

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO E DO BALANÇO
DE ÁGUA NO SOLO EM TRIGO**

TESE DE DOUTORADO

Cleber Maus Alberto

**Santa Maria, RS, Brasil
2008**

MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO E DO BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO EM TRIGO

por

Cleber Maus Alberto

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para a obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Agrícola

Orientador: Prof. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS, Brasil

2008

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO E DO BALANÇO DE
ÁGUA NO SOLO EM TRIGO**

elaborada por

Cleber Maus Alberto

como requisito parcial para a obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA

Nereu Augusto Streck, Ph.D.
(Presidente Orientador)

Luis Antonio de Avila, Ph.D. (UFSM)

Nilson Lemos de Menezes, Dr. (UFSM)

Luciano Streck, Dr. (UERGS)

Arno Bernardo Heldwein, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 29 de fevereiro de 2008.

A todas as pessoas que sempre estiveram ao meu lado e a minha família, especialmente aos meus pais Flavio José Alberto e Marlete Maus Alberto.

Dedico...

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do trabalho de doutorado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

A EMBRAPA Trigo, especialmente ao Dr. Gilberto Rocca Cunha e ao Dr. Alfredo Nascimento Júnior e à FUNDACEP, especialmente ao Dr. Mauro Tadeu Braga da Silva por fornecerem as sementes dos genótipos de trigo.

Ao Prof. PhD. Nereu Augusto Streck, por ter participado durante todo o processo de elaboração e execução desse trabalho sempre com muita dedicação, incentivo e amizade.

Ao Prof. Dr. Arno Bernardo Heldwein pelo incentivo e amizade ao longo dos anos de convivência no Departamento de Fitotecnia.

Ao setor de sementes do Departamento de Fitotecnia, especialmente ao Prof. Dr. Nilson Lemos de Menezes.

A todos os professores do Departamento de Fitotecnia e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela colaboração e atenção sempre dispensada.

Aos meus Pais por terem me proporcionado a dádiva da vida e por serem os principais responsáveis na minha educação, a Cintia pelo amparo e compreensão nos momentos difíceis.

Aos colegas e amigos do Departamento de Fitotecnia pela espontaneidade e alegria na troca de informações e materiais consolidando a demonstração de amizade e solidariedade, em especial, Hamilton, Lidiane, Felipe, Alencar pela participação do projeto e coleta de dados.

Ao pessoal da sala 30: Edenir, Jacso, Luciano, Alfredo, Joel, Fabrina, Leosane, Ivonete, Gustavo, Lovane, Joelma, Fabrício, Ivan, Gizelli, Flávia, Luana, Luis pelas mateadas e conversas informais nos momentos de descontração.

E a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho e não foram mencionados. OBRIGADO!

*“Para cada problema complexo há uma resposta
clara, simples e errada”*

Henry Louis Mencken, jornalista americano (1880-1956)

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

MODELAGEM DO DESENVOLVIMENTO E DO BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO EM TRIGO

AUTOR: CLEBER MAUS ALBERTO

ORIENTADOR: NEREU AUGUSTO STRECK

Local e data da Defesa: Santa Maria, 29 de fevereiro de 2008.

O trigo é a principal cultura de inverno do Estado do Rio Grande do Sul. A temperatura e o fotoperíodo são os dois elementos meteorológicos que mais influenciam o desenvolvimento de plantas de trigo. Quando se expõem plantas de trigo a temperaturas baixas não congelantes, estas podem ser induzidas a entrarem no estágio reprodutivo, diminuindo o seu ciclo de desenvolvimento. Para simular o desenvolvimento do trigo são utilizadas funções de resposta a temperatura e fotoperíodo. O modelo de desenvolvimento é parte importante em modelos de simulação de balanço de água no solo, crescimento e rendimento das culturas. Assim, os objetivos desta tese foram: (i) determinar a sensibilidade à vernalização de alguns genótipos de trigo do sul do Brasil e, ajustar uma função de resposta a vernalização para aqueles que apresentaram sensibilidade; (ii) determinar a melhor função de temperatura, fotoperíodo e vernalização para simular o desenvolvimento de alguns genótipos brasileiros de trigo com o modelo de Wang e Engel (WE); e (iii) obter uma melhor predição do balanço de água no solo, modificando dois modelos mecânicos de balanço de água no solo. Para atingir o primeiro objetivo, foi conduzido um experimento fatorial com oito níveis de vernalização (0, 7, 14, 21, 28, 35, 42 e 49 dias de vernalização) e seis genótipos de trigo. Também foi realizado um experimento com várias datas de semeadura em Santa Maria, RS, Brasil, para obtenção de dados independentes dos estágios de desenvolvimento de seis genótipos Brasileiros de trigo para avaliar o modelo WE modificado. Foi determinado o conteúdo de água no solo pelo método gravimétrico em três datas de semeadura, com a finalidade de avaliar o desempenho dos dois modelos de balanço de água no solo. Para os genótipos que apresentaram resposta à vernalização são apresentadas funções de resposta, que podem ser usadas em modelos de simulação do desenvolvimento de genótipos brasileiros de trigo. O modelo WE simula melhor o desenvolvimento do trigo quando são usadas as temperaturas cardinais maiores do que as do modelo original e usando as temperaturas mínimas e máximas diárias para o cálculo da função de resposta a temperatura. O modelo de balanço de água no solo de Campbell; Diaz modificado é mais realístico e com maior possibilidade de desempenho satisfatório em regiões de clima distinto daquelas em que foi desenvolvido. O modelo de balanço de água no solo de Amir; Sinclair modificado estima melhor a água disponível no solo que o modelo original.

Palavras-chave: *Triticum aestivum* L.; temperatura; fotoperíodo; vernalização; stress hídrico.

ABSTRACT

Doctoral Thesis
Graduate Program in Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

MODELING DEVELOPMENT AND SOIL WATER BALANCE IN WHEAT

AUTHOR: CLEBER MAUS ALBERTO
ADVISOR: NEREU AUGUSTO STRECK

Location and date of defense: Santa Maria, February 29th, 2008.

Wheat is the main winter crop in Rio Grande do Sul State. Temperature and photoperiod are the major environmental factors that control development in wheat. Wheat plants exposed to cold, non freezing temperatures induce them to enter the reproductive phase. Temperature and photoperiod response functions are used to simulate the wheat development. Developmental models are important part of water soil balance, growth and yield crop models. Thus, the objectives of this thesis were: (i) to evaluate vernalization sensitivity of some Brazilian wheat genotypes and to fit a vernalization response function for these genotypes; (ii) to determine the best temperature, photoperiod and vernalization functions to simulate wheat development with the Wang and Engel (WE) model for some Brazilian wheat genotypes; and (iii) to improve the prediction of available soil water in the soil by modifying two mechanistic models. To achieve the first objective, a factorial experiment with eight levels of vernalization (0, 7, 14, 21, 28, 35, 42 and 49 vernalization days) and six wheat genotypes were used. Also a field experiment was carried out in Santa Maria, RS, Brazil, to provide independent data on the date of developmental stages of six Brazilian wheat genotypes for evaluating the original and the modified WE model. Soil water content was determined with the gravimetric method to evaluate water balance models during three sowing dates. For those genotypes that presented some response to vernalization, response functions are presented, which can be used in models for simulating the development of Brazilian wheat cultivars with distinct vernalization requirements. The WE model simulates better the development of the Brazilian wheat genotypes using cardinal temperatures higher than original WE model and using daily maximum and minimum temperatures in the calculation of the temperature response function. The modified Campbell; Diaz water balance model is more realistic and has a greater potential for performing well in regions others than it was developed. The modified Amir; Sinclair water balance model simulates better the available soil water than the original model.

Key words: *Triticum aestivum* L.; temperature; photoperiod; vernalization; water stress.

LISTA DE TABELAS

CAPITULO I

- TABELA 1 - Graus de liberdade (GL) e quadrado médio (QM) do quadro de análise da variância para as variáveis: número final de folhas (NFF) e soma térmica acumulada (STa) da fase emergência-antese (EM-AN), no colmo principal de seis genótipos de trigo em oito tratamentos de vernalização (DEV = dias efetivos de vernalização), transplantados em 15/11/2006. Santa Maria, RS, 2006-2007. 33
- TABELA 2 - Efeito da vernalização no número final de folhas (NFF) e na soma térmica acumulada (STa) da emergência até a antese, no colmo principal de seis genótipos de trigo cultivados no sul do Brasil, transplantados em 15/11/2006. Santa Maria, RS, Brasil, 2007. 34
- TABELA 3 - Diferença no número final de folhas (NFF) e na soma térmica acumulada (STa) da fase emergência-antese (EM-AN) no colmo principal entre tratamento sem vernalização (DV0) e com 49 dias de vernalização (DV49) e sensibilidade à vernalização de seis genótipos de trigo transplantados em 15/11/2006. Santa Maria, RS, 2006-2007. 35

CAPITULO II

- TABELA 1 - Valores dos coeficientes $X_{0,5}$ e n para cinco genótipos Sul-brasileiros de trigo utilizados neste trabalho que apresentam resposta a vernalização (ver Capítulo 1), obtido com cultivo transplantado em 15/11/2006. Santa Maria, 2006-2007. 52
- TABELA 2 - Diferentes combinações de temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima (TC_{min} , TC_{ot} e TC_{max}) para o desenvolvimento do trigo nas fases de emergência a espiguetta terminal (EM-ET), espiguetta terminal até antese (ET-AN) e antese até maturidade fisiológica (AN-MF) utilizadas para a estimativa dos coeficientes e teste do modelo WE para genótipos Sul-brasileiros de trigo, nos cultivos realizados em 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. 54
- TABELA 3 - Valores estimados dos coeficientes $r_{max,v1}$, $r_{max,v2}$ e $r_{max,r}$ do modelo WE usando-se as diferentes combinações de temperaturas cardinais ($TC_{original}$, TC_{maxima} , $TC_{ot,max}$) e diferentes métodos de cálculo da $f(T)$ e f_vn (WE_{Tmedia} , WE_{Tmm} e WE_{TCM}) para seis genótipos de trigo, determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. $TC_{original}$ = Temperaturas cardinais do modelo original, TC_{max} = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura máxima, $TC_{ot,max}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura ótima e máxima (Para valores de temperaturas cardinais consultar Tabela 2). 59

TABELA 4 - Valores estimados do coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo (ω , h^{-1}) da função de fotoperíodo do modelo de desenvolvimento de WE usando-se as diferentes combinações de temperaturas cardinais ($TC_{original}$, $TC_{máxima}$ e $TC_{ot,max}$) e diferentes métodos de cálculo da $f(T)$ e f_{vn} ($WE_{Tmédia}$, WE_{Tmm} e WE_{TCM}) para seis genótipos de trigo para as sub-fases de emergência a espiguetta terminal (EM-ET) e espiguetta terminal a antese (ET-AN), determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. $TC_{original}$ = Temperaturas cardinais do modelo original, $TC_{máxima}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura máxima, $TC_{ot,max}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura ótima e máxima (Para valores de temperaturas cardinais consultar Tabela 2). 61

TABELA 5 - Valores estimados do fotoperíodo crítico (P_c , h) da função de fotoperíodo do modelo de desenvolvimento de WE usando diferentes combinações de temperaturas cardinais ($TC_{original}$, $TC_{máxima}$, $TC_{ot,max}$) e diferentes métodos de cálculo da $f(T)$ e f_{vn} ($WE_{Tmédia}$, WE_{Tmm} e WE_{TCM}) para seis genótipos de trigo para as sub-fases de emergência a espiguetta terminal (EM-ET) e espiguetta terminal a antese (ET-AN), determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. $TC_{original}$ = Temperaturas cardinais do modelo original, $TC_{máxima}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura máxima, $TC_{ot,max}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura ótima e máxima (Para valores de temperaturas cardinais consultar Tabela 2). 62

TABELA 6 - Valores de Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME, dias) para estimativa da data de espiguetta terminal de seis genótipos de trigo com o modelo de desenvolvimento de WE usando diferentes combinações de temperaturas cardinais ($TC_{original}$, $TC_{máxima}$, e $TC_{ot,max}$) e diferentes métodos de cálculo da $f(T)$ e f_{vn} ($WE_{Tmédia}$, WE_{Tmm} e WE_{TCM}) para as sub-fases de emergência a espiguetta terminal (EM-ET) e espiguetta terminal a antese (ET-AN), determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. $TC_{original}$ = Temperaturas cardinais do modelo original, $TC_{máxima}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura máxima, $TC_{ot,Max}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura ótima e máxima (Para valores de temperaturas cardinais consultar Tabela 2). 63

TABELA 7 - Valores de Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME, dias) para estimativa da data de antese (AN) de seis genótipos de trigo com o modelo de desenvolvimento de WE usando diferentes combinações de temperaturas cardinais ($TC_{original}$, TC_{max} , $TC_{ot,max}$) e diferentes métodos de cálculo da $f(T)$ e f_{vn} ($WE_{Tmédia}$, WE_{Tmm} e WE_{TCM}) para as sub-fases de emergência a espiguetta terminal (EM-ET) e espiguetta terminal a antese (ET-AN), determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. $TC_{original}$ = Temperaturas cardinais do modelo original, $TC_{máxima}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura

máxima, $TC_{ot,max}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura ótima e máxima (Para valores de temperaturas cardinais consultar Tabela 2). 64

TABELA 8 - Valores de Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME, dias) para estimativa da data de maturidade fisiológica (MF) de seis genótipos de trigo com o modelo de desenvolvimento de WE usando diferentes combinações de temperaturas cardinais ($TC_{original}$, TC_{max} $TC_{ot,max}$) e diferentes métodos de cálculo da $f(T)$ e f_{vn} (WE_{Tmedia} , WE_{Tmm} e WE_{TCM}) para as sub-fases de emergência a espiguetta terminal (EM-ET) e espiguetta terminal a antese (ET-AN), determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. $TC_{original}$ = Temperaturas cardinais do modelo original, $TC_{máxima}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura máxima, $TC_{ot,max}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura ótima e máxima (Para valores de temperaturas cardinais consultar Tabela 2). 65

TABELA 9 - Valores dos coeficientes $r_{max,v1}$ (dia^{-1}), $r_{max,v2}$ (dia^{-1}), $r_{max,r}$ (dia^{-1}), ω (h^{-1}), P_c (h), temperaturas cardinais (TC_{min} , TC_{ot} e TC_{max}) para seis genótipos de trigo com as melhores combinações de métodos de calculo de $f(T)$ e f_{vn} (WE_{Tmedia} , WE_{Tmm} e WE_{TCM}) nas sub-fases de emergência a espiguetta terminal (EM-ET) e espiguetta terminal a antese (ET-AN) e na fase de antese a maturidade fisiológica (AN-MF), determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. 68

CAPITULO III

TABELA 1 - Data de semeadura, emergência, antese e maturidade fisiológica para os genótipos de trigo CEP 52 e BRS 177, utilizados neste estudo. Santa Maria, RS. 79

TABELA 2 - Valores de conteúdo volumétrico de água no solo na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) estimados para unidade de mapeamento de solo São Pedro, um argissolo vermelho distrófico arênico. 80

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO I

- FIGURA 1 - Resposta à vernalização dos genótipos BRS 177 (a), CEP 51 (b), CEP 52 (c) e Nova Era (d) ajustada em função do número final de folhas normalizado (NFFN) no colmo principal como variável dependente, transplantados em 15/11/2006. Os pontos são os dados observados e a curva é a equação MMF (equação 5) ajustada, com valores de $X_{0,5}$ (coeficiente que indica o valor dos dias de vernalização quando a resposta é a metade da vernalização completa) e de n (coeficiente de forma) fornecidos em cada painel. Santa Maria, RS, 2006-2007. RQME = raiz do quadrado médio do erro. 37
- FIGURA 2 - Resposta à vernalização dos genótipos BRS 177 (a), CEP 51 (b), CEP 52 (c) e Nova Era (d) ajustada em função da soma térmica acumulada normalizada (STa_N) da fase emergência-antese (EM-AN) no colmo principal como variável dependente, transplantadas em 15/11/2006. Os pontos são os dados observados e a curva é a equação MMF (eq. 5) ajustada, com valores de $X_{0,5}$ (coeficiente que indica o valor dos dias de vernalização quando a resposta é a metade da vernalização completa) e de n (coeficiente de forma) fornecidos em cada painel. Santa Maria, RS, 2006-2007. RQME = raiz do quadrado médio do erro. 38
- FIGURA 3 - Número final de folhas (NFF) no colmo principal (a) e soma térmica acumulada (STa) da fase emergência-antese (EM-AN) no colmo principal (b) para o genótipo de trigo BRS Louro e resposta à vernalização utilizando-se o número final de folhas normalizado (NFFN) no colmo principal como variável dependente para o genótipo de trigo BRS Tarumã (c), transplantados em 15/11/2006. Santa Maria, RS, 2006-2007. 39

CAPÍTULO II

- FIGURA 1 - Diagrama esquemático do modelo de WE modificado (STRECK et al., 2003b). Os estágios de desenvolvimento são EM = emergência, (0); ET = espiguetas terminal, (0,4); AN = antese, (1); MF = maturidade fisiológica, (2). 51
- FIGURA 2 - Dias após a semeadura (DAS) observados vs. simulados até espiguetas terminal (ET), antese (AN) e maturidade fisiológica (MF) para os genótipos (a) BRS Louro, (b) CEP 52, (c) BRS 177, (d) CEP 51, (e) BRS Tarumã e (f) Nova Era em seis datas de semeadura, com as melhores combinações de métodos de cálculo de $f(T)$ e f_{vn} , e com as temperaturas cardinais mais adequadas para cada genótipo (Tabela 9), determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. 69

