-5,37	17,54	-2,63*	2,78*
TnE/e M3	8,92	4,52	20,44	-6,21	16,48	-2,46*	2,51*
TnE/e M5	10,92	3,91	15,28	-2,16	17,45	-2,84*	2,91*
Tner/o	5,52	6,14	37,64	-5,33	12,99	-0,27 ^{ns}	-0,64 ^{ns}
Tner/e M4	5,56	6,48	41,95	-5,33	12,96	-0,33 ^{ns}	0,57 ^{ns}
Tner/e M6	6,97	5,28	27,90	-1,92	13,01	-0,41 ^{ns}	-0,70 ^{ns}

* Curtose ou assimetria difere de zero, pelo teste t, em 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não significativo

APÊNDICE M – MÉDIA, DESVIO PADRÃO, VARIÂNCIA, TEMPERATURA MÍNIMA DO AR MAIS ALTA E BAIXA, ASSIMETRIA E CURTOSE DOS MODELOS 9 A 12 EM FUNÇÃO DE AUT1

Média, desvio padrão, variância, temperatura mínima mais baixa (Tn mínima, temperatura mínima mais alta (Tn máxima), assimetria e curtose da temperatura mínima do ar observada próximo as estruturas reprodutivas da canola (TnE/o), TnE/e estimada pelo modelo 9 (TnE/e M9), TnE/e estimada pelo modelo 11 (TnE/e M11), temperatura mínima do ar observada próximo as estruturas reprodutivas da canola (TnE/o), Tner estimada pelo modelo 10 (Tner/e M10), Tner estimada pelo modelo 12 (Tner/e M12), para validação dos modelos com os dados da estação meteorológica automática em Passo Fundo em datas com temperatura ,mínima do ar menor que 5°C no ano de 2017. Passo Fundo, RS – 2019.

Variável	Média (°C)	Desvio padrão	Variância	Tn mínima (°C)	Tn máxima (°C)	Assimetria	Curtose
TnE/o	0,80	2,78	7,74	-5,37	4,13	-1,54 ^{ns}	1,09 ^{ns}
TnE/e M9	-0,35	2,95	8,71	-5,47	4,12	-0,62 ^{ns}	-0,62 ^{ns}
TnE/e M11	3,27	3,16	9,97	-2,21	8,05	-0,58 ^{ns}	-0,58 ^{ns}
Tner/o	5,52	6,14	37,64	-5,33	12,99	-0,27 ^{ns}	-0,64 ^{ns}
Tner/e M10	4,50	5,88	34,54	-5,38	11,22	-0,36 ^{ns}	-0,63 ^{ns}
Tner/e M12	6,75	5,18	26,82	-1,95	12,67	-0,41 ^{ns}	-0,71 ^{ns}

* Curtose ou assimetria difere de zero, pelo teste t, em 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não significativo