CAPITULO III

- FIGURA 1 - Valores diários simulados da profundidade do sistema radicular utilizando as profundidades máxima do sistema radicular (RDmax) de 0,30 m e 0,60 m com o modelo de Campbell; Diaz (1988) original e modificado (não linear) e estágio de desenvolvimento do trigo com o modelo WE (emergência = 0, antese = 1 e maturidade fisiológica = 2) na semeadura de 07/07/2006 com emergência dia 17/07/2006 para o genótipo CEP 52, Santa Maria, RS..... 91
- FIGURA 2 - Fração de água disponível no solo (FADS) observada e simulada para o perfil de solo com crescimento radicular pelo modelo de Campbell; Diaz (1988) com RDmax de 0,30m com o modelo original (a) e modificado (b) e para RDmax de 0,60 m com o modelo original (c) e modificado (d) e precipitação pluviométrica (P, mm), para a data de semeadura de 07/07/2006 com emergência dia 17/07/2006 para o genótipo CEP 52. Santa Maria, RS. RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro, r_s = teste de correlação não paramétrico de Spearman R. 96
- FIGURA 3 - Fração de água disponível no solo (FADS) observada e simulada para o perfil de solo com crescimento radicular pelo modelo de Campbell; Diaz (1988) com RDmax de 0,30m com o modelo original (a) e modificado (b) e para RDmax de 0,60 m com o modelo original (c) e modificado (d) e precipitação pluviométrica (P, mm) para a data de semeadura de 04/09/2006 com emergência em 13/09/2006 para o genótipo BRS 177. Santa Maria, RS. RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro, r_s = teste de correlação não paramétrico de Spearman R. 97
- FIGURA 4 - Fração de água disponível no solo (FADS) observada e simulada para o perfil de solo com crescimento radicular pelo modelo de Campbell; Diaz (1988) com RDmax de 0,30m com o modelo original (a) e modificado (b) e para RDmax de 0,60 m com o modelo original(c) e modificado (d) e precipitação pluviométrica (P, mm), para a data de semeadura de 18/04/2007 com emergência dia 25/04/2007 para o genótipo BRS 177. Santa Maria, RS. RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro, r_s = teste de correlação não paramétrico de Spearman R. **significativo a nível de 5% de probabilidade de erro..... 98
- FIGURA 5 - Fração de água disponível no solo (FADS) observada e simulada pelo modelo de Amir; Sinclair (1991a,b) para PS2 (profundidade total de solo explorado pelo sistema radicular) de 0,30m com o modelo original (a) e RDmax (profundidade máxima do sistema radicular) de 0,30m com o modelo de desenvolvimento modificado e com modelo decrescimento radicular (b) e para PS2 de 0,60m com o modelo original (c) e RDmax de

0,60m com o modelo de desenvolvimento modificado e com o modelo de crescimento radicular (d) e precipitação pluviométrica (P, mm), para a data de semeadura de 07/07/2006 com emergência dia 17/07/2006 para o genótipo CEP 52. Santa Maria, RS. RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro, r_s = teste de correlação não paramétrico de Spearman R. **significativo a nível de 5% de probabilidade de erro. 99

FIGURA 6 - Fração de água disponível no solo (FADS) observada e simulada pelo modelo de Amir; Sinclair (1991a,b) para PS2 (profundidade total de solo explorado pelo sistema radicular) de 0,30m com o modelo original (a) e RDmax (profundidade máxima do sistema radicular) de 0,30m com o modelo de desenvolvimento modificado e com modelo de decrescimento radicular (b) e para PS2 de 0,60m com o modelo original (c) e RDmax de 0,60m com o modelo de desenvolvimento modificado e com o modelo de crescimento radicular (d) e precipitação pluviométrica (P, mm), para a data de semeadura de 04/09/2006 com emergência dia 13/09/2006 para o genótipo BRS 177. Santa Maria, RS. RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro, r_s = teste de correlação não paramétrico de Spearman R. 100

FIGURA 7 - Fração de água disponível no solo (FADS) observada e simulada pelo modelo de Amir; Sinclair (1991a,b) para PS2 (profundidade total de solo explorado pelo sistema radicular) de 0,30m com o modelo original (a) e RDmax (profundidade máxima do sistema radicular) de 0,30m com o modelo de desenvolvimento modificado e com modelo de crescimento radicular (b) e para PS2 de 0,60m com o modelo original (c) e RDmax de 0,60m com o modelo de desenvolvimento modificado e com modelo de crescimento radicular (d) e precipitação pluviométrica (P, mm), para a data de semeadura de 18/04/2007 com emergência dia 25/04/2007 para o genótipo BRS 177. Santa Maria, RS. RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro, r_s = teste de correlação não paramétrico de Spearman R. **significativo a nível de 5% de probabilidade de erro. 101

FIGURA 8 - Fração de água disponível no solo (FADS) observada e simulada pelo modelo de Amir; Sinclair (1991a,b) para RDmax (profundidade máxima do sistema radicular) de 0,30 m com o modelo de desenvolvimento modificado e com modelo de crescimento radicular e precipitação pluviométrica (P, mm), para a data de semeadura de 26/10/2005 com emergência dia 01/11/2005 para o genótipo BRS 177. Santa Maria, RS. 104

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Ciclo de desenvolvimento do trigo	18
2.2	Vernalização	19
2.3	Temperatura do ar e desenvolvimento	22
2.4	Fotoperíodo e desenvolvimento	23
2.5	Modelagem do desenvolvimento de trigo	24
2.6	Modelagem do balanço de água do solo	25
CAPITULO I - RESPOSTA À VERNALIZAÇÃO DE ALGUNS GENÓTIPOS BRASILEIROS DE TRIGO		
INTRODUÇÃO		28
MATERIAL E MÉTODOS		30
RESULTADOS E DISCUSSÃO		32
CONCLUSÕES		42
REFERÊNCIAS		43
CAPITULO II - SIMULAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE TRIGO CONSIDERANDO DIFERENTES TEMPERATURAS CARDINAIS E MÉTODOS DE CÁLCULO DA FUNÇÃO DE RESPOSTA A TEMPERATURA DO AR		
INTRODUÇÃO		46
MATERIAL E MÉTODOS		49

RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS	72
CAPITULO III – SIMULAÇÃO DO BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO EM TRIGO ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DE DOIS MODELOS	76
INTRODUÇÃO.....	76
MATERIAL E MÉTODOS.....	78
RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
CONCLUSÕES	105
REFERÊNCIAS	106
3 CONCLUSÕES GERAIS	109
4 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	111
5 REFERÊNCIAS	113

1 INTRODUÇÃO GERAL

O trigo (*Triticum aestivum* L. Thell) é uma planta monocotiledônea da família Poaceae, originária da antiga Mesopotâmia, hoje Iraque, da região entre os rios Tigre e Eufrates (ÖZKAN et al., 2002). Essa cultura foi uma das primeiras culturas a ser domesticada pelo homem e, por cerca de 8.000 anos é o principal cereal cultivado na Europa, Ásia Ocidental e norte da África. Há relatos bíblicos de que a cultura do trigo foi uma das principais fontes de alimento para o Egito e Palestina, sendo que as primeiras sementes foram trazidas ao Brasil por Martim Afonso de Sousa em 1531.

O trigo é uma cultura amplamente adaptada aos mais diversos locais do mundo, sendo cultivado entre as latitudes de 30°S a 60°N e até altitudes superiores a 3.000 m (BÖRNER et al., 2005). Esta ampla adaptação da cultura do trigo é devido ao seu complexo genoma, que proporciona a alta plasticidade desta cultura.

A produção mundial de trigo aumentou rapidamente entre os anos de 1951 a 1990 sem haver aumento considerável na área semeada. Assim, grande parte do aumento da produção mundial foi devido ao aumento na produtividade. No Brasil também foi verificado aumento na produtividade neste mesmo período, esse aumento da produtividade foi devido ao melhoramento genético (genótipos de porte mais baixo, ciclo precoce e com maior potencial de rendimento de grãos, além da resistência ou tolerância às principais doenças) e um manejo mais adequado do solo (SCHEEREN et al., 2007).

Por ser uma cultura de ampla adaptação e cujo melhoramento genético tem avançado nas últimas décadas, o trigo é o segundo cereal mais produzido no mundo, sendo superado apenas pelo milho. No período de 1996 a 2006, a produtividade média de grãos de trigo no Brasil (1813 kg ha⁻¹) situou-se abaixo da média mundial (2718 kg ha⁻¹). O Rio Grande do Sul é o segundo estado brasileiro em área de cultivo (816.700 ha) sendo superado apenas pelo Paraná (821.600 ha) (CONAB, 2007). Mesmo o Brasil apresentando condições de clima e solo propícios ao seu cultivo, importa cerca de dois terços do seu consumo interno (REUNIÃO DA COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DO TRIGO E TRITICALE, 2005). Para o aumento da produção de trigo no Brasil é necessário o conhecimento sobre as respostas aos fatores ambientais que afetam o seu desenvolvimento e crescimento. Uma das formas de obtenção do conhecimento dessas respostas é simular o

desenvolvimento e o balanço de água no solo. As informações geradas pelas simulações podem ser utilizadas no agendamento das práticas culturais, em programas de melhoramento e, até mesmo, indicar se o cultivo de um genótipo está adaptado a uma determinada região.

Em regiões de clima temperado, dependendo da estação no qual as plantas são cultivadas, ocorre a diferenciação dos genótipos em trigos de inverno e de primavera. Os genótipos de trigo de inverno são semeados no outono, germinam e permanecem no estágio vegetativo até o início da primavera. Em trigos de inverno, durante a fase vegetativa, as plantas precisam ser expostas a temperaturas vernalizantes (0-12°C) para que sejam induzidas a entrar no estágio reprodutivo. Já trigos de primavera são semeados na primavera e completam o ciclo de desenvolvimento no final do verão ou início do outono, sendo menos produtivos que os trigos de inverno. No Brasil, são cultivados trigos de primavera utilizados para a produção de grãos, e os denominados de “duplo-propósito”, utilizados para a produção de grãos e pastagens. Para caracterizar a variabilidade dos genótipos de trigo a um determinado ambiente são necessários estudos locais e a adequação de modelos de desenvolvimento para esta cultura.

Modelos de desenvolvimento com coeficientes ajustados para os genótipos utilizados no Rio Grande do Sul podem ser utilizados, por exemplo, na melhoria das estimativas do conteúdo de água do solo, através da previsão da data de ocorrência dos estágios de desenvolvimento da cultura. Assim, podem ser contornados problemas como o estresse hídrico e o agendamento correto de práticas culturais, evitando ou diminuindo a ocorrência de estresses abióticos sobre a cultura. Estresses abióticos consistem de condições ambientais (ou combinações delas) que afetam negativamente a expressão do potencial genético de crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas. A água é o principal fator abiótico que afeta o rendimento das culturas ao redor do mundo. As produtividades elevadas dependem da quantidade adequada de água no solo. No entanto, elevadas precipitações pluviométricas podem provocar perdas por causa da incidência de doenças e problemas radiculares. Tanto pela falta quanto pelo excesso, torna-se importante a determinação ou estimativa das condições hídricas do solo durante o ciclo de desenvolvimento do trigo.

Alguns genótipos de trigo podem apresentar resposta a vernalização, sendo necessário um estudo sobre a sensibilidade à vernalização de genótipos brasileiros de trigo, para a posterior implementação de funções de resposta a vernalização em modelos de simulação de desenvolvimento. Estes modelos de simulação do desenvolvimento podem ser utilizados conjuntamente com modelos de simulação de balanço de água no solo para simular o crescimento e rendimento das culturas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ciclo de desenvolvimento do trigo

Os estágios de desenvolvimento mais importantes da cultura do trigo são: a germinação, a emergência, o perfilhamento, o duplo anel, a espiguetas terminal, a alongação do colmo, o emborrachamento, a emergência da espiga, a antese e a maturidade fisiológica. A época de ocorrência de cada estágio de desenvolvimento é dependente do genótipo, temperatura, fotoperíodo e data de semeadura (LEVY; PETERSON, 1972).

Considera-se a data de ocorrência de emergência quando 50% das plantas estão visíveis acima do nível do solo (ZADOKS et al., 1974). Para verificar a data de ocorrência dos estágios de desenvolvimento de duplo anel e espiguetas terminal é necessário que a plantas de trigo sejam dissecadas e, com o auxílio de lupa, visualizada a diferenciação dos primórdios foliares e reprodutivos (PORTER et al., 1987). O estágio do duplo anel é o início do crescimento reprodutivo, sendo caracterizado quando todos os primórdios foliares estão formados e há a iniciação do primeiro primórdio floral. O estágio de espiguetas terminal é um estágio de desenvolvimento chave, pois determina o final da diferenciação das espiguetas definindo o número final de espiguetas e, conseqüentemente, o potencial produtivo de grãos das plantas de trigo. A data de ocorrência da antese é considerada quando 50% das plantas de trigo se encontram com pelo menos uma flor aberta e a data de ocorrência da maturidade fisiológica quando a folha bandeira apresenta-se completamente amarelecida (ZADOKS et al., 1974). A época de ocorrência dos estágios de desenvolvimento trigo é determinada pelas condições meteorológicas, que são inerentes ao local e época de semeadura.

A temperatura e o fotoperíodo são os elementos meteorológicos que mais afetam o desenvolvimento das plantas de trigo (STRECK et al., 2003a,b; WHITE, 2006). Alguns cereais de inverno desenvolveram mecanismos de proteção contra o efeito prejudicial das baixas temperaturas, sendo a vernalização um desses mecanismos (PETR; HNILIČKA, 2002; STRECK et al., 2003a). A vernalização assegura que as plantas não floresçam e se submetam a frios intensos no inverno, minimizando os efeitos de temperaturas muito baixas no espigamento. Enquanto a necessidade de temperaturas baixas não é satisfeita, em genótipos responsivos, as plantas não entram na fase reprodutiva, produzindo um maior número de folhas na haste principal.

Genótipos de trigo, além poderem ser sensíveis a vernalização, podem ser sensíveis ao fotoperíodo, necessitando de um determinado comprimento de dia para que sejam induzidos ao florescimento. Normalmente, plantas de trigo são plantas de dia longo, ou seja, aumentam a taxa de desenvolvimento com o aumento do fotoperíodo. Porém, plantas de trigo diferem na resposta a vernalização e fotoperíodo, dependendo do genótipo e da fase do ciclo de desenvolvimento no qual a planta se encontra. A resposta das plantas aos fatores ambientais varia de acordo com a fase do desenvolvimento.

Na fase de germinação à emergência os principais fatores que afetam o desenvolvimento são a umidade do solo e a temperatura. Para que ocorra a germinação é necessário que a semente tenha um conteúdo mínimo de água de 35 a 45% do seu peso sendo que as temperaturas ótimas de germinação encontram-se próximas a 20°C (PORTER; GAWITH, 1999). Após a germinação e emergência as plantas de trigo podem ser sensíveis a vernalização e fotoperíodo, respectivamente, porém a sensibilidade a estes fatores é dependente do genótipo e diminui com a idade da planta (CHUJO, 1966). O estágio de duplo anel é induzido pela exposição à vernalização e ao fotoperíodo. No período compreendido da emergência à espiguetas terminal as plantas podem ser sensíveis tanto a vernalização quanto ao fotoperíodo. Já durante a fase de espiguetas terminal à antese os principais fatores que controlam o desenvolvimento são a temperatura e o fotoperíodo, apresentando baixa sensibilidade a vernalização. A partir do estágio de espiguetas terminal o fotoperíodo altera a taxa de desenvolvimento na planta pela modificação na taxa de aparecimento de folhas, não alterando o número final de folhas na haste principal (GONZÁLEZ et al., 2003). Após a antese a temperatura é o principal fator que controla a duração do desenvolvimento (PORTER; GAWITH, 1999). Portanto, fica evidente que a utilização de diferentes funções de resposta a temperatura, vernalização e fotoperíodo para cada fase do desenvolvimento da planta de trigo é necessária para a concepção de modelos mais realistas e precisos na estimativa da data de ocorrência dos estágios de desenvolvimento.

2.2 Vernalização

O termo vernalização significa a aquisição ou aceleração da habilidade de florescer de sementes embebidas ou plantas devido a sua exposição a baixas temperaturas (EKMEKÇI; TERZIOĞLU, 1998; TAIZ, 2002). Um dos primeiros pesquisadores a estudar os efeitos das

temperaturas baixas sobre o desenvolvimento do trigo foi Trofim Lysenko, o qual chamou este efeito de jarovization (do Russo jarovizacija). Porém, não foi o primeiro a detectar os efeitos das baixas temperaturas sobre o florescimento das culturas (FLOOD; HALLORAN, 1986). Experimentos indicam que a aquisição ou aceleração da resposta a vernalização ocorre no ápice meristemático de crescimento (AMASINO, 2004). Trigos de primavera e de inverno normalmente são diferenciados pela sensibilidade à vernalização (FLOOD; HALLORAN, 1986). Trigos de inverno são fortemente sensíveis a vernalização, enquanto que trigos de primavera, quando sensíveis a vernalização, respondem mais rapidamente e necessitam de uma duração menor de dias de frio para estarem completamente vernalizados (LIMIN; FOWLER, 2002). A vernalização pode ocorrer em temperaturas entre 0 a 18°C, porém as temperaturas ótimas ocorrem entre 0 e 8°C (FLOOD; HALLORAN, 1986; CUNHA et al., 1998). Normalmente, 50 dias em temperatura ótima de vernalização são suficientes para que as maiorias dos genótipos de trigo estejam completamente vernalizados (KIRBY; WEIGHTMAN, 1997; STRECK et al., 2003a).

O sistema de resposta a vernalização é um processo quantitativo. Plantas podem responder parcialmente a vernalização, porém plantas parcialmente vernalizadas precisam acumular mais tempo térmico para florescerem do que plantas completamente vernalizadas (CAO; MOSS, 1997). A vernalização, sob o ponto de vista fisiológico, é aquisição mitoticamente estável da competência para florescer através de uma “chave” epigenética (qualquer mudança da expressão de um gene sem que ocorra alteração estrutural na seqüência de DNA, no caso da vernalização esta expressão não é transmitida para a próxima geração). Isto ocorre por ser uma mudança que pode ser propagada através da divisão celular na falta de sinal indutivo (AMASINO, 2004).

A caracterização molecular do “Flowering Locus C” (FLC) em *Arabidopsis thaliana* promoveu indícios de como a vernalização afeta a indução floral. O FLC codifica uma proteína dominante MADS¹, que age como um potente repressor do florescimento. A vernalização promove o florescimento pela repressão da expressão do FLC. Em trigo, dois genes que caracterizam trigos de primavera foram recentemente identificados. Estes genes foram denominados VRN1 e VRN2, porém não há relação com os genes de *Arabidopsis* de mesmo nome.

¹ Estas proteínas atuam em uma ampla gama de funções biológicas, incluindo o controle do tempo de florescimento.

Em trigo, o gene VRN1 decodifica uma proteína de domínio MADS que promove o florescimento. Em muitos genótipos de trigo o gene VRN1 é induzido por exposição ao frio. Em trigos de inverno, o gene VRN2 reprime o VRN1. Já em genótipos de trigo de primavera há um alelo de VRN1 que não é reprimido pelo VRN2. Assim, não é necessária a exposição ao frio em trigos de primavera. Pouco é conhecido de como o processo de vernalização age em nível molecular em qualquer espécie vegetal.

Ainda há dúvidas de como age o mecanismo pelo qual as plantas medem a duração do frio durante a vernalização. Atualmente, também não se conhece qualquer detalhe de como a duração de frio é percebida ou qual é o sensor de frio ligado ao processo de vernalização. Um desafio futuro é entender a natureza da resposta da duração de frio em nível molecular (AMASINO, 2004).

A diferença de tempo de duração da emergência até a floração entre trigos de primavera e inverno sugere a ação de muitos genes que controlam a resposta a vernalização. Existem algumas evidências que sugerem o múltiplo alelismo de genes para resposta a vernalização em trigo (WHITE, 2006). Embora quatro genes VRN tenham sido identificados, pouco é conhecido sobre as ações combinadas ou separadas deles no processo de desenvolvimento (FLOOD; HALLORAN, 1986).

Para descrever quantitativamente a resposta à vernalização se utilizam funções de resposta. Estas funções de resposta a vernalização podem ser lineares (EWERT et al., 1996) ou não lineares (STRECK et al., 2003b). Sob o ponto de vista biológico, funções de resposta não lineares parecem ser mais realistas. A resposta a vernalização normalmente é acumulada diariamente em função da temperatura média diária, calculada pela média aritmética das temperaturas máxima e mínima diária. A resposta é um quando a temperatura média diária é ótima e zero quando a temperatura média diária é maior do que a temperatura máxima para vernalização ou menor do que a temperatura mínima para a vernalização. Portanto, têm-se respostas variando de zero a um durante um dia. Um dia efetivo de vernalização é obtido quando uma planta é exposta a temperaturas ótimas de vernalização durante um período de 24 horas (STRECK et al., 2003b). Quando a planta não está exposta a temperaturas ótimas somente uma fração de um dia de vernalização é computada para o cálculo da quantidade de vernalização acumulada.

Genótipos de trigos de primavera apresentam respostas distintas a vernalização e podem ser classificados quanto à sua sensibilidade. Sendo que, os genótipos menos sensíveis a vernalização são considerados aqueles que necessitam menor exigência em frio durante a fase vegetativa para serem induzidos a entrar na fase reprodutiva (CUNHA et al., 1998). Não

foram encontradas na literatura funções de resposta a vernalização para genótipos brasileiros de trigo. Para a elaboração de modelos de desenvolvimento mais precisos e realistas, é necessária a determinação de funções de resposta a vernalização para genótipos com diferentes durações de ciclo de desenvolvimento.

2.3 Temperatura do ar e desenvolvimento

Todo processo biológico, incluindo o desenvolvimento vegetal, responde à temperatura. A influência da temperatura no desenvolvimento do trigo é expressa, normalmente, em soma térmica acumulada ($^{\circ}\text{C dia}$), acima de uma temperatura base, para contabilizar o tempo de duração das fases de desenvolvimento do trigo (AMIR; SINCLAIR, 1991a), já que é uma medida mais realista, sob o ponto de vista biológico, do que dias do calendário civil. Porém, este método está sujeito a críticas, pois não contabiliza a diminuição na taxa diária de desenvolvimento quando a temperatura é superior a temperatura ótima de desenvolvimento (YAN; HUNT, 1999). Para contornar este problema, alguns modelos simulam o desenvolvimento em função de três temperaturas cardinais: mínima (TC_{\min}), ótima (TC_{ot}) e máxima (TC_{\max}) (PORTER; GAWITH, 1999; YAN; HUNT, 1999). Quando a temperatura está abaixo da TC_{\min} ou acima da TC_{\max} não há desenvolvimento, e quando a temperatura é igual a TC_{ot} o desenvolvimento é máximo.

Durante o ciclo desenvolvimento da planta, desde a germinação até a maturidade fisiológica, as exigências em temperatura são modificadas. Uma relação generalizada entre temperatura e taxa diária de desenvolvimento nem sempre é possível, pois as exigências em temperatura variam com o genótipo e com a fase de desenvolvimento (PORTER; GAWITH, 1999). Sendo que, normalmente, as temperaturas cardinais são mais baixas durante a fase vegetativa e mais elevadas durante a fase reprodutiva (PORTER; GAWITH, 1999). Em trigo de inverno, Xue (2000) utilizou temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima de 0, 24 e 35°C para a fase vegetativa (emergência à antese) e 8, 29 e 40°C para a fase reprodutiva (antese à maturidade fisiológica), respectivamente, para simular os principais estágios de desenvolvimento de trigos de inverno usando o modelo WE (WANG; ENGEL, 1998).

Porter; Gawith (1999), em sua revisão de literatura, relatam as temperaturas cardinais para cada uma das fases de desenvolvimento do trigo. Porém, foram verificadas algumas inconsistências nos valores das temperaturas cardinais, principalmente nas temperaturas cardinais ótima e máxima. Tais inconsistências podem ser devido ao fato de que genótipos de

trigo de primavera apresentam temperaturas cardinais com valores maiores do que genótipos de trigo de inverno. Uma alternativa, para contornar este problema, é aumentar as temperaturas cardinais quando se utilizam trigos de primavera.

2.4 Fotoperíodo e desenvolvimento

O fotoperiodismo em plantas é a capacidade que as plantas têm de detectar o comprimento do dia, fazendo com que sejam induzidas a processos que resultam em um determinado evento (florescimento), e que este ocorra em uma determinada época do ano (TAIZ, 2002). Em geral plantas de trigo são de dia longo, ou seja, aumentam a taxa de desenvolvimento com o aumento do fotoperíodo provocando o encurtamento do ciclo até a floração (RIDDELL et al., 1958; CRAUFURD; CARTWRIGHT, 1989). A resposta ao fotoperíodo curto aumenta o número final de folhas em trigos de primavera, sendo uma adaptação que aumenta a longevidade das plantas em dias curtos (BROOKING et al., 1995). Esta resposta possibilita que as plantas de trigo reduzam a taxa de desenvolvimento durante o inverno, onde o fotoperíodo é curto, e possibilita que a antese ocorra após o inverno quando as temperaturas são mais elevadas e o risco de ocorrência de geada na antese é menor. O efeito do aumento do fotoperíodo nas plantas sensíveis pode resultar na diminuição do número final de folhas na haste principal, induzir ao florescimento e reduzir o número de perfilhos (LEVY; PETERSON, 1972; CRAUFURD; CARTWRIGHT, 1989). Porém, genótipos de trigo diferem na resposta quantitativa ao fotoperíodo (RIDDELL et al., 1958).

O fotoperíodo influencia a taxa de aparecimento de folhas alterando o filocrono (KIRBY, 1990; GONZÁLEZ et al., 2003). Cao; Moss (1989) verificaram que a taxa de emergência de folhas aumenta com o aumento do fotoperíodo, ou seja, há diminuição do filocrono com o aumento do fotoperíodo, reduzindo a fase vegetativa de plantas de trigo. Kirby (1990) observou que existe estreita relação entre aparecimento de folhas, a iniciação de espiguetas e o número final de folhas, sendo que os principais fatores que afetam o número de espiguetas são a taxa e a duração da fase de iniciação da espiguetas (RAHMAN; WILSON, 1977). No entanto, a partir do estágio de espiguetas terminal o fotoperíodo não altera o número final de folhas, sendo o processo de aceleração no desenvolvimento vegetativo resultado da diminuição no filocrono da planta (GONZÁLEZ et al., 2003).

O conhecimento das características de genótipos de trigo quanto à resposta a fotoperíodo e sua adaptação em ambientes distintos é essencial para o melhoramento genético

do trigo. Há a necessidade de identificar fatores genéticos específicos responsáveis pela variabilidade da resposta fotoperiódica entre os genótipos de trigo (SLAFER; ARAUS, 2007), que são necessários para a calibração de funções de resposta em modelos de desenvolvimento, crescimento e rendimento de grãos de trigo.

2.5 Modelagem do desenvolvimento de trigo

A simulação do desenvolvimento de plantas é uma parte importante de vários modelos de simulação de culturas (O'LEARY; CONNOR, 1996), sendo uma ferramenta útil para planejamento de diversas práticas culturais (aplicação de fertilizantes, fungicidas, irrigação, etc.) e seleção de genótipos. Modelos de simulação do desenvolvimento podem ser utilizados para verificar o comportamento da cultura em condições diferentes das quais foram geradas e testadas. Uma aplicação comum é verificar o impacto da mudança climática no desenvolvimento das culturas (STRECK et al., 2007). Um modelo ideal de desenvolvimento deve ser hábil em descrever quantitativamente como os fatores genéticos e ambientais interagem durante o ciclo de desenvolvimento da cultura (SLAFER; RAWSON, 1994). Para que isto ocorra, é necessária uma correta simulação das respostas das plantas à temperatura e ao fotoperíodo (CAO; MOSS, 1997).

A escolha de um determinado modelo depende da finalidade, facilidade de implantação e obtenção de parâmetros para sua calibração. Existem vários modelos de simulação de desenvolvimento em trigo que utilizam diversas aproximações, podendo ser modelos aditivos (PERRY et al., 1987; SAARIKO; CARTER, 1996; JAMIESON et al., 1998a), multiplicativos (EWERT et al., 1996; CAO; MOSS, 1997) e a combinação de aditivos e multiplicativos (YAN; WALLACE, 1998). Modelos de simulação de culturas também podem diferir quanto à natureza das funções de resposta ao fotoperíodo e temperatura, podendo ser lineares ou não lineares (WANG; ENGEL, 1998; YAN; WALLACE, 1998).

Modelos de simulação do desenvolvimento multiplicativos, que utilizam funções de resposta não lineares, parecem ser mais realistas sob o ponto de vista biológico (GONZÁLEZ et al., 2002). O modelo de desenvolvimento WE (WANG; ENGEL, 1998) simula o desenvolvimento da planta considerando os efeitos da temperatura no desenvolvimento através da função beta de temperatura. Esta função varia de zero a um e utiliza três

coeficientes de significado biológico: as temperaturas cardinais mínima (TC_{\min} , °C), ótima (TC_{ot} , °C) e máxima (TC_{\max} , °C) para o desenvolvimento.

A função de resposta ao fotoperíodo no modelo WE é uma exponencial negativa que possui dois coeficientes com significado biológico, o coeficiente de sensibilidade (ω) e o fotoperíodo crítico (P_c). No modelo WE para quantificar a resposta da vernalização sobre o desenvolvimento do trigo utilizam-se, como variável dependente, a duração (dias do calendário ou soma térmica) das fases do desenvolvimento e o número final de folhas no colmo principal e como variável independente os dias efetivos de vernalização (LEVY; PETERSON, 1972; PENROSE et al., 1991; ROBERTSON et al., 1996; WANG et al. 1995).

As respostas das plantas de trigo em função da temperatura, vernalização e fotoperíodo variam entre os diferentes genótipos, sendo necessário calibrar os coeficientes para cada um dos genótipos estudados. Portanto, é importante ajustar os coeficientes em diferentes épocas de semeadura para genótipos com diferentes durações de ciclo de desenvolvimento (precoce, médio e tardio), possibilitando que estes coeficientes sejam utilizados em condições diferentes daquelas em que foram ajustados. Modelos de desenvolvimento podem ser utilizados em conjunto com outros modelos como, por exemplo, modelos de balanço de água no solo.

2.6 Modelagem do balanço de água do solo

A quantidade de água disponível no solo para as plantas (ADSP) influencia a maioria dos processos físicos e fisiológicos no sistema solo-planta-atmosfera (EITZINGER et al., 2003) e é um importante fator no crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas na maior parte das áreas agrícolas do planeta (BOYER, 1982; FARIA; MADRAMOOTOO, 1996; STRECK, 2004). Existem vários métodos de medida a campo da ADSP, como por exemplo, o método gravimétrico, o método da sonda de nêutrons e o método da técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR). No entanto, muitas vezes a medida da umidade do solo por estes instrumentos não é possível, como é o caso da dificuldade na calibração de curvas características do solo para a utilização da técnica do TDR (CICHOTA; LIER, 2004), ou é muito onerosa, pois instrumentos sofisticados como o TDR são caros e não acessíveis para muitos usuários, principalmente em se tratando de sistemas operacionais.

Métodos simples para estimar a ADSP são úteis, tanto para utilização em modelos de simulação das culturas agrícolas, quanto para o planejamento de terras aráveis (GERAKIS;

ZALIDIS, 1998). Assim, a utilização de modelos de simulação de balanço de água no solo são ferramentas úteis e apropriadas para estimar a quantidade de água no solo (PANIGRAHI; PANDA, 2003) e avaliar a sustentabilidade biofísica de sistemas agrícolas (BERG et al., 2002).

A estimativa da ADSP é parte de modelos de crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas agrícolas (O'LEARY; CONNOR, 1996; DARDANELLI et al., 2004). Há na literatura um grande número de modelos que descrevem o balanço de água no solo com vários graus de complexidade (BLOMBÄCK et al., 1995), porém, para a sua escolha, deve-se levar em consideração a precisão da estimativa e a praticidade de aplicação.

Modelos de simulação são uma representação simplificada da realidade e consistem de relações matemáticas, podendo ser estocásticos ou mecanísticos (RICKMAN et al., 1996). Em modelos estocásticos os resultados obtidos geralmente não podem ser extrapolados para outras regiões ou épocas de semeadura. Modelos mecanísticos são constituídos por funções matemáticas que representam melhor os processos envolvidos. Assim, seu uso pode ser estendido para regiões e épocas diferentes daquelas em que foram desenvolvidos e calibrados (AMIR; SINCLAIR, 1991a).

Modelos detalhados de balanço de água no solo, normalmente, são complexos, necessitando de um elevado número de parâmetros e dados de entrada para descrever o conteúdo de água no solo. Modelos complexos têm muitas vezes o objetivo de aumentar o entendimento das complexas interações da água no sistema solo-planta-atmosfera e são mais freqüentemente usados na pesquisa (BLOMBÄCK et al., 1995). Muitas vezes estes dados necessários para a simulação do balanço de água em modelos complexos não estão disponíveis em propriedades rurais. Para contornar estas situações uma opção é a utilização de modelos mecanísticos simplificados para a simulação do balanço de água no solo (SINCLAIR, 1986; CAMPBELL; DIAZ, 1988; AMIR; SINCLAIR, 1991b; MUCHOW; SINCLAIR, 1991; BERG et al., 2002). Estes modelos utilizam um reduzido número de informações, são compostos por funções matemáticas robustas e podem ser usados para diversas situações, sendo intermediários entre modelos estocásticos (CHOUDHURY, 1999) e modelos complexos (WEGEHENKEL, 2000).

Em vista do exposto, fica evidenciado que, para utilizar modelos de simulação é necessário ajustar os coeficientes das funções de resposta a vernalização [$f(V)$], fotoperíodo [$f(P)$] e temperatura [$f(T)$], que são utilizadas no modelo WE (WANG; ENGEL, 1998) para genótipos brasileiros de trigo com ciclo de desenvolvimento distintos. O modelo WE pode ser usado em associação com modelos balanço de água no solo e, conseqüentemente, pode

melhorar a estimativa do conteúdo de água no solo. Assim, esta tese está dividida em três capítulos, cujos objetivos foram:

- Determinar a sensibilidade à vernalização de alguns genótipos de trigo do sul do Brasil e, ajustar uma função não linear de resposta a vernalização para os genótipos que se mostram sensíveis;

- Determinar a melhor função de temperatura [$f(T)$], fotoperíodo [$f(P)$] e vernalização [$f(V)$] para simular o desenvolvimento do trigo, adaptando o modelo WE modificado por Streck et al. (2003b), usando diferentes combinações de temperaturas cardinais e diferentes maneiras de cálculo da $f(T)$ e $f(V)$;

- Obter uma melhor previsão do balanço de água no solo introduzindo o modelo de desenvolvimento de WE em substituição à data de maturidade fisiológica do trigo no modelo de Campbell; Diaz (1988) e, introduzir um modelo de crescimento radicular e substituir o modelo de desenvolvimento da soma térmica pelo modelo WE no modelo de Amir; Sinclair (1991a,b).