**APÊNDICE N – NÚMERO DE ESTRUTURAS REPRODUTIVAS MARCADAS
APÓS AS GEADA3, GEADA5 E GEADA7**

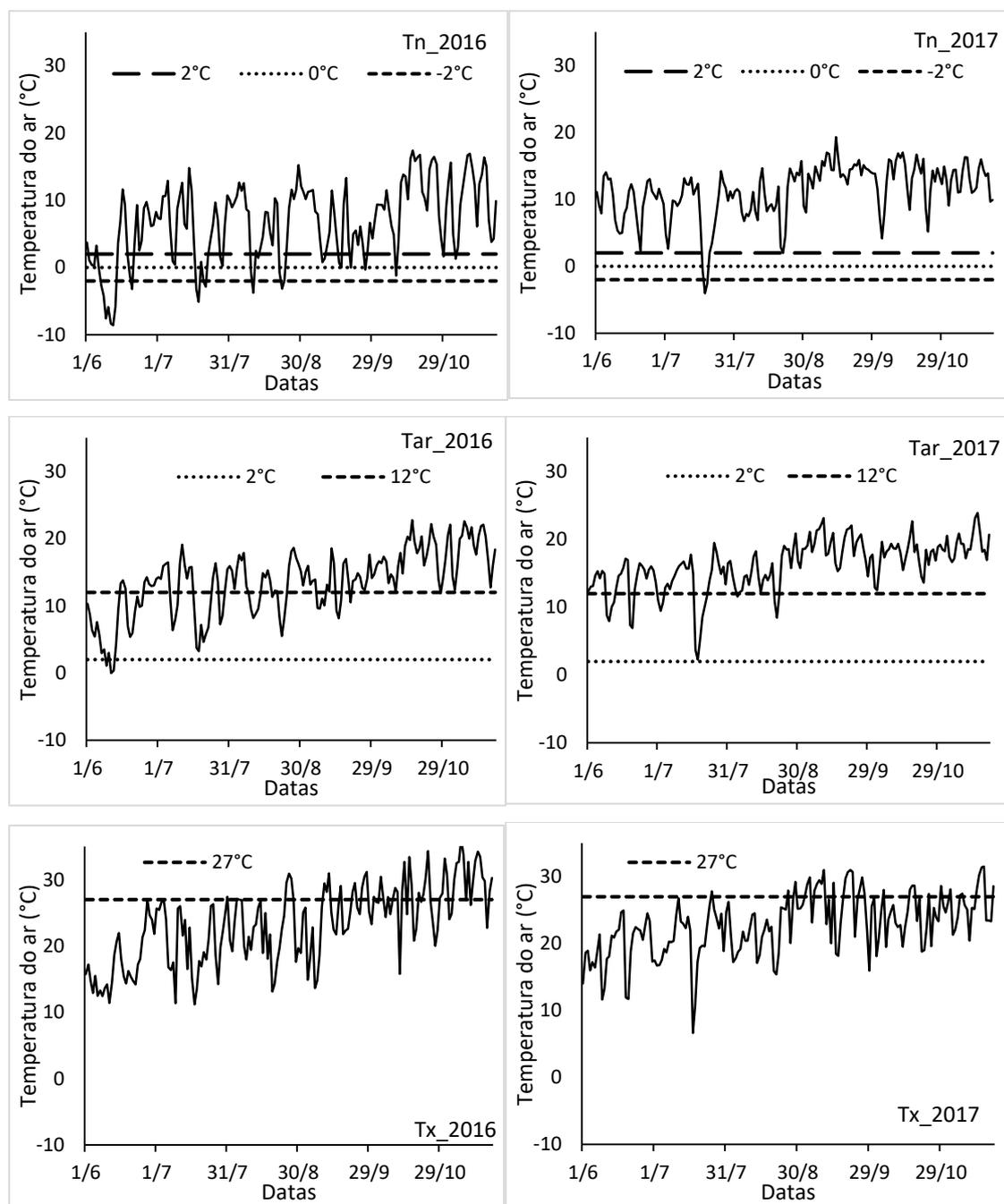
Número de botões florais (B), flores (F), síliquas com menos de 2 cm de comprimento ($S < 2$), síliquas com 2 a 4 cm de comprimento ($S < 2 < 4$) e síliquas com mais de 4 cm de comprimento ($S > 4$) marcadas após a Geada1 (18/07/2016), Geada2 (22/08/2016) e Geada3 (18/07/2017) nas plantas dos genótipos Alht M6, Hyola 61 e Diamond de canola, nas datas de semeadura de 07/04/2016, 15/04/2016, 02/05/2016, 18/05/2016, 03/06/2016, 15/06/2016, 08/04/2017, 02/05/2017, nos anos de 2016 e 2017. Passo Fundo, RS – 2019.

Geada1					
Genótipo	B	F	$S < 2$	$S < 2 < 4$	$S > 4$
Data de semeadura: 07/04/2016					
Alht M6	40	40	-	10	-
Hyola 61	10	40	-	40	40
Diamond	-	-	-	40	40
Data de semeadura: 15/04/2016					
Alht M6	10	-	-	-	-
Hyola 61	40	40	-	40	-
Diamond	-	40	-	40	40
Data de semeadura: 02/05/2016					
Alht M6	-	-	-	-	-
Hyola 61	20	10	-	-	-
Diamond	40	40	-	40	-
Geada2					
Genótipo	B	F	$S < 2$	$S < 2 < 4$	$S > 4$
Data de semeadura: 02/05/2016					
Alht M6	20	20	20	-	-
Hyola 61	20	20	20	-	-
Diamond	-	-	-	-	-
Data de semeadura: 18/05/2016					
Alht M6	20	20	20	-	-
Hyola 61	-	20	20	20	-
Diamond	-	20	20	20	-
Data de semeadura: 03/06/2016					