CAPITULO I

RESPOSTA À VERNALIZAÇÃO DE ALGUNS GENÓTIPOS BRASILEIROS DE TRIGO

INTRODUÇÃO

No Brasil existe um grande número de genótipos de trigo recomendados para diferentes ambientes e finalidades. Sendo, a principal cultura de inverno do sul do Brasil, onde são cultivados trigos de primavera, e alguns são chamados trigos de “duplo propósito”, porque podem sofrer pastejo no inverno e ainda produzir grãos na primavera (WENDT et al., 2006). Alguns genótipos de trigo cultivados no sul do Brasil podem apresentar resposta a vernalização (CUNHA et al., 1998).

A vernalização é um mecanismo de defesa do trigo que atua como proteção contra o efeito danoso das baixas temperaturas durante o inverno. Denomina-se vernalização o processo, em que sementes hidratadas ou plântulas, expostas a temperaturas baixas não congelantes induzem as plantas a entrarem na fase reprodutiva e assim diminuem o tempo (dias) para floração (FLOOD; HALLORAN, 1986; TAIZ, 2002). Plantas de trigo submetidas a temperaturas vernalizantes têm menos plastocronos (intervalo de tempo entre o aparecimento de dois primórdios foliares sucessivos) entre a germinação das sementes e a iniciação de primórdios reprodutivo e conseqüentemente, menor número de folhas no colmo principal, o que diminui o tempo até a floração (LIU, 2007). Após a floração, as plantas de trigo não respondem a vernalização (STRECK et al., 2003a,b). Trigos de primavera apresentam pouca ou nenhuma resposta à vernalização, enquanto trigos de inverno possuem uma forte resposta à vernalização (FLOOD; HALLORAN, 1986; PRÁŠIL et al., 2004), porém não há uma fronteira clara e objetiva para distinguir trigos de primavera e de inverno quanto à resposta a vernalização (JEDEL, 1986; PENROSE et al., 1991; WANG et al., 1995). O conhecimento da resposta a vernalização é importante para ser incluída em modelos

matemáticos de simulação do desenvolvimento do trigo e na seleção de genótipos (STRECK et al., 2003a,b).

A resposta das plantas a vernalização é determinada por dois fatores: a temperatura durante a vernalização e a duração do período de vernalização. Quanto à temperatura, a vernalização tem três temperaturas cardinais (mínima, ótima e máxima) que em trigo têm sido consideradas como -1,3; 4,9 e 15,7°C, respectivamente (PORTER; GAWITH, 1999; STRECK et al., 2003a,b). A duração do período de vernalização pode ser expressa em dias efetivos de vernalização (DEV). Um DEV é obtido quando as plantas são submetidas à temperatura ótima vernalizante durante um período de 24 horas (STRECK et al., 2002; STRECK et al., 2003a, STRECK, 2003). Em geral, 50 dias efetivos de vernalização são suficientes para satisfazer completamente as necessidades de frio da maioria dos genótipos de trigo (KIRBY; WEIGHTMAN, 1997; STRECK et al., 2003a).

Para quantificar a resposta a vernalização sobre o desenvolvimento do trigo utilizam-se como variável dependente a duração (dias do calendário ou soma térmica) das fases do desenvolvimento e o número final de folhas no colmo principal e, como variável independente os DEV (LEVY; PETERSON, 1972; PENROSE et al., 1991; ROBERTSON et al., 1996; WANG et al. 1995). A normalização da variável dependente da resposta à vernalização é geralmente um procedimento realizado para representar a resposta do trigo a vernalização em modelos de simulação do desenvolvimento (WANG; ENGEL, 1998; STRECK, 2002; STRECK et al., 2003b). Com a normalização, a resposta varia de zero a um e as funções de resposta a vernalização podem ser lineares e não lineares (STRECK et al., 2003a).

Funções não lineares são preferidas em relação às lineares, pois as primeiras são biologicamente mais realistas para representar a resposta de variáveis do desenvolvimento vegetal aos DEV do que as últimas (STRECK, 2002; STRECK, 2003; STRECK et al., 2003a). Não foram encontradas na literatura funções de resposta a vernalização para trigos cultivados no Brasil, o que constituiu a razão científica para este trabalho. Os objetivos desse trabalho foram determinar a sensibilidade à vernalização de alguns genótipos de trigo do sul do Brasil e, ajustar uma função não linear de resposta para os genótipos que se mostram sensíveis.

MATERIAL E MÉTODOS

Um experimento foi conduzido em Santa Maria, RS, Brasil (latitude: 29°43'S; longitude: 53°43'W; altitude 95 m). Utilizaram-se, neste trabalho, os genótipos de trigo CEP 51, CEP 52 e Nova Era da Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa (FUNDACEP) e BRS Louro, BRS 177 e BRS Tarumã da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), que são genótipos recomendados para o Rio Grande do Sul. Esses genótipos foram selecionados por apresentarem ciclo de desenvolvimento distinto, variando de precoce (CEP 51 e BRS Louro) a tardio (Nova Era e BRS Tarumã) (REUNIÃO DA COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE TRIGO, 2006). Sendo, o genótipo BRS Tarumã classificado como duplo-propósito (WENDT et al., 2006).

No processo de vernalização, inicialmente as sementes de trigo foram umedecidas e colocadas em germinador durante um período de 24 horas à temperatura de 20°C. As sementes germinadas foram em seguida transplantadas em bandejas de isopor com 128 células, preenchidas com substrato comercial "PLANTIMAX". Em seguida foram colocadas em câmaras frigoríficas sem a presença de luz natural ou artificial à uma temperatura média diária de 3,5±2 °C, onde permaneceram até a data de transplante. Os tratamentos foram de 0, 7, 14, 21, 28, 35, 42 e 49 dias de vernalização (DV0, DV7, DV14, DV21, DV28, DV35, DV42 e DV49).

O transplante das plantas de todos os tratamentos ocorreu no dia 15/11/2006, em baldes plásticos pretos com 30 cm de diâmetro, com capacidade de 12 litros, preenchidos com substrato comercial "PLANTIMAX". Os baldes foram instalados no campo e enterrados no solo, visando minimizar a absorção da radiação solar pelas paredes externas dos mesmos. O espaçamento entre baldes foi de 50 cm. Foram transplantadas 20 plantas por balde, o que representa uma densidade de 370 plantas m⁻².

O delineamento experimental usado foi o inteiramente casualizado, com cinco repetições (baldes) em esquema bifatorial (seis genótipos e oito tratamentos de vernalização). Cinco plantas foram identificadas por balde com arames coloridos (para destacar as plantas marcadas) logo após o transplante. Os tratos culturais (adubação, aplicação de fungicidas, inseticidas, etc.) foram efetuados conforme a recomendação para a cultura do trigo (REUNIÃO DA COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 2005). Foi realizada irrigação por aspersão sempre que necessária. Na haste

principal das plantas marcadas foram anotadas a data de antese e o número final de folhas (NFF) por ocasião da antese.

Os valores diários de temperatura mínima (T_n , °C) e máxima (T_x , °C) do ar durante a fase de campo foram coletados na Estação Climatológica Principal pertencente ao 8° Distrito de Meteorologia, localizada a aproximadamente 100 m da área experimental. A soma térmica diária (STd, °C dia) foi calculada por :

$$STd = \left(\frac{T_x + T_n}{2} - T_b \right) \quad (1)$$

em que, T_b é a temperatura base de desenvolvimento (°C), considerada 0°C para todos os genótipos utilizados neste estudo (STRECK et al., 2003b). A soma térmica acumulada (STa, °C dia) a partir da emergência foi calculada por:

$$STa = \sum_m^n STd \quad (2)$$

Resultados da literatura sugerem uma curva sigmoideal de resposta do desenvolvimento do trigo a vernalização (STRECK et al., 2003a). Para obter respostas entre zero e um, os dados de NFF no colmo principal e STa da fase emergência até a antese (EM-AN) foram normalizados conforme Streck et al. (2003a):

$$NFFN = \frac{NFF_{DV0} - NFF}{NFF_{DV0} - NFF_{DVC}} \quad (3)$$

$$STaN = \frac{STa_{DV0} - STa}{STa_{DV0} - STa_{DVC}} \quad (4)$$

em que, NFFN é o número final de folhas normalizado, NFF_{DV0} é o número final de folhas no tratamento sem vernalização, NFF_{DVC} é o número final de folhas quando a vernalização é completa (49 dias de vernalização neste estudo), STaN é a soma térmica normalizada, STa_{DV0} é a soma térmica acumulada no tratamento sem vernalização, STa_{DVC} é a soma térmica acumulada no tratamento onde a vernalização é completa (49 dias de vernalização). Para os dados de NFFN e STaN da fase EM-AN versus DEV foi ajustada a função de resposta de Morgan-Mercer-Flodin (MMF) descrita em Streck et al. (2003a):

$$f(V) = \frac{DEV^n}{(X_{0,5})^n + (DEV)^n} \quad (5)$$

em que, $f(V)$ é a função de vernalização, DEV são os dias efetivos de vernalização, $X_{0,5}$ é o valor em que a resposta à vernalização é a metade da vernalização completa e n é o coeficiente que dá a forma da curva. Quanto menor o valor do coeficiente $X_{0,5}$ menor é a exigência em vernalização. Para o cálculo dos DEV, acumularam-se os valores da taxa diária

de vernalização [fvn(T)], a qual foi calculada através da função beta (WANG; ENGEL, 1998; STRECK et al., 2003b):

$$\begin{cases} fvn=0, & T < TC_{\min v} \\ fvn = \frac{2(T-TC_{\min v})^\alpha (TC_{\text{otv}}-T_{\min v})^\alpha - (T-TC_{\min v})^{2\alpha}}{(TC_{\text{otv}}-T_{\min v})^{2\alpha}} & TC_{\min v} \leq T \leq TC_{\max v} \\ fvn=0, & T > TC_{\max v} \end{cases} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\ln 2}{\ln[(TC_{\max v} - TC_{\min v}) / (TC_{\text{otv}} - TC_{\min v})]} \quad (7)$$

em que, T é a temperatura média diária em que foi realizada a vernalização (3,5°C) e TC_{minv}, TC_{otv} e TC_{maxv} são as temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima de vernalização assumidas como - 1,3; 4,9 e 15,7°C, respectivamente (PORTER; GAWITH, 1999; STRECK et al., 2003b). As médias do NFF e da STa da fase EM-AN foram submetidas a ANOVA e comparadas através do teste de Tukey (P < 0,05). Foi efetuado o teste de comparação de médias e as funções de resposta à vernalização foram ajustadas através do programa estatístico “SAS” (SAS Institute, 2002). A sensibilidade dos genótipos de trigo à vernalização foi avaliada pela diferença do NFF e da soma térmica acumulada (STa) da fase EM-AN entre o tratamento sem vernalização (DV0) e o tratamento de maior tempo de vernalização (DV49). Quanto maior a diferença maior a sensibilidade do genótipo (CUNHA et al., 1998).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período em que as plantas cresceram e se desenvolveram no campo, a temperatura média do ar foi superior a 16,8°C, o que garantiu que as plantas fossem expostas a temperaturas vernalizantes apenas enquanto estavam na câmara a 3,5°C, e assim qualquer diferença no NFF e STa da fase EM-AN foi devido a diferença nos DEV.

A partir da análise de variância para as variáveis NFF e STa da fase EM-AN foi observado o efeito significativo dos dois fatores principais (genótipos e dias efetivos de vernalização), e das interações duplas (Tabela 1). Entre os fatores principais, o genótipo apresentou o maior quadrado médio (QM), o que sugere que a variação tanto do NFF quanto da STa da fase EM-AN foi mais afetada pelo genótipo do que pelos tratamentos de vernalização. Estes resultados da ANOVA indicam que foram usados genótipos de trigos

bastante distintos em termos de ciclo de desenvolvimento, o que é importante neste estudo. Em função das interações duplas terem sido significativas, procedeu-se o desdobramento da análise estatística dentro de cada fator principal (Tabela 2).

Tabela 1 - Graus de liberdade (GL) e quadrado médio (QM) do quadro de análise da variância para as variáveis: número final de folhas (NFF) e soma térmica acumulada (STa) da fase emergência-antese (EM-AN), no colmo principal de seis genótipos de trigo em oito tratamentos de vernalização (DEV = dias efetivos de vernalização), transplantados em 15/11/2006. Santa Maria, RS, 2006-2007.

Fonte	GL	QM
	NFF	
Genótipo	5	87,40**
DEV	7	34,70**
Genótipo*DEV	35	3,13**
Média = 9,5		
Coefficiente de Variação = 7,6		
	STa	
Genótipo	5	1.663.908,27**
DEV	7	393.960,034**
Genótipo*DEV	35	97.282,546**
Média = 1368		
Coefficiente de Variação = 9,3		

**Probabilidade < 0,001

O genótipo BRS Louro não foi sensível ao tratamento de tempo de exposição ao frio, pois as médias da STa da fase EM-AN entre os tratamentos de vernalização não apresentaram diferença significativa pelo teste de Tukey e a diferença de STa da fase EM-AN entre o tratamento sem vernalização (DV0) e com 49 dias de vernalização (DV49) foi de apenas 32°C dia (Tabela 3). Houve diferença significativa no NFF do genótipo BRS Louro entre o tratamento sem vernalização e o tratamento com 49 dias de vernalização, mas essa diferença foi de apenas uma folha. No outro extremo apresentou-se o genótipo BRS Tarumã, que apresentou uma diferença significativa média no NFF de 7,6 folhas entre o tratamento com maior duração de vernalização (DV49) e o tratamento sem vernalização (DV0) (Tabelas 2 e 3). Além disso, as plantas do tratamento sem vernalização não alcançaram a antese, pois não emitiram espiga, um comportamento típico de genótipos de trigo de inverno que possuem forte sensibilidade à vernalização (BROOKING, 1996; RAWSON et al., 1998; STRECK et al., 2003a).

Tabela 2 - Efeito da vernalização no número final de folhas (NFF) e na soma térmica acumulada (STa) da emergência até a antese, no colmo principal de seis genótipos de trigo cultivados no sul do Brasil, transplantados em 15/11/2006. Santa Maria, RS, Brasil, 2007.

Cultivar	Dias de Vernalização (DV)																								
	0		7		14		21		28		35		42		49		Média								
Variável: NFF																									
BRS Tarumã	A	17,0	a*	A	15,5	a	AB	15,0	a	AB	15,0	a	A	15,4	a	C	10,5	a	BC	11,2	a	C	9,4	a	12,0
CEP 51	A	10,9	b	AB	10,7	b	ABC	10,1	b	BCD	9,5	bc	BCD	9,5	b	CD	9,3	ab	D	8,6	b	D	8,4	b	9,6
CEP 52	A	11,8	b	AB	10,7	b	AB	10,3	b	BC	9,8	bc	BCD	9,3	b	CDE	8,6	ab	DE	8,2	bc	E	7,6	b	9,4
Nova Era	A	12,0	b	B	10,7	b	BC	9,8	b	B	10,2	b	BCD	9,5	b	BC	9,6	ab	CD	8,6	b	D	8,3	b	9,8
BRS 177	A	9,8	bc	A	9,6	bc	AB	9,3	bc	ABC	8,7	bc	BC	8,0	c	BC	8,1	b	C	7,4	c	C	7,7	b	8,6
BRS Louro	A	8,4	c	A	8,6	c	AB	8,3	c	AB	8,4	c	AB	7,9	c	AB	7,9	b	A	7,5	bc	B	7,3	b	8,0
Média		10,9			10,8			10,1			9,5			9,5			8,9			8,6			8,1		
Variável: STa da fase EM-AN																									
BRS Tarumã		.	.	A	2609	a	A	2538	a	.	.	.	A	2580	a	AB	1896	a	AB	1814	ABa	B	1434	a	1930
CEP 51	A	1562	abc	AB	1434	bc	ABC	1413	b	BC	1343	bc	BC	1328	bc	BC	1285	b	C	1260	Cb	C	1260	ab	1361
CEP 52	A	1739	ab	AB	1507	bc	BC	1423	b	BC	1376	b	BC	1237	cd	BC	1261	b	C	1207	Cb	BC	1260	ab	1357
Nova Era	A	1880	a	AB	1605	b	BC	1495	b	BC	1507	a	BC	1388	b	BC	1370	b	BC	1337	BCb	C	1258	ab	1466
BRS 177	A	1409	bc	AB	1278	cd	AB	1327	b	AB	1249	cd	B	1173	c	B	1198	b	B	1178	Bb	B	1180	b	1249
BRS Louro	A	1189	c	A	1127	d	A	1123	c	A	1198	d	A	1148	d	A	1140	b	A	1192	Ab	A	1175	b	1162
Média		1525			1431			1483			1334			1306			1320			1331			1261		

*Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Os genótipos CEP 51, CEP 52, Nova Era e BRS 177 apresentaram sensibilidade intermediária à vernalização, com diferenças entre si. Comparando com os outros dois genótipos, os genótipos BRS 177 e CEP 51 foram classificados como de sensibilidade fraca, pois a diferença de NFF foi ao redor de duas folhas e a STa na fase EM-AN entre 220 e 280°C dia. Os genótipos CEP 52 e Nova Era foram classificados como de sensibilidade moderada, já que a diferença de NFF entre os tratamentos DV49 e DV0 foi em torno de quatro folhas e a diferença entre DV49 e DV0 para STa da fase EM-AN foi entre 470 e 632°C dia (Tabela 3).

Tabela 3 - Diferença no número final de folhas (NFF) e na soma térmica acumulada (STa) da fase emergência-antese (EM-AN) no colmo principal entre tratamento sem vernalização (DV0) e com 49 dias de vernalização (DV49) e sensibilidade à vernalização de seis genótipos de trigo transplantados em 15/11/2006. Santa Maria, RS, 2006-2007.

Genótipos	NFF (DV0 – DV49)	STa (DV0 - DV49)	Sensibilidade à vernalização
BRS Louro	1,1	32,05	Insensível
BRS 177	2,1	224,15	Fraca
CEP 51	2,5	279,5	Fraca
CEP 52	4,2	470,8	Moderada
Nova Era	3,7	631,9	Moderada
BRS Tarumã	7,6	*	Forte

* Não houve emissão de espiga no tratamento sem vernalização.

Em função destes resultados e para facilitar a interpretação optou-se por apresentar a resposta à vernalização dos quatro genótipos com resposta intermediária nas Figuras 1 e 2 e dos outros dois genótipos na Figura 3. Analisando-se os valores do coeficiente $X_{0,5}$ e n da equação MMF (equação 5) ajustados para NFFN dos genótipos BRS 177 (Figura 1a), CEP 51 (Figura 1b), CEP 52 (Figura 1c) e Nova Era (Figura 1d), classificados como trigos de primavera (FLOOD; HALLORAN, 1986), observa-se que os valores ajustados de $X_{0,5}$ da equação MMF variaram de 12,4 a 20,2 dias efetivos de vernalização. Valores inferiores a 22,5 são considerados típicos de trigos de primavera (STRECK et al., 2003a). Similarmente, os valores de n foram baixos (1,2 a 4,2) nos quatro genótipos de trigos que responderam de

maneira intermediária a vernalização quando comparados com valores de $n = 5$ para trigos de inverno (STRECK et al., 2003a).

Os valores do coeficiente $X_{0,5}$ e n da equação MMF ajustados para STaN da fase EM-AN dos genótipos BRS 177 (Figura 2a), CEP 51 (Figura 2b), CEP 52 (Figura 2c) e Nova Era (Figura 2d) variaram de 8,3 a 15,4 DEV e de 1,2 a 6,0 respectivamente. Os valores baixos do coeficiente $X_{0,5}$ nos quatro genótipos e do coeficiente n obtidos em três genótipos (CEP 51, CEP 52 e Nova Era) confirmam resultados anteriores de que trigos de primavera, quando respondem a vernalização, tem menores exigências de frio (em torno de 30 DEV) e mais rapidamente tem suas exigências em temperaturas vernalizantes completadas (LEVY; PETERSON, 1972; CUNHA et al., 1998).

O valor de $n = 6$ ajustado para o genótipo BRS 177 (Figura 2a) pode induzir à interpretação de que este genótipo responde à vernalização como um trigo de inverno (STRECK et al., 2003a), no entanto, tal interpretação não deve ser feita, pois este é o coeficiente de forma da equação MMF (equação 5) e quanto maior seu valor, mais rapidamente sua exigência em frio vernalizante é completada após a metade da necessidade de vernalização ($X_{0,5}$) estar satisfeita. O coeficiente $X_{0,5}$, que representa a exigência em vernalização, foi baixo (15,4) para o genótipo BRS 177 (Tabela 3), classificando-se ele como um genótipo de fraca sensibilidade à vernalização, pois seu comportamento é típico de trigo de primavera.

Para o genótipo BRS Louro não foi ajustada uma função de resposta a vernalização, pois este genótipo não respondeu à vernalização (Tabela 2 e 3). Para ilustração, os dados de NFF e STa da fase EM-AN estão plotados nas Figuras 3a e 3b, respectivamente, confirmando que esse genótipo não responde a vernalização, resultado que concorda com relatos anteriores de que alguns trigos de primavera não respondem à vernalização (LEVY; PETERSON, 1972; CUNHA et al., 1998).

Nos tratamentos com vernalização entre 7 e 28 dias, apenas algumas plantas do genótipo BRS Tarumã (0, 20, 0 e 5% das plantas etiquetadas nos tratamentos 7, 14, 21 e 28 dias de vernalização, respectivamente) alcançaram a antese e quando alcançaram, as espigas apresentavam deformações. No tratamento sem vernalização todas as plantas marcadas morreram antes de completar a antese e a maioria delas permaneceram em forma de roseta, não apresentando alongação do colmo principal, tais características são típicas de plantas que são fortemente sensíveis à vernalização (TAIZ, 2002; STRECK et al., 2003a).

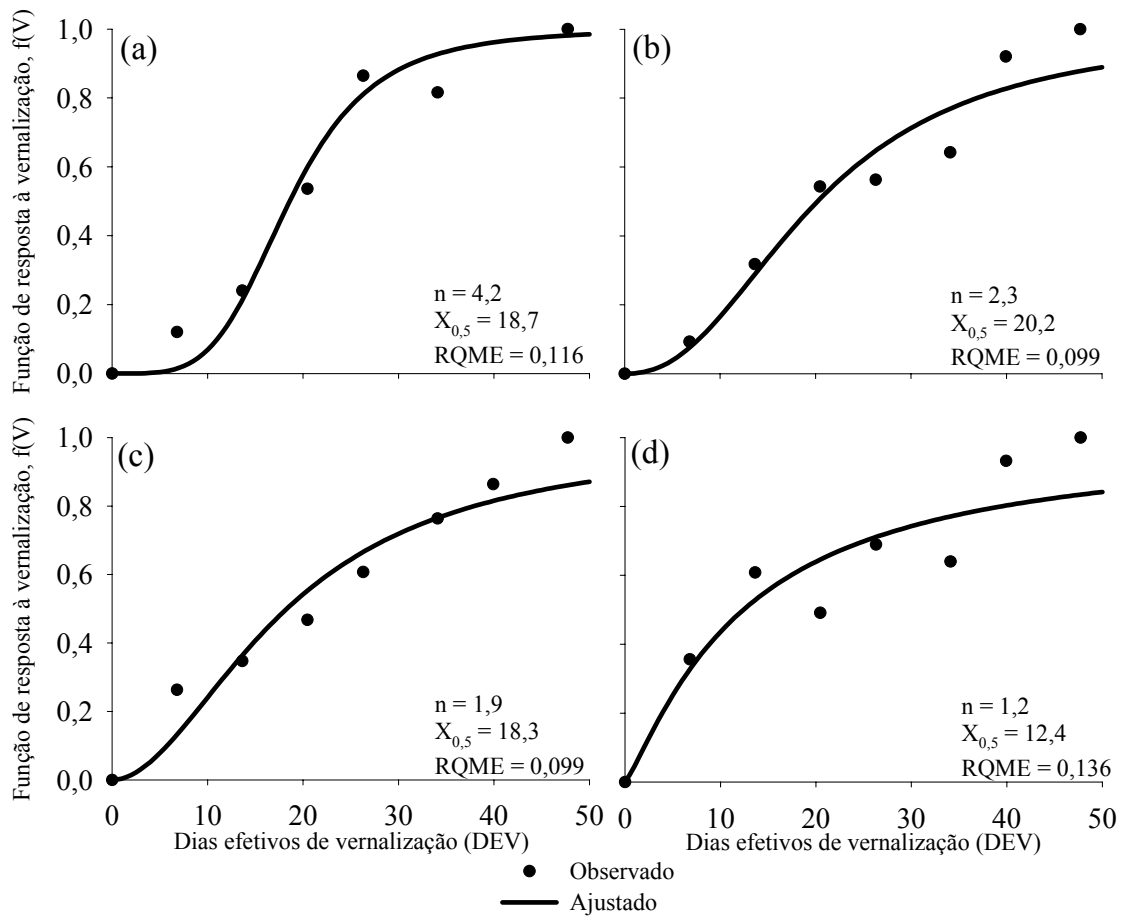


Figura 1 - Resposta à vernalização dos genótipos BRS 177 (a), CEP 51 (b), CEP 52 (c) e Nova Era (d) ajustada em função do número final de folhas normalizado (NFFN) no colmo principal como variável dependente, transplantados em 15/11/2006. Os pontos são os dados observados e a curva é a equação MMF (equação 5) ajustada, com valores de $X_{0,5}$ (coeficiente que indica o valor dos dias de vernalização quando a resposta é a metade da vernalização completa) e de n (coeficiente de forma) fornecidos em cada painel. Santa Maria, RS, 2006-2007. RQME = raiz do quadrado médio do erro.

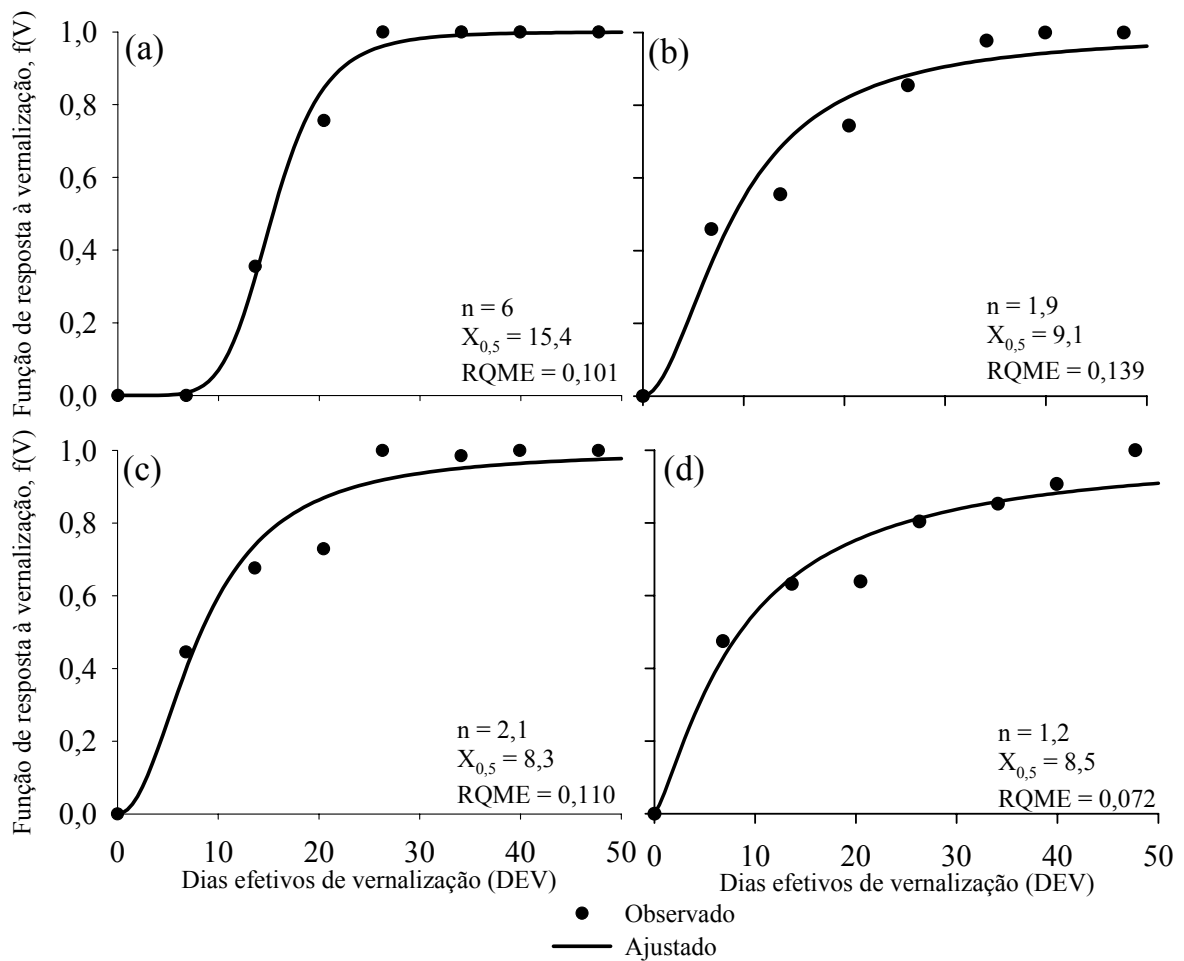


Figura 2 - Resposta à vernalização dos genótipos BRS 177 (a), CEP 51 (b), CEP 52 (c) e Nova Era (d) ajustada em função da soma térmica acumulada normalizada (STaN) da fase emergência-antese (EM-AN) no colmo principal como variável dependente, transplantadas em 15/11/2006. Os pontos são os dados observados e a curva é a equação MMF (equação 5) ajustada, com valores de $X_{0,5}$ (coeficiente que indica o valor dos dias de vernalização quando a resposta é a metade da vernalização completa) e de n (coeficiente de forma) fornecidos em cada painel. Santa Maria, RS, 2006-2007. RQME = raiz do quadrado médio do erro.

Os menores valores de NFF no tratamento com maior duração de vernalização (DV49) variaram de 7,3 a 9,4 folhas nos genótipos BRS Louro e BRS Tarumã, respectivamente (Tabela 2). Esses valores, aproximam-se aos valores de NFF entre 6,5 e 8 folhas obtidos por Robertson et al. (1996), em que plantas de trigo que foram submetidas a tratamentos com duração superior a 49 dias de vernalização e temperatura de 5°C. Estes mesmos autores ainda sugerem um mínimo de NFF de seis no colmo principal, quando o fotoperíodo é longo e a necessidade de vernalização é atendida. Sendo, neste caso o NFF definido pelo número de

primórdios de folhas iniciados no momento da completa vernalização, mais os três primórdios foliares presentes no embrião da semente.

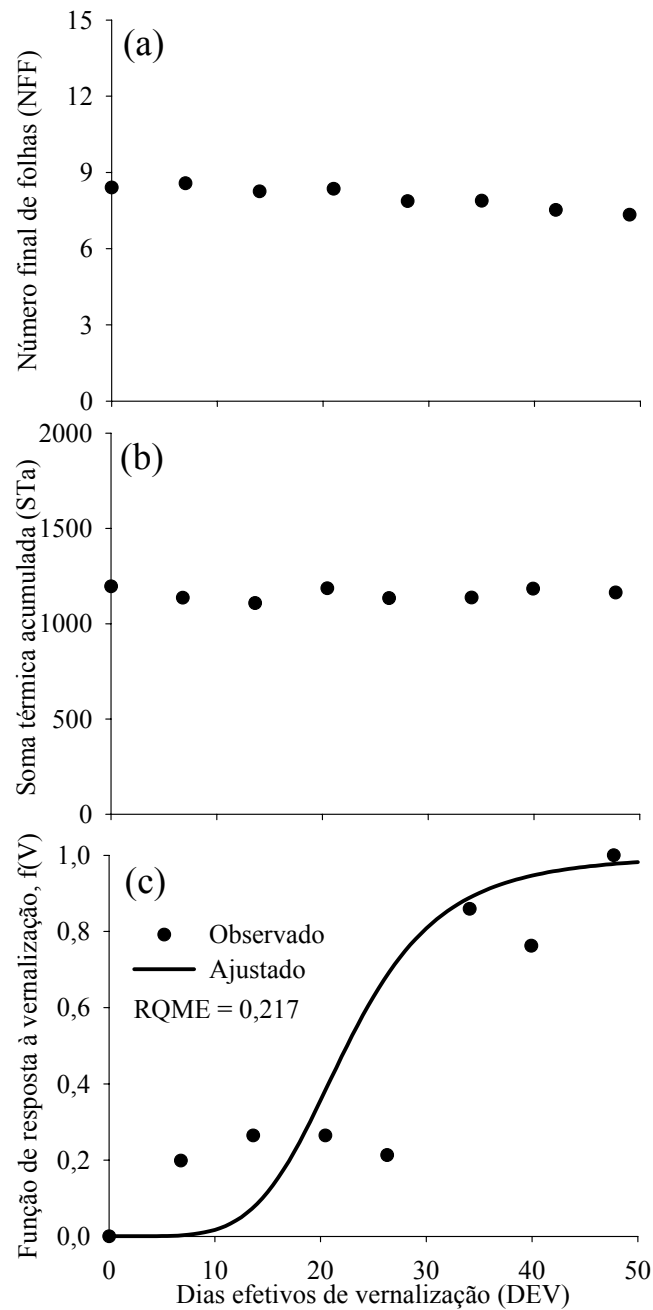


Figura 3 - Número final de folhas (NFF) no colmo principal (a) e soma térmica acumulada (STa) da fase emergência-antese (EM-AN) no colmo principal (b) para o genótipo de trigo BRS Louro e resposta à vernalização utilizando-se o número final de folhas normalizado (NFFN) no colmo principal como variável dependente para o genótipo de trigo BRS Tarumã (c), transplantados em 15/11/2006. Santa Maria, RS, 2006-2007.

Condições completamente indutivas em trigo ocorrem em fotoperíodos superiores a 16 horas. Brooking et al. (1995) encontraram fotoperíodos saturantes de 13,5 a 15,9 horas para trigos de primavera. Durante o período do experimento a campo neste estudo (15/11/2006 a 28/02/2007), o maior fotoperíodo foi de 14,9 horas, o que sugere que a indução a floração por fotoperíodo pode não ter sido completamente satisfeita, e pode explicar o maior valor de NFF (7,3 a 9,4 folhas) obtido neste estudo quando comparado com outros estudos. O maior NFF no tratamento com maior duração de vernalização (DV49), de 9,4 folhas para o genótipo BRS Tarumã, pode ser devido a uma maior resposta ao fotoperíodo nesse genótipo do que nos outros, já que trigos de inverno normalmente são mais responsivos a fotoperíodos longos (SNAPE et al., 2001).