Alht M6	-	-	-	-	-
Hyola 61	20	20	-	-	-
Diamond	20	20	-	-	-
Data de sementeira: 15/06/2016					
Alht M6	-	-	-	-	-
Hyola 61	-	-	-	-	-
Diamond	20	20	-	-	-
Geda3					
Genótipo	B	F	S<2	S<2<4	S>4
Data de sementeira: 08/04/2017					
Alht M6	70	70	70	-	-
Hyola 61	-	70	70	70	-
Diamond	-	-	-	-	112
Data de sementeira: 02/05/2017					
Alht M6	-	-	-	-	-
Hyola 61	-	-	-	-	-
Diamond	-	70	70	70	-

APÊNDICE O – TEMPERATURA MÍNIMA, MÉDIA E MÁXIMA DIÁRIA DO AR EM NOS EXPERIMENTOS DE 2016 E 2017

Temperatura mínima do ar diária nos anos de 2016 (Tn_2016) e 2017 (Tn_2017) com limites de Tn para geadas fracas (Tn entre 2 e 0°C), geadas moderadas (0 e -2°C) e geadas fortes (Tn menor que 2°C) representados nas linhas horizontais, temperatura média do ar diária nos anos de 2016 (Tar_2016) e 2017 (Tar_2017) com limite inferior (2°C) e superior (12°C) de Tar com potencial de aclimação representados nas linhas horizontais, temperatura máxima do ar diária nos anos de 2016 (Tx_2016) e 2017 (Tx_2017) com limite superior de Tx (27°C) que provoca abortamento de estruturas reprodutivas da canola no período reprodutivo da canola nos experimentos de 2016 e 2017. Passo Fundo, RS – 2019.



**APÊNDICE P – NÚMERO DE DATAS E INTENSIDADE DE GEADAS NOS
EXPERIMENTOS DE 2016 E 2017**

Número de dias por decêndio com ocorrência de dias frios (DF) (2 a 5°C), geadas de intensidade fraca (GF) (0 a 2°C), geadas de intensidade moderada (GM) (-2 a 0°C) e geadas de intensidade forte (GT) (< -2°C), na condição de referência*, instalada nos experimentos dos anos de 2016 e 2017 a 1,5 metros do solo. Passo Fundo, RS – 2019.

Intensidade de frio	2016											
	Abril			Maio			Junho			Julho		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
DF	0	0	1	1	1	1	2	1	3	0	1	1
GF	0	0	2	0	2	1	3	1	0	2	1	3
GM	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
GT	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	3	1
	Agosto			Setembro			Outubro			Novembro		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
DF	0	5	1	3	2	5	2	0	1	2	2	0
GF	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
GM	1	0	2	0	2	1	1	0	0	0	0	0
GT	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2017											
	Abril			Maio			Junho			Julho		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
DF	-	0	2	0	0	0	0	2	0	2	1	1
GF	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GM	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GT	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
	Agosto			Setembro			Outubro			Novembro		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
DF	0	1	1	0	0	0	1	0	0	-	-	-
GF	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-	-	-
GM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-
GT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-

* Medição a 1,5 m acima da superfície do solo no centro da área experimental.

**APÊNDICE Q – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE A
TEMPERATURA MÍNIMA DO AR NO EXPERIMENTO VARIÁVEIS
METEOROLÓGICAS E MICRMETEOROLÓGICAS**