O valor de NFF de 17 folhas encontrado neste trabalho no tratamento sem vernalização (DV0) para o genótipo BRS Tarumã é próximo daqueles relatados na literatura para trigos de inverno, em que o NFF nos tratamentos sem vernalização variou de 16 (BROOKING, 1996) até 21 folhas (ROBERTSON et al., 1996; RAWSON et al., 1998; STRECK et al., 2003a). Em função do alto NFF (17 folhas) nas plantas do tratamento sem vernalização, e como estas plantas não atingiram a antese, comportamento típico de trigos de inverno (BROOKING, 1996; RAWSON et al., 1998; STRECK et al., 2003a), optou-se em não ajustar uma curva MMF e sim usar uma função MMF para trigos de inverno (Figura 3c), com $X_{0,5} = 22,5$ DEV e $n = 5$ (STRECK et al., 2003a).

Alguns valores observados de NFF, nos tratamentos entre 7 e 28 dias de vernalização do genótipo BRS Tarumã, estão distantes da função de resposta a vernalização para trigos de inverno (Figura 3c). Parte da dispersão dos pontos em relação à curva nesses dois tratamentos pode estar associada ao fato de que um reduzido número de plantas emitiu a folha bandeira (30, 40, 5 e 40% das plantas marcadas nos tratamentos de 7, 14, 21 e 28 dias de vernalização, respectivamente). As plantas desses tratamentos mostraram uma resposta a vernalização similar. Porém, esperava-se que as plantas do tratamento com 28 DV emitissem um NFF menor do que o tratamento com 21 DV. Este fato pode ter ocorrido devido a uma possível desvernalização, devido à exposição de plantas às altas temperaturas durante o experimento. Durante este período, que foi de 15/11/2006 a 26/02/2007, foi verificada a ocorrência 92 e 29 dias com temperatura máxima (T_x) e média diária (T_{media}) acima de 27°C, respectivamente, sendo que, temperaturas acima de 27°C são consideradas desvernalizantes (CAO; MOSS, 1997). Assim, o fato das plantas desses quatro tratamentos (7, 14, 21, e 28 DV) terem tido um número final de folhas similar ou maior do que o tratamento sem vernalização indica que houve um pequeno efeito da vernalização devido a uma possível desvernalização.

O valor de raiz do quadrado médio do erro (RQME) de 0,217 obtido para o genótipo BRS Tarumã (Figura 3c) foi maior do que 0,083, encontrado por Streck et al. (2003a) para trigos de inverno. Já os valores de RQME dos outros quatro genótipos (entre 0,072 e 0,139) que responderam à vernalização (Figuras 1 e 2) são similares aos valores relatados em Streck (2002), Streck (2003) e Streck et al. (2003a).

O momento da floração em trigo é controlado por complexas interações genéticas em que grupos de genes homólogos estão envolvidos. A existência de uma grande quantidade de variações de alelos é a razão principal da adaptação do trigo ao redor do mundo. São três os genes que controlam a duração do ciclo de desenvolvimento. Dois desses interagem com o ambiente, os que controlam a resposta a vernalização e fotoperíodo, e um terceiro grupo controla a taxa de desenvolvimento independentemente da vernalização ou fotoperíodo. Os genes que controlam a vernalização são denominados de VRN e a necessidade de vernalização é normalmente dominante (SNAPE et al., 2001). Snape et al. (2001) citam que a maioria dos genótipos de trigo utilizados nas regiões produtoras ao redor do mundo possuem alelos ligados ao locus VRN-A1, que são predominantes na redução das necessidades de vernalização. Assim, através da caracterização dos alelos de VRN-A1 existe a possibilidade diferenciar trigos de primavera e de inverno de acordo com as necessidades de vernalização. Porém, o mapeamento genético dos genótipos de trigo brasileiros demanda tempo, custo e mão-de-obra qualificada para sua execução. Os coeficientes de funções de resposta à vernalização simples e robustas como os coeficientes $X_{0,5}$ e n da função MMF apresentados neste estudo podem preencher esta lacuna quando se pretende diferenciar trigos de inverno dos de primavera.

Quando se considera a existência de uma resposta à vernalização de alguns genótipos de trigo de primavera, pode-se incorrer em erros na predição da antese de genótipos de trigo utilizados no sul do Brasil. Por exemplo, para o genótipo Nova Era, que tem resposta moderada à vernalização, considerando-se uma temperatura média diária de 20°C e uma STa na fase EM-AN de 630°C dia entre plantas não vernalizadas e completamente vernalizadas, pode-se incorrer num erro de 31 dias do calendário civil e este erro é maior ainda para o genótipo BRS Tarumã.

O genótipo BRS Tarumã é recomendado para “duplo propósito” (WENDT et al., 2006). Uma das premissas para o genótipo ser de duplo propósito é ter um ciclo longo. Os resultados desse estudo indicam que esse genótipo tem ciclo longo no sul do Brasil por ser altamente exigente em temperaturas vernalizantes (fortemente sensível à vernalização, Tabela 3) para entrar na fase reprodutiva. No Brasil, inclusive nas regiões produtoras de trigo como

no Planalto do Rio Grande do Sul, o total de dias com temperaturas vernalizantes durante o ano é menor se comparado às regiões temperadas. Assim, trigos com alta exigência em frio alongam seu ciclo. O genótipo BRS Tarumã é procedente do cruzamento simples entre os genótipos Century e B 35 (DUCA et al., 2006), como o genótipo Century é um trigo de inverno (CARROLL et al., 2002), este confere ao genótipo BRS Tarumã características similares às de trigo de inverno. Considerando estes resultados, pode-se inferir que o segundo propósito pode não ser cumprido, isto é, a cultura forneceria apenas pasto e não haveria produção de grãos em anos com pouco frio ou semeaduras tardias.

As funções de resposta a vernalização descritas para genótipos de trigo usados neste estudo (Figura 2 e 3c) podem ser usadas em modelos de simulação do desenvolvimento, como os modelos de Wang; Engel (1998) e Streck et al. (2003b) para diferentes grupos de maturidade de trigos usados no sul do Brasil. Uma maneira simples de estender a aplicabilidade das funções de resposta ajustadas aqui para outros genótipos de trigo é agrupar estes por semelhança de ciclo, assumindo-se que a função de resposta seja similar também. Outras maneiras podem ser utilizadas, no entanto, demandam mais equipamento, tempo de experimentação e pessoal qualificado.

CONCLUSÕES

O genótipo BRS Louro não é sensível à vernalização e o genótipo BRS Tarumã é fortemente sensível à vernalização, enquanto os genótipos BRS 177, CEP 51, CEP 52 e Nova Era apresentam sensibilidade intermediária a vernalização.

A função Morgan-Mercer-Flodin pode ser usada como função de resposta à vernalização em modelos de simulação do desenvolvimento de genótipos Sul-brasileiros de trigo com distintos requerimentos em vernalização.

REFERÊNCIAS

BROOKING, I. R.; JAMIESON, P. D.; PORTER, J. R. The influence of daylength on final leaf number in spring wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 41, n. 3, p.155-165, jul./set. 1995.

BROOKING, I. R. Temperature response of vernalization in wheat: A developmental analysis. **Annals of Botany**, London, v. 78, n. 4, p. 507-512, abr. 1996.

CAO, W.; MOSS, D. N. Modelling phasic development in wheat: a conceptual integration of physiological components. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 129, n. 2, p. 163-172, 1997.

CARROLL, J. E.; BERGSTROM, G. C.; GRAY, S. M. Assessing the resistance of winter wheat to wheat spindle streak mosaic bymovirus. **Canadian Journal of Plant Pathology**, Ottawa, v. 52, n. 4, p.465-470, out./dez. 2002.

CUNHA, G. R. et al. Índice de resposta à vernalização em trigos sul-brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 29-33, 1998.

DUCA, L. J. A. et al. BRS Tarumã - a new, double-purpose wheat cultivar for southern Brazil. **Annual Wheat Newsletter**, Manhattan, v. 52, p. 21-21, 2006.

FLOOD, R. G.; HALLORAN, G. M. Genetics and physiology of vernalization response in wheat. **Advances in Agronomy**, New York, v. 39, n. 1, p. 87-125, 1986.

JEDDEL, P. E.; EVANS, L. E.; SCARTH, R. Vernalization responses of a selected group of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 66, n. 1, p. 1-9, jan./fev. 1986.

KIRBY, E. J. M.; WEIGHTMAN, R. M. Discrepancies between observed and predicted growth stages in wheat. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 129, n. 4, p. 379-384, 1997.

LEVY, J.; PETERSON, M. L. Responses of spring wheats to vernalization and photoperiod. **Crop Science**, Madison, v.12, n. 4, p.487-492, jul./ago. 1972.

LIU, D. L. Incorporating vernalization response functions into an additive phenological model for reanalysis of the flowering data of annual pasture legumes. **Field Crops Research**, Amsterdam, n. 3, v. 101, p. 331-342, jul./set. 2007.

PENROSE, L. D. J.; MARTIN, R. H.; LANDERS, C. F. Measurement of response to vernalization in Australian wheats with winter habit. **Euphytica**, Wageningen, v. 57, n. 1, p. 9-17, 1991.

PORTER, J. R.; GAWITH, M. Temperatures and the growth and development of wheat: A review. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 10, n. 1, p. 23-36, jan. 1999.

PRÁŠIL, I. T.; PRÁŠILOVÁ, P.; PÁNKOVÁ, K. Relationships among vernalization, shoot apex development and frost tolerance in wheat. **Annals of Botany**, London, v. 94, n. 3, p. 413-418, mar. 2004.

RAWSON, H. M.; ZAJAC, M.; PENROSE, L. D. J. Effect of seedling temperature and its duration of development of wheat cultivars differing in vernalization response. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 57, n. 3, p. 289-300, jul./set. 1998.

REUNIÃO DA COMISSÃO SUL- BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO, 38, 2007, Passo Fundo. **Informações técnicas para a safra 2007: trigo e triticales**. Passo Fundo: EMBRAPA TRIGO, 2006. 75 p.

REUNIÃO DA COMISSÃO SUL- BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 37, 2005, Cruz Alta. **Indicações técnicas da Comissão Sul- Brasileira de Pesquisa de Trigo: trigo e triticales – 2005**. Cruz Alta: FUNDACEP, 2005. 159 p.

ROBERTSON, M. J.; BROOKING, I. R.; RITCHIE, J. T. Temperature response of vernalization in wheat: modelling the effect on the final number of main stem leaves. **Annals of Botany**, London, v. 78, n. 4, p. 371-381, abr. 1996.

SNAPPE, J. W. et al. Waiting for fine times: genetics of flowering time in wheat. **Euphytica**, Wageningen, v. 119, n. 1-2, p. 185-190, mai. 2001.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM – SAS. Getting started with the SAS® Learning Edition. Cary, NC: **SAS Institute**, 2002. 81p.

STRECK, N. A. A generalized vernalization response function for lily (*Lilium spp.*). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 221-228, jul./dez. 2002.

STRECK, N. A. A vernalization model in onion (*Allium cepa* L.). **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 9, n. 2, p. 99-105, mai./set. 2003.

STRECK, N. A.; WEISS, A.; BAENZIGER, P. S. A generalized vernalization response function for winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n. 1, p. 155-159, jan./fev. 2003a.

STRECK, N. A. et al. Improving predictions of developmental stages in winter wheat. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 115, n. 3-4, p. 139-150, jul./dez. 2003b.

TAIZ, L. The control of flowering. In: TAIZ, L.; ZEIGER, E. (Ed.). **Plant Physiology**. Sunderland: Sinauer Associates, 2002. p. 559-590.

WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, Essex, v. 58, n. 1, p. 1-24, jan. 1998.

WANG, E. et al. Vernalization in wheat I. A model based on the interchangeability of plant age and vernalization duration. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 41, n. 2, p. 91-100, abr./jun. 1995.

WENDT, W.; DUCA, L. de J. A. del; CAETANO, V. da R. **Avaliação de cultivares de trigo de duplo propósito, recomendados para cultivo no estado do Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 2 p. (Comunicado Técnico, 137).

CAPITULO II

SIMULAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE TRIGO CONSIDERANDO DIFERENTES TEMPERATURAS CARDINAIS E MÉTODOS DE CÁLCULO DA FUNÇÃO DE RESPOSTA A TEMPERATURA DO AR

INTRODUÇÃO

A simulação do desenvolvimento de plantas é uma importante parte de vários modelos de simulação de culturas e uma ferramenta útil para o planejamento de práticas culturais (aplicação de fertilizantes, fungicidas, etc.) e seleção de genótipos. Estimativas mais precisas dos estágios de desenvolvimento das culturas baseados no tempo podem ser alcançadas se as influências ambientais sobre a cultura forem entendidas melhor (HAUN, 1973). A diferença na duração do ciclo de desenvolvimento é resultado de diferenças genótípicas em resposta a fatores ambientais que variam com a data de semeadura, local e estação do ano (KIRBY et al., 1999; JAME; CUTFORTH, 2004).

A temperatura e o fotoperíodo são os dois elementos meteorológicos que mais influenciam o desenvolvimento de plantas de trigo (LEVY; PETERSON, 1972; KIRBY, 1995; TAIZ, 2002; STRECK et al., 2003a,b; WHITE, 2006). Todo processo biológico, incluindo o desenvolvimento vegetal, responde à temperatura em função de três temperaturas cardinais: mínima, ótima e máxima (PORTER; GAWITH, 1999; YAN; HUNT, 1999).

O modelo de desenvolvimento WE (WANG; ENGEL, 1998) simula o desenvolvimento da planta considerando os efeitos não lineares da temperatura. A função de temperatura [f(T)] no modelo WE varia de zero a um e é descrita pela função beta de temperatura. A função beta de temperatura tem três coeficientes de significado biológico, as temperaturas cardinais mínima (TC_{min} , °C), ótima (TC_{ot} , °C) e máxima (TC_{max} , °C) para o desenvolvimento. Não há desenvolvimento quando a temperatura está abaixo da TC_{min} ou acima da TC_{max} , e o desenvolvimento é máximo quando a temperatura é igual a TC_{ot} . Outra característica é que o modelo WE é um modelo multiplicativo que utiliza fatores genéticos e

ambientais. Modelos de desenvolvimento multiplicativos parecem ser mais realistas sob o ponto de vista biológico, pois descrevem as interações existentes entre temperatura, fotoperíodo e vernalização em ambientes controlados e a campo (GONZÁLEZ et al., 2002).

Streck et al. (2003b) modificaram o modelo WE dividindo a fase vegetativa de emergência à antese (EM-AN) em duas sub-fases, emergência à espiguetta terminal (EM-ET) e da espiguetta terminal à antese (ET-AN), com diferentes temperaturas cardinais para cada sub-fase. Essas modificações melhoraram a simulação dos estágios de desenvolvimento em relação ao modelo WE original. O modelo WE ainda não foi usado para simular o desenvolvimento de trigos brasileiros, o que constituiu em incentivo para a realização deste trabalho.

Os valores de temperaturas cardinais são dependentes do estágio de desenvolvimento da planta (PORTER; GAWITH, 1999; STRECK et al., 2003b). Em trigo de inverno, Xue (2000) utilizou temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima de 0, 24 e 35°C para a fase vegetativa (emergência à antese) e 8, 29 e 40°C para a fase reprodutiva (antese à maturidade fisiológica), respectivamente, para simular os principais estágios de desenvolvimento de trigos de inverno usando o modelo WE (WANG; ENGEL, 1998). Na revisão de literatura de Porter; Gawith (1999) há algumas incertezas nos valores de temperaturas cardinais, sendo que as maiores inconsistências de valores estão nas temperaturas cardinais ótima (TC_{ot}) e máxima (TC_{max}). Normalmente, as incertezas nos valores estão expressas pelos sinais: maior do que ($>$) ou menor do que ($<$), sendo, portanto, valores inexatos. Outro motivo para a realização deste trabalho é que as temperaturas cardinais podem ser maiores para trigos de primavera do que para trigos de inverno, sendo os trigos brasileiros, em quase sua totalidade, considerados de primavera.

A temperatura diária é um dado de entrada para o cálculo da função de resposta a temperatura $[f(T)]$ no modelo WE (WANG; ENGEL, 1998). Assim, outro aspecto a ser considerado é que existem várias maneiras de incorporar a temperatura diária na $f(T)$. Quando se dispõem de valores diários de temperatura mínima (T_n) e máxima (T_x) ou valores horários de temperatura do ar pode se incorporar o efeito da temperatura sobre o desenvolvimento de duas maneiras: a) calculando a média aritmética das temperaturas mínimas e máximas ou das 24 leituras diárias primeiro e a função de temperatura $[f(T)]$ com esse valor médio (STRECK et al., 2007) e, b) calcular a $f(T)$ para cada valor de T_n e T_x ou das leituras das 24 horas diárias e a partir desses valores obter a média das $f(T)$ (XUE et al., 2004). Deve ser dada preferência pela segunda opção quando se utilizam funções não lineares (XUE et al., 2004), mas nos modelos de trigo e em batata a primeira opção tem sido usada (WANG; ENGEL,

1998; STRECK et al., 2003b; STRECK et al., 2007). Em modelos não lineares as temperaturas diárias aproximam-se das temperaturas cardinais em alguns momentos e, portanto a escolha da temperatura média muitas vezes não representa a realidade, ocasionando erros na simulação.

Quando não existe a observação horária de temperatura uma opção seria estimar valores diários de temperatura entre a T_n e a T_x . Cao; Moss (1997) usaram uma equação que estima seis valores intermediários de temperatura entre a T_n e T_x , compondo oito valores diários de temperatura, ou seja, valores de temperatura de três em três horas. No Brasil, a maioria das estações meteorológicas é convencional, sendo a maior parte dos dados disponíveis as temperaturas mínimas e máximas do ar. Existem no Brasil poucos locais com estações meteorológicas automáticas e, o banco de dados destas estações não é maior do que cinco anos. Assim, o cálculo da temperatura média ou $f(T)$ baseado na média de 24 leituras diárias de temperatura é de uso restrito para a maioria dos locais do Brasil.

Outro mecanismo importante na indução floral em algumas espécies é o fotoperiodismo. O fotoperiodismo é a capacidade que plantas têm em detectar o comprimento do dia, fazendo com que um determinado evento (florescimento) ocorra em uma determinada época do ano (TAIZ, 2002). Em geral, plantas de trigo são de dia longo, ou seja, aceleram seu desenvolvimento com o aumento do fotoperíodo levando a um encurtamento do ciclo até a floração (RIDDELL et al., 1958; CRAUFURD; CARTWRIGHT, 1989). A resposta ao fotoperíodo reflete no número final de folhas em trigos de primavera, sendo uma adaptação que aumenta a longevidade das plantas em dias curtos (BROOKING et al., 1995). Porém, alguns genótipos de trigo de inverno e primavera diferem na resposta quantitativa ao fotoperíodo (RIDDELL et al., 1958; BROOKING et al., 1995). Trigos de primavera e de inverno, com alta sensibilidade ao fotoperíodo, respondem da maneira similar ao fotoperíodo quando completamente vernalizados (BROOKING; JAMIESON, 2002).

A vernalização é um mecanismo de proteção da planta contra o efeito danoso das baixas temperaturas desenvolvido por alguns cereais de inverno. Denomina-se vernalização o processo onde sementes hidratadas ou plântulas, expostas a temperaturas baixas não congelantes, são induzidas a entrar na fase reprodutiva mais rapidamente quando comparadas com plantas que não foram expostas ao frio e assim diminuem o tempo (dias) para floração (FLOOD; HALLORAN, 1986; TAIZ, 2002). A resposta a vernalização deve ser incluída em modelos matemáticos de simulação do desenvolvimento do trigo e é importante na seleção de genótipos (STRECK et al., 2003a,b). Genótipos brasileiros de trigo podem responder a vernalização, assim funções não lineares de resposta a vernalização [$f(V)$] foram ajustadas

para alguns genótipos brasileiros de trigo (ver Capítulo 1). Portanto, é importante a inclusão de funções de resposta a vernalização em modelos de desenvolvimento para melhorar a estimativa das datas de ocorrência dos estágios de desenvolvimento do trigo.

A hipótese deste trabalho é que quando se calcula a $f(T)$ e a $f(V)$ com base na T_n e T_x diária ou pela estimativa de oito temperaturas diárias (CAO; MOSS, 1997), melhora-se a simulação dos estágios de desenvolvimento quando comparado com a $f(T)$ e $f(V)$ calculada com base na temperatura média diária do ar. O objetivo deste trabalho foi determinar a melhor função de temperatura [$f(T)$], fotoperíodo [$f(P)$] e vernalização [$f(V)$] para simular o desenvolvimento do trigo, adaptando o modelo WE (WANG; ENGEL, 1998) modificado por Streck et al. (2003b), usando diferentes combinações de temperaturas cardinais e diferentes maneiras de cálculo da $f(T)$ e $f(V)$.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram instalados experimentos em diferentes datas de semeadura durante três anos (2005, 2006 e 2007) no Departamento de Fitotecnia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS (29° 43' S, 53° 43' W e altitude de 95m). Em 2005 foram realizadas quatro datas de semeadura (24/06/2005, 04/08/2005, 07/09/2005 e 21/12/2005), em 2006 cinco datas de semeadura (06/02/2006, 21/03/2006, 12/05/2006, 04/09/2006 e 25/10/2006), e em 2007 apenas duas datas de semeadura (18/04/2007 e 06/06/2007). Estas datas de semeadura se situam antes, durante e após o período recomendado para a semeadura do trigo na região de Santa Maria, que é de 11/05 a 20/06 (REUNIÃO DA COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO, 2005). Os genótipos de trigo utilizados foram: CEP 51, CEP 52 e Nova Era, da Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa (FUNDACEP) e BRS Louro, BRS 177 e BRS Tarumã, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Esses genótipos são recomendados para o Rio Grande do Sul e foram selecionados por apresentarem ciclo de desenvolvimento distinto, variando de precoce (CEP 51 e BRS Louro) a tardio (Nova Era e BRS Tarumã) (REUNIÃO DA COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO, 2006). O genótipo BRS Tarumã é classificado como de duplo-propósito (WENDT et al., 2006), isto é, serve para a produção de

pastagens e de grãos.

A área experimental foi preparada de forma convencional, com gradagens. Na adubação de base se aplicou a formulação 5-20-20 na dose de 300 kg ha⁻¹, no sulco de semeadura, de acordo com a análise química do solo, seguindo as Recomendações de Adubação e Calagem para os Estados Do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, 2004). Foi realizada adubação nitrogenada em cobertura na quantidade de 80 Kg ha⁻¹ de nitrogênio parcelada, em duas épocas, a primeira no início do perfilhamento e a segunda no estágio de espiguetas terminal.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com seis tratamentos (genótipos) e quatro repetições. A densidade de semeadura foi de 330 sementes m⁻². Cada parcela foi constituída de quatro fileiras de plantas espaçadas a 0,20 m, com 2,40 m de comprimento e área de 1,92 m². Os tratos culturais, como controle de insetos, doenças e plantas invasoras, foram realizados sempre que necessários, de forma a evitar o estresse por estes fatores bióticos.

A emergência (EM) foi considerada quando 50% das plantas em 0,5 m de cada fileira da parcela estavam acima do nível do solo. A contagem do número de plantas foi feita diariamente até obter-se número constante de plantas emergidas. Uma semana após a emergência, seis plantas de trigo em cada parcela foram selecionadas ao acaso e marcadas com arame colorido, com a intenção de facilitar a sua visualização. As plantas selecionadas foram utilizadas para determinar os estágios de espiguetas terminal (ET), antese (AN) e maturidade fisiológica (MF). Coletaram-se, diariamente, duas plantas por parcela, as quais foram dessecadas e, com o auxílio de lupa, visualizado o estágio de ET baseado na descrição de Porter et al. (1987). A data de ocorrência da ET foi considerada quando 50% das plantas amostradas estavam neste estágio. A data de ocorrência da antese (AN) foi considerada quando 50% das plantas marcadas estavam com pelo menos uma flor aberta (ZADOKS et al., 1974). E o estágio de maturidade fisiológica (MF) foi considerado quando 50% das plantas marcadas estavam com 100% da folha bandeira amarelecida (STRECK et al., 2003b).

Os valores diários de temperatura mínima (Tn, °C) e máxima (Tx, °C) do ar foram coletados na Estação Climatológica Principal localizada na Universidade Federal de Santa Maria, pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia, localizada a aproximadamente 100 m da área experimental.

No modelo de desenvolvimento de Streck et al. (2003b) o ciclo de desenvolvimento EM-AN do modelo WE (WANG; ENGEL, 1998) é dividido em duas sub-fases (Figura 1): EM – ET (V1) e ET – AN (V2). A forma geral do modelo WE para a sub-fase EM–ET, é:

$$r = r_{\max,v1} \cdot f(T) \cdot f(P) \cdot f(V) \quad (1)$$

em que, $r_{\max,v1}$ é a taxa máxima durante a sub-fase EM-ET em condições ótimas de temperatura, fotoperíodo e vernalização, e $f(T)$, $f(P)$ e $f(V)$ são as funções de resposta à temperatura, fotoperíodo e vernalização, respectivamente, as quais variam de zero a um. Para a sub-fase ET-AN a $f(V)$ é desconsiderada pois não existe efeito significativo da vernalização no desenvolvimento da cultura durante esta sub-fase (SLAFER; RAWSON, 1994; GONZÁLEZ et al., 2002). Assim:

$$r = r_{\max,v2} \cdot f(T) \cdot f(P) \quad (2)$$

em que, $r_{\max,v2}$ é a taxa máxima de desenvolvimento durante a sub-fase ET-AN em condições ótimas de temperatura e fotoperíodo. Para a fase reprodutiva (AN-MF) somente a $f(T)$ é considerada:

$$r = r_{\max,r} \cdot f(T) \quad (3)$$

em que, $r_{\max,r}$ é a taxa máxima de desenvolvimento para a fase AN-MF, em condições ótimas de temperatura.

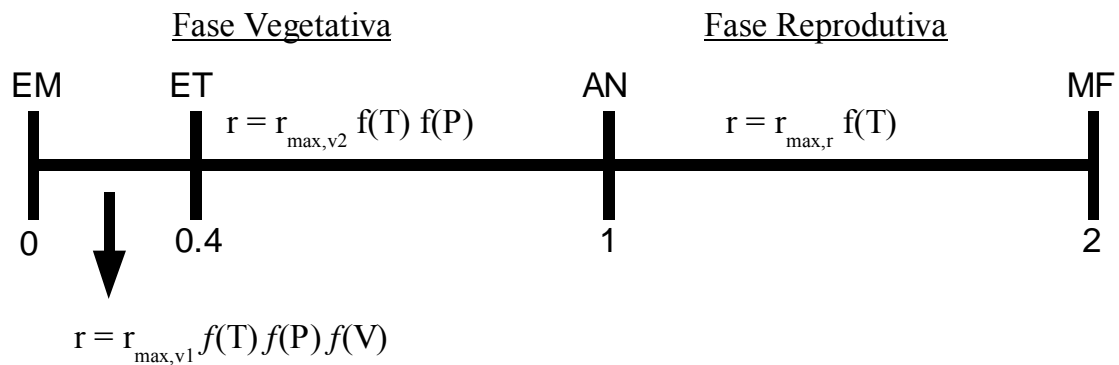


Figura 1 - Diagrama esquemático do modelo de WE modificado (STRECK et al., 2003b). Os estágios de desenvolvimento são EM = emergência, (0); ET = espiguetas terminal, (0,4); AN = antese, (1); MF = maturidade fisiológica, (2).

A $f(T)$ é calculada utilizando a função beta (STRECK et al., 2003b):

$$\begin{cases} f(T)=0, & T < TC_{\min} \\ f(T) = \frac{2(T - TC_{\min})^{\alpha} (TC_{ot} - TC_{\min})^{\alpha} - (T - TC_{\min})^{2\alpha}}{(TC_{ot} - TC_{\min})^{2\alpha}} & TC_{\min} \leq T \leq TC_{\max} \\ f(T)=0, & T > TC_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\ln 2}{\ln[(TC_{\max} - TC_{\min}) / (TC_{ot} - TC_{\min})]} \quad (5)$$

em que, TC_{\min} , TC_{ot} e TC_{\max} são as temperaturas cardinais (mínima, ótima e máxima) para o desenvolvimento, e T a temperatura do ar.

A $f(P)$ é calculada por:

$$f(P)=1-\exp[-\omega(P-P_c)] \quad (6)$$

em que, P é o fotoperíodo atual (h), P_c é o fotoperíodo crítico (h) abaixo do qual o desenvolvimento não ocorre, e ω é o coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo (h^{-1}).

A função de vernalização $f(V)$ é uma função de resposta não linear, que para trigos de inverno foi proposta por Streck et al. (2003a) como:

$$f(V)=\frac{(VD)^n}{(X_{0,5})^n+(VD)^n} \quad (7)$$

em que, VD são os dias efetivos de vernalização e os coeficientes $X_{0,5}$ e n são dependentes do genótipo (Tabela 1).

Tabela 1 - Valores dos coeficientes $X_{0,5}$ e n para cinco genótipos de trigo do sul do Brasil, usados neste trabalho, que apresentam resposta a vernalização (ver Capítulo 1), obtido com cultivo transplantado em 15/11/2006. Santa Maria, 2006-2007.

Genótipo	$X_{0,5}$	n
CEP 52	18,3	1,9
CEP 51	20,2	2,3
BRS 177	18,7	4,2
Nova Era	12,4	1,2
BRS Tarumã	22,5	5

O número de dias efetivos de vernalização (VD) é calculado pelo acúmulo da taxa diária de vernalização:

$$VD=\sum fvn \quad (8)$$

e a taxa diária de vernalização (fvn) é calculada pela função beta (STRECK et al., 2003a):

$$\begin{cases} fvn=0, & T < TC_{\min v} \\ fvn=\frac{2(T-TC_{\min v})^\alpha (TC_{otv}-T_{\min v})^\alpha - (T-TC_{\min v})^{2\alpha}}{(TC_{otv}-T_{\min v})^{2\alpha}} & TC_{\min v} \leq T \leq TC_{\max v} \\ fvn=0, & T > TC_{\max v} \end{cases} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{\ln 2}{\ln[(TC_{\max v} - TC_{\min v}) / (TC_{otv} - TC_{\min v})]} \quad (10)$$

em que, f_{vn} é a taxa diária de vernalização, T é a temperatura do ar e TC_{minv} , TC_{otv} e TC_{maxv} são as temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima de vernalização assumidos como - 1,3; 4,9 e 15,7°C, respectivamente (PORTER; GAWITH, 1999; STRECK et al., 2003a). A $f(V)$ foi desenvolvida para trigos de inverno, que na ausência de temperaturas vernalizantes, não atingem a fase reprodutiva. Porém, trigos de primavera, mesmo quando não submetidos a temperaturas vernalizantes durante seu ciclo de desenvolvimento, atingem a fase reprodutiva (KIRBY et al., 1999). Para representar matematicamente esta situação foi proposta a implementação da $f(V)$ na fase de EM-ET da seguinte maneira:

$$r = r_{max,vl} \cdot f(TV) \cdot f(P) \quad (11)$$

$$\begin{cases} f(TV) = f(T) \cdot [1 + f(V)], & f(TV) \leq 1 \\ f(TV) = 1, & f(TV) > 1 \end{cases} \quad (12)$$

em que, $f(TV)$ é a função resultante da interação entre a $f(T)$ e a $f(V)$, e substitui a $f(T)$ e a $f(V)$ na equação 1 para os genótipos de resposta intermediária a vernalização (BRS177, CEP 51, CEP 52 e Nova Era). A equação 11 possibilita que a simulação do desenvolvimento de plantas de trigos de primavera, atinja a fase reprodutiva, mesmo quando na simulação não ocorrerem temperaturas vernalizantes durante o seu ciclo de desenvolvimento e, quando submetidas a temperaturas vernalizantes elas sejam induzidas ao florescimento mais rapidamente. O genótipo BRS Louro não apresenta resposta a vernalização e assim não foi utilizada $f(V)$ no modelo de desenvolvimento. O genótipo BRS Tarumã apresenta características semelhantes a trigos de inverno não atingindo a fase reprodutiva quando não há temperaturas vernalizantes. Portanto, a $f(V)$ para este genótipo foi a mesma que a usada para trigos de inverno.

Para verificar se aumentos nas temperaturas cardinais ótima e máxima melhoram a estimativa dos parâmetros das funções de resposta e, conseqüentemente, a estimativa da data de ocorrência dos estágios de desenvolvimento sejam mais precisas, foram modificadas as temperaturas cardinais ótima e máxima para as sub-fases EM-ET, ET-AN e AN-MF utilizadas no modelo original (STRECK et al., 2003b). Devido os genótipos de trigo utilizados neste estudo serem trigos de primavera e aos desvios nos valores das temperaturas cardinais ótima e máxima no trabalho de Porter; Gawith (1999), decidiu-se aumentar a temperatura cardinal ótima (TC_{ot}) do modelo original (STRECK et al., 2003b) em 5, 6 e 6°C para as sub-fases de EM-ET, ET-AN e para fase de AN-MF, respectivamente, e a temperatura cardinal máxima (TC_{max}) do modelo original em 5°C para todas as fases do desenvolvimento da cultura do trigo (Tabela 2). As alterações nas temperaturas cardinais e nas combinações entre elas durante as fases do desenvolvimento resultaram em 27 tratamentos.

Tabela 2 - Diferentes combinações de temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima (TC_{min} , TC_{ot} e TC_{max}) para o desenvolvimento do trigo nas fases de emergência a espiguetta terminal (EM-ET), espiguetta terminal até antese (ET-AN) e antese até maturidade fisiológica (AN-MF) utilizadas para a estimativa dos coeficientes e teste do modelo WE para genótipos Sul-brasileiros de trigo, nos cultivos realizados em 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS.