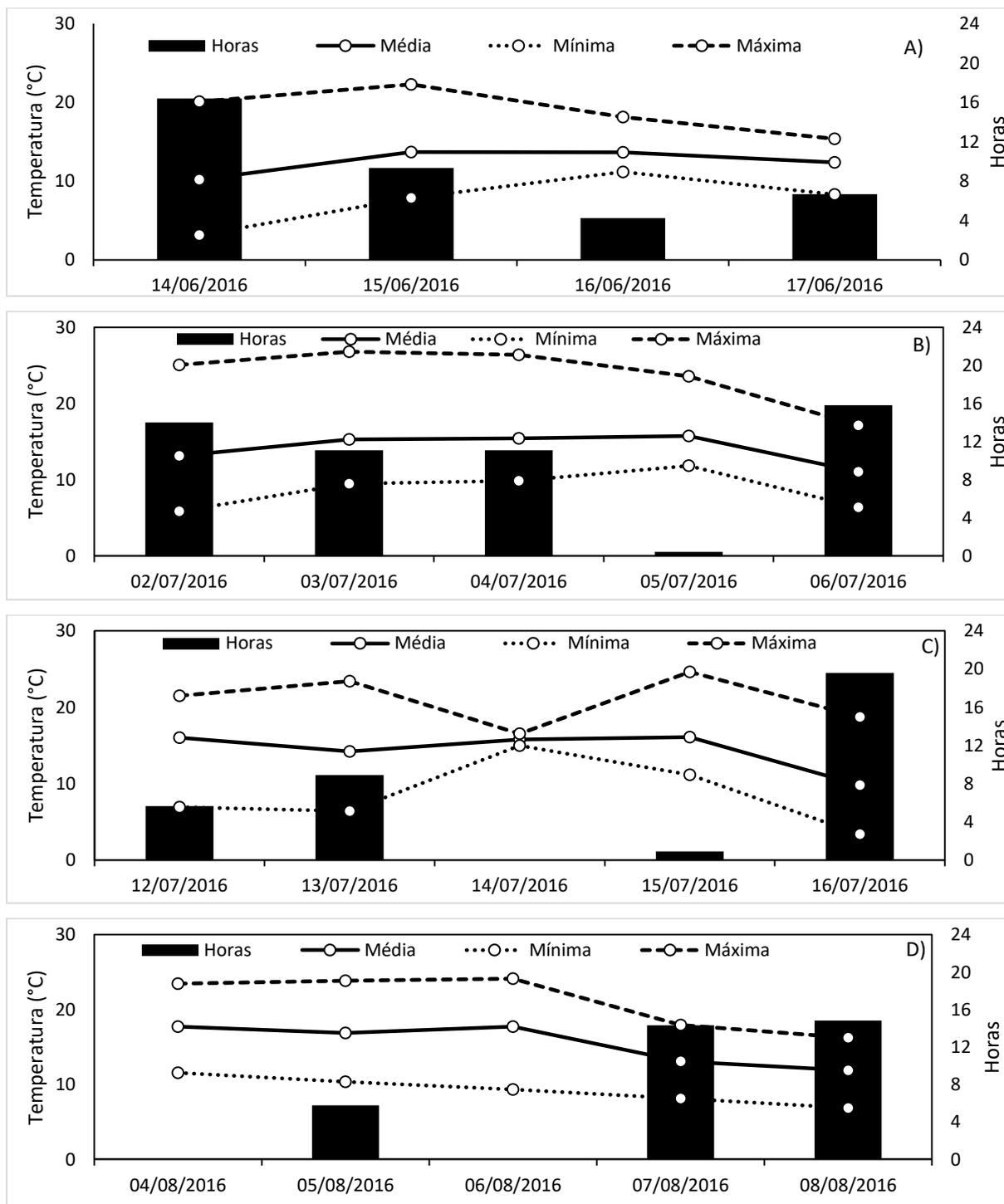
Coeficiente de correlação de Pearson entre a temperatura mínima diária do ar na Referência e Pressão de saturação de vapor diária mínima (es/mn), Pressão de saturação de vapor diária média (es/md), Pressão real de valor diária mínima (e/mn), Pressão real de vapor média (e/md), Temperatura do ponto de orvalho diária mínima (Tpo/mn), Temperatura do ponto de orvalho diária média (Tpo/md), Umidade relativa do ar diária mínima (UR/mn) e Umidade relativa do ar diária média (UR/md) na estação meteorológica de Passo fundo, e entre temperatura mínima diária do ar na Referência e velocidade do vento diária média (U/md), direção do vento diária média (U/dir/md), saldo de radiação diário mínimo (Rn/mn), saldo de radiação diário médio (Rn/md) e saldo de radiação médio noturno (Rn/md/n) no experimento, no anos de 2016 e 2017. Passo Fundo, RS – 2019.