Combinações de temperatura	Temperaturas Cardinais		
	TC_{min} (°C)	TC_{ot} (°C)	TC_{max} (°C)
	Sub-fase EM-ET		
$TC_{original}$	0	19	30
TC_{maxima}	0	19	35
$TC_{ot,max}$	0	24	35
	Sub-fase ET-AN		
$TC_{original}$	4	24	35
TC_{maxima}	4	24	40
$TC_{ot,max}$	4	30	40
	Fase AN-MF		
$TC_{original}$	8	24	35
TC_{maxima}	8	24	40
$TC_{ot,max}$	8	30	40

Para verificar qual maneira de entrada de temperatura do ar proporciona a melhor estimativa de coeficientes das funções de resposta do modelo WE e simulações mais precisas das datas de ocorrência dos estágios de desenvolvimento, foram considerados três métodos para calcular a $f(T)$ e a f_{vn} . No primeiro método a temperatura do ar (T) foi calculada pela média aritmética entre a temperatura mínima (T_n) e máxima (T_x) diária ($WE_{T_{media}}$) e essa temperatura foi utilizada para calcular a $f(T)$ e a f_{vn} . No segundo método ($WE_{T_{mm}}$) calculou-se a $f(T)$ e a f_{vn} para a temperatura mínima diária (T_n) e para a temperatura máxima diária (T_x) e após calculou-se a média dessas duas funções de temperatura. O terceiro método (WE_{TCM}) consistiu em calcular a $f(T)$ para oito valores de temperaturas (em intervalos de três horas) estimadas pelo método Manrique e Hodges descrito em Cao; Moss (1997) e após calculou-se a média das oito funções de temperatura. Este método estima oito valores diários de temperatura a partir das temperaturas máxima (T_x) e mínima (T_n) diárias através de:

$$T_{fac}(I) = 0,931 + (0,114 \times I) - (0,0703 \times I^2) + (0,0053 \times I^3) \text{ sendo } I = 1, \dots, 8 \quad (13)$$

$$T(I) = T_n + T_{fac}(I) \times (T_x - T_n) \quad (14)$$

em que, $T(I)$ corresponde a cada um dos oito valores de temperatura no período de um dia. A estimativa de oito temperaturas diárias $T(I)$ calculada pela equação 14 simula a não linearidade das temperaturas diárias quando comparado com a utilização da temperatura média diária do ar para o cálculo da $f(T)$ e f_vn (CAO; MOSS, 1997).

Os valores de $r_{\max,v1}$, $r_{\max,v2}$, $r_{\max,r}$, P_c e ω e são específicos para cada genótipo e foram ajustados, utilizando dados coletados à campo, processando-os no procedimento SAS-NLIN (SAS INSTITUTE INC., 2002) e utilizando o método Marquardt. Os coeficientes foram estimados para os genótipos usados neste estudo com dados obtidos em cinco datas de semeadura (06/02/2006, 21/03/2006, 12/05/2006, 04/09/2006 e 18/04/2007). Para a avaliação do modelo foram usadas seis datas de semeadura (24/06/2005, 04/08/2005, 07/09/2005, 21/12/2005, 25/10/2006 e 06/06/2007), que são dados independentes. Devido ao fato do genótipo BRS Tarumã completar o ciclo de desenvolvimento em poucas datas de semeadura, foram utilizadas quatro datas (21/03/2006, 12/05/2006, 18/04/2007 e 06/06/2007) para a estimativa dos coeficientes e seis datas de semeadura (24/06/2005, 04/08/2005, 07/09/2005, 21/12/2005, 06/02/2006 e 25/10/2006) para a avaliação dos modelos.

Quando não houve convergência pelo método Marquardt ou quando os coeficientes $r_{\max,v1}$ ou $r_{\max,v2}$, ω e P_c estimados não apresentavam significado biológico (coeficiente com significado biológico é a representação quantitativa de um processo biológico qual valor é dependente do genótipo e cujos dados podem ser mensurados num sistema real) para as sub-fases EM-ET ou ET-AN, foram realizadas duas maneiras para estimar os coeficientes: a) a primeira maneira consistiu em estimar os coeficientes $r_{\max,v1}$ e ω para a sub-fase EM-ET e os coeficientes $r_{\max,v2}$ e ω para a sub-fase ET-AN, com o P_c pré-definido em zero; b) a segunda maneira consistiu em utilizar os mesmos coeficientes ω e P_c da sub-fase ET-AN e estimar o coeficiente $r_{\max,v1}$ para a sub-fase EM-ET ($r_{\max,v1}$ com os mesmos coeficientes ω e P_c da sub-fase ET-AN) ou utilizar os mesmos coeficientes ω e P_c estimados para a sub-fase EM-ET na sub-fase ET-AN e estimar o coeficiente $r_{\max,v2}$ para a sub-fase EM-ET ($r_{\max,v2}$ com os mesmos coeficientes ω e P_c da sub-fase EM-ET).

A estatística utilizada para avaliar o desempenho dos modelos foi a raiz do quadrado médio do erro (RQME), calculada como (JANSSEN; HEUBERGER, 1995):

$$RQME = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - o_i)^2 \right]} \quad (15)$$

em que, “s” é o valor simulado, “o” é o valor observado e N é o número de observações. Quanto menor o RQME melhor o modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As várias datas de semeadura durante os três anos (2005, 2006 e 2007) de coleta de dados, utilizadas para estimativa dos coeficientes e avaliação das diferentes versões do modelo de desenvolvimento WE, possibilitaram que as plantas de trigo fossem submetidas a grande variação de temperatura e fotoperíodo nas diferentes fases do ciclo de desenvolvimento da planta. O cultivo de trigo fora da época recomendada resultou em plantas crescendo e se desenvolvendo em condições de temperaturas adversas como, por exemplo, a temperatura máxima diária de 38,6°C ocorrida em 08/01/2006 durante a sub-fase EM-ET na semeadura de 21/12/2005 e a temperatura mínima diária de -1,1°C ocorrida 29/07/2007, durante a sub-fase EM-ET na semeadura de 07/06/2007. Essas distintas condições ambientais em que as plantas de trigo estiveram expostas são importantes na estimativa dos coeficientes e avaliação de modelos de desenvolvimento.

As maiores dificuldades em obter convergência nos resultados pelo método Marquardt na estimativa dos coeficientes do modelo foram verificadas para os genótipos que apresentam ciclo de desenvolvimento de duração intermediária (CEP 51, CEP 52, BRS 177) principalmente quando foram utilizadas as temperaturas cardinais originais do modelo (Tabela 2). Para a sub-fase EM-ET foi possível a estimativa de coeficientes para pelo menos uma das combinações de temperaturas cardinais (Tabela 2) para cada um dos modelos utilizados ($WE_{T_{m\acute{e}dia}}$, $WE_{T_{mm}}$ e $WE_{T_{CM}}$). Para os genótipos BRS 177 e CEP 51 não foi possível estimar coeficientes $r_{max,v2}$, ω e P_c com significado biológico para a sub-fase ET-AN em nenhuma das combinações de temperaturas cardinais utilizadas (Tabelas 3, 4 e 5). Já os genótipos BRS Louro (precoce) e Nova Era (semi-tardio) apresentaram bons ajustes com a estimativa dos coeficientes $r_{max,v2}$, ω e P_c do modelo, convergindo pelo Método Marquardt e apresentando significado biológico na sub-fase ET-AN para qualquer uma das combinações de temperaturas cardinais nos diferentes métodos de calcular a $f(T)$. Foi possível estimar coeficientes para o genótipo BRS Tarumã na sub-fase ET-AN utilizando temperaturas

cardinais mínima, ótima e máxima de 4, 24 e 35°C (Tabelas 3, 4 e 5), respectivamente, propostas no modelo original (STRECK et al., 2003b).

Nas Tabelas 3, 4 e 5 é possível evidenciar que os valores estimados dos coeficientes é dependente do modelo utilizado ($WE_{T_{m\acute{e}dia}}$, $WE_{T_{mm}}$ e WE_{TCM}) das temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima utilizadas pelo modelo. Para a sub-fase EM-ET analisando-se os métodos de cálculo da $f(T)$ e f_{vn} , é possível observar um maior número de convergência de coeficientes para os modelo $WE_{T_{mm}}$ e WE_{TCM} quando comparados ao modelo $WE_{T_{m\acute{e}dia}}$. Sendo que, a maior freqüência de convergência de coeficientes na sub-fase EM-ET foi encontrada para as temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima de 0, 24 e 35°C ($TC_{ot,max}$), respectivamente, quando comparados as temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima de 0, 19 e 30°C ($TC_{original}$) e 0, 19 e 35°C (TC_{maxima}), respectivamente.

Os valores dos coeficientes $r_{max,v1}$, $r_{max,v2}$ e $r_{max,r}$, para os diferentes métodos ($WE_{T_{m\acute{e}dia}}$, $WE_{T_{mm}}$ e WE_{TCM}) e combinações de temperaturas cardinais ($TC_{original}$, TC_{maxima} e $TC_{ot,max}$) estão apresentados na Tabela 3. O maior $r_{max,v1}$ foi estimado para o genótipo BRS Tarumã (0,0291 dia⁻¹) com o modelo $WE_{T_{mm}}$ com temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima de 0, 19 e 30°C, respectivamente, e o menor valor de $r_{max,v1}$ foi estimado para o genótipo Nova Era (0,0091 dia⁻¹) com o modelo WE_{TCM} utilizando as temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima de 0, 24 e 35°C, respectivamente.

O maior valor de $r_{max,v2}$ foi estimado para o genótipo Nova Era (0,0510 dia⁻¹) calculado para o modelo $WE_{T_{mm}}$ utilizando temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima de 4, 24 e 40°C, respectivamente, e o menor valor de $r_{max,v2}$ foi estimado para o genótipo BRS Louro (0,0196 dia⁻¹) calculado para o modelo $WE_{T_{m\acute{e}dia}}$ utilizando temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima de 4, 24 e 40°C, respectivamente. Como pode ser observado na Tabela 3, o valor de $r_{max,v2}$ (ET-AN) é de duas a três vezes maior que o $r_{max,v1}$ (EM-ET).

Para a fase reprodutiva (AN-MF) o maior $r_{max,r}$ foi obtido para o genótipo BRS 177 (0,0671 dia⁻¹) calculado para o modelo $WE_{T_{mm}}$ e utilizando temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima de 8, 30 e 40°C ($TC_{ot,max}$), respectivamente. O menor valor de $r_{max,r}$ foi obtido para o genótipo BRS Louro (0,0249 dia⁻¹) calculado para o modelo $WE_{T_{mm}}$ utilizando temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima de 8, 24 e 40°C (TC_{max}), respectivamente.

Nas Tabelas 4 e 5 visualizam-se os coeficientes ω (índice de sensibilidade ao fotoperíodo, h⁻¹) e P_c (fotoperíodo crítico, h) ajustados para a $f(P)$. Os coeficientes ω e P_c foram maiores para a fase ET-AN quando comparados aos coeficientes ω e P_c ajustados para a fase EM-ET. O P_c variou de 7,5 a 10,5 h para a sub-fase de EM-ET e de 9,9 a 10,9 h para a sub-fase de ET-AN nos métodos que apresentaram convergência pelo método Marquardt.

Para os coeficientes estimados que não apresentaram convergência pelo método Marquardt, não foi possível estabelecer comparação, pois não possuem significado biológico ou o P_c foi pré-definido em zero para possibilitar o ajuste dos coeficientes.

Nos genótipos que apresentaram sensibilidade fraca a moderada a vernalização (CEP 52, BRS 177, CEP 51 e Nova Era), com a expectativa de tentar melhorar o ajuste dos coeficientes da $f(T)$ e $f(P)$, retirou-se a $f(V)$, já que a resposta se dá apenas pela aceleração na indução floral. Porém, com a retirada da $f(V)$ não foi possível ajustar os coeficientes para a sub-fase EM-ET, indicando que estes genótipos tem alguma resposta a vernalização, apesar de serem trigos de primavera.

Nas tabelas 6, 7 e 8, é possível observar os valores de RQME para os estágios de ET, AN e MF, respectivamente. Para os genótipos BRS Louro, BRS 177, CEP 51, CEP52 e Nova Era os modelos WE_{Tmm} e WE_{TCM} nas sub-fases de EM-ET e ET-AN com aumento nas temperaturas cardinais ótima e máxima ($TC_{ot,max}$) possibilitou um menor valor de RQME, fato não evidenciado integralmente para o modelo WE_{Tmedia} onde o menor valor de RQME ocorreu quando somente a temperatura cardinal máxima (TC_{maxima}) foi aumentada. Para a fase reprodutiva (AN-MF) o aumento nas temperaturas cardinais ótima e máxima ($TC_{ot,max}$) resultou nos menores valores de RQME para quase todos os genótipos, exceto para o genótipo BRS Tarumã, em que só foi possível a estimativa dos coeficientes utilizando-se as temperaturas cardinais originais ($TC_{original}$), demonstrando uma maior exigência em frio para este genótipo.

Tabela 3 - Valores estimados dos coeficientes $r_{\max,v1}$, $r_{\max,v2}$ e $r_{\max,r}$ do modelo WE usando-se as diferentes combinações de temperaturas cardinais (TC_{original} , TC_{maxima} , $TC_{\text{ot,max}}$) e diferentes métodos de cálculo da $f(T)$ e f_{vn} ($WE_{T\text{média}}$, $WE_{T\text{mm}}$ e WE_{TCM}) para seis genótipos de trigo, determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. TC_{original} = Temperaturas cardinais do modelo original, TC_{maxima} = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura máxima, $TC_{\text{ot,max}}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura ótima e máxima (Para valores de temperaturas cardinais consultar Tabela 2).

Genótipo	$WE_{T\text{média}}$			$WE_{T\text{mm}}$			WE_{TCM}		
	TC_{original}	TC_{maxima}	$TC_{\text{ot,max}}$	TC_{original}	TC_{maxima}	$TC_{\text{ot,max}}$	TC_{original}	TC_{maxima}	$TC_{\text{ot,max}}$
$r_{\max,v1}$									
BRS Louro	0,0139	0,0112	0,0116	0,0181	0,0135	0,014	0,0169	0,0123	0,0125
CEP 52	0,0960†‡	0,0128	0,0110†	0,0437†	0,0189	0,0137	0,0810†‡	0,0151	0,0115
CEP 51	0,0610†‡	0,0760†‡	0,0110†	0,0911†‡	0,0910†‡	0,0160†	0,0614†‡	0,0710†‡	0,0110†
BRS 177	0,0560†‡	0,0760†‡	0,0110†	0,0965†‡	0,0960†‡	0,0134	0,0760†‡	0,0960†‡	0,0111
Nova Era	0,0509†‡	0,0260*	0,0110†	0,0174	0,0710†‡	0,0104	0,0942†‡	0,0460†‡	0,00912
BRS Tarumã	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡
$r_{\max,v2}$									
BRS Louro	0,0258	0,0249	0,0354	0,0319	0,0282	0,0384	0,0283	0,0263	0,0365
CEP 52	0,0810†‡	0,0810†‡	0,0310†	0,0710†‡	0,0860†‡	0,0360†	0,0660†‡	0,0910†‡	0,0310†‡
CEP 51	0,0860†‡	0,0910†‡	0,0960†‡	0,0960†‡	0,0910†‡	0,0860†‡	0,0860†‡	0,0910†‡	0,0710†‡
BRS 177	0,0860†‡	0,0910†‡	0,0960†‡	0,0960†‡	0,0960†‡	0,0960†‡	0,0960†‡	0,0960†‡	0,0910†‡
Nova Era	0,0246	0,0256	0,0324	0,0344	0,0305	0,0354	0,0283	0,0278	0,0332
BRS Tarumã	0,0256	†‡	†‡	0,0327	†‡	†‡	0,028	†‡	†‡
$r_{\max,r}$									
BRS Louro	0,0322	0,0283	0,0628	0,0358	0,0317	0,0547	0,0336	0,0249	0,0577
CEP 52	0,0389	0,0343	0,0703	0,0432	0,0382	0,0632	0,0404	0,0358	0,0657
CEP 51	0,0332	0,0294	0,0597	0,0374	0,033	0,0549	0,0348	0,0308	0,0565
BRS 177	0,0424	0,0389	0,0637	0,0508	0,0441	0,0671	0,0459	0,0411	0,0647
Nova Era	0,0373	0,0334	0,0656	0,0423	0,0375	0,0615	0,0392	0,035	0,0627
BRS Tarumã	0,0379	0,0361	0,0579	0,0459	0,0408	0,0463	0,0412	0,0381	0,0572

Continua...

...

$r_{\max,v1}$ com os mesmos coeficientes ω e P_c da sub-fase ET-AN									
BRS Louro	0,0129	0,0117	0,011	0,0174	0,0139	0,016	0,0152	0,0151	0,0132
CEP 52	†‡	†‡	0,0110*	†‡	†‡	0,0145*	†‡	†‡	0,0117†
CEP 51	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡
BRS 177	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡
Nova Era	0,0112	0,0121	0,0093	0,0155	0,0142	0,011	0,013	0,0131	0,00996
BRS Tarumã	0,0213	†‡	†‡	0,0291	†‡	†‡	0,0241	†‡	†‡
$r_{\max,v2}$ com os mesmos coeficientes ω e P_c da sub-fase EM-ET									
BRS Louro	0,026	0,0196	0,0339†	0,031	0,0226	0,0373†	0,0294	0,0289	0,0410†
CEP 52	†‡	0,026	0,0310†	†‡	0,031	0,036	†‡	0,026	0,031
CEP 51	†‡	†‡	0,0360†	†‡	†‡	0,0425†	†‡	†‡	0,0321
BRS 177	†‡	†‡	0,0310†	†‡	†‡	0,031	†‡	†‡	0,026
Nova Era	†‡	0,0510*	0,0360†	0,036	†‡	0,031	†‡	†‡	0,0311
BRS Tarumã	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡

†Não houve convergência nos resultados da análise estatística.

‡Coeficientes estimados não possuem significado biológico.

Tabela 4 - Valores estimados do coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo (ω , h^{-1}) da função de fotoperíodo do modelo de desenvolvimento de WE usando-se as diferentes combinações de temperaturas cardinais ($TC_{original}$, TC_{maxima} e $TC_{ot,max}$) e diferentes métodos de cálculo da $f(T)$ e f_{vn} ($WE_{Tm\acute{e}dia}$, WE_{Tmm} e WE_{TCM}) para seis genótipos de trigo