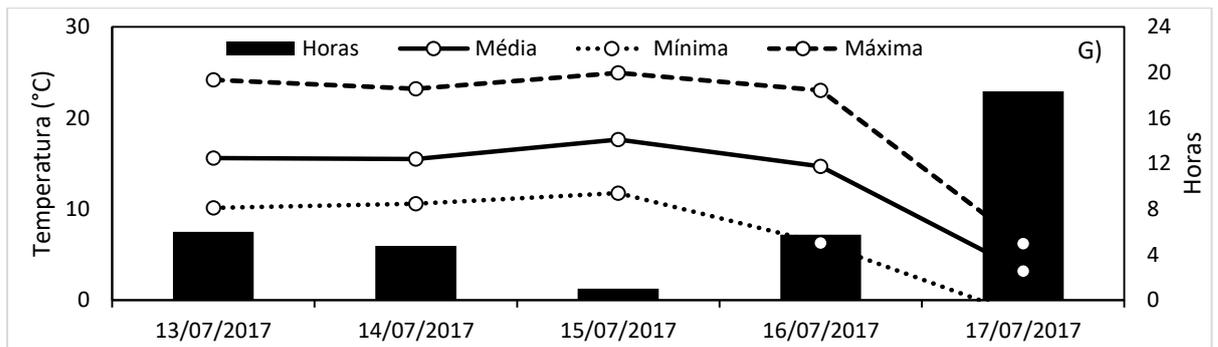
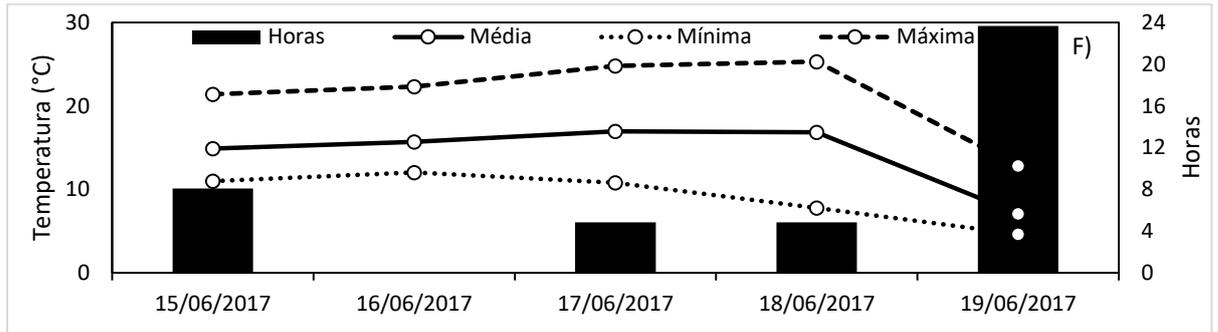
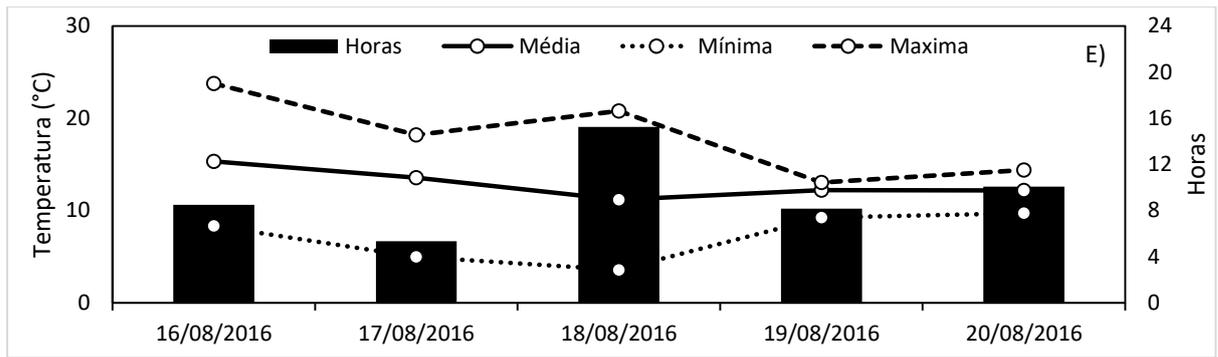
Variável	Ano	
	2016	2017
es/mn (kPa)	0,69*	0,96*
es/md (kPa)	0,59*	0,83*
e/mn (kpa)	0,72*	0,88*
e/md (kPa)	0,73*	0,90*
Tpo/mn (°C)	0,74*	0,91*
Tpo/md (°C)	0,75*	0,93*
UR/mn (%)	0,35*	0,24*
UR/md (%)	0,31*	0,22*
U/md (m s ⁻¹)	-0,30*	0,10 ^{ns}
U/dir/md (°)	0,01 ^{ns}	-0,25*
Rn/mn (W m ⁻²)	0,55*	0,36*
Rn/md (W m ⁻²)	-0,02 ^{ns}	0,25*
Rn/md/n (W m ⁻²)	0,65*	0,14*

*correlação significativa pelo teste t a 5% de probabilidade de erro;

APÊNDICE R – TEMPERATURA DIÁRIA MÉDIA, MÁXIMA E MÍNIMA DO AR E NÚMERO DE HORAS COM POTENCIAL DE ACLIMATAÇÃO PARA A CANOLA

Temperatura diária média, máxima e mínima do ar e número de horas diário com temperatura do ar com potencial para aclimação para a canola (temperatura entre 2 a 12°C) em 4 a 5 cinco dias antecedentes à ocorrência de geadas no Período1 (14 a 19/06/2016) (A), Período2 (02 a 06/07/2016) (B), Período3 (12 a 16/07/2016) (C), Período4 (04 a 08/2016) (D), Período5 (16 a 20/08/2016) (E), Período6 (15 a 19/06/2016) (F), Período7 (13 a 17/07/2017) (G), nos anos de 2016 e 2017. Passo Fundo, RS – 2019.





APÊNDICE S – PISTILO DE FLOR DE CANOLA ABERTO APÓS GEADA

Pistilo de flor aberta de canola com todos óvulos danificados devido à ocorrência de geada. Passo Fundo, RS – 2019.



Fonte: Autor, 2017.

APÊNDICE T - DANO PROVOCADOS POR GEADA

Danos provocados por geada com temperatura do ar de -6°C em pistilos de flores abertas no dia de ocorrência à geada, em destaque, fotografados sete dias após à geada. Passo Fundo, RS – 2019.



Fonte: Autor. 2016

APÊNDICE U – CHUVA, VELOCIDADE E DIREÇÃO VENTO ANTES DE OCORRÊNCIA DE GEADAS

Chuva (mm), Velocidade média do vento (m s^{-1}) e direção média do vento ($^{\circ}$) em período de 3 a 5 dias antes da ocorrência da geada, e velocidade média do vento (m s^{-1}) e direção média do vento ($^{\circ}$) no dia de ocorrência da geada, na Geada1 (20/06/2016), Geada2 (08/07/2016), Geada3 (18/07/2016), Geada4 (08/08/2016), Geada5 (22/08/2016), Geada6 (20/06/2017) e Geada7 (18/07/2017). Passo Fundo, RS – 2019.

Geada	Antes da geada			Dia da geada	
	Chuva (mm)	Velocidade vento média (m s^{-1})	Direção do vento média ($^{\circ}$)	Velocidade vento média (m s^{-1})	Direção do vento média ($^{\circ}$)
Geada1	15,8	2,78	NE	4,7	SE
Geada2	35	4,6	NE	2,5	NE
Geada3	119,8	3,14	NW e NE	3,4	SE
Geada4	22	4,2	NE	3,9	SE
Geada5	82,3	3,5	Var	1,5	SW
Geada6	7,6	5,4	NE	2,9	S
Geada7	18,8	5,12	NE	0,6	SW

* W: Oeste; S: Sul; NE: Nordeste; NW: Noroeste; SE: Sudeste; SW: Sudoeste; Var: Variável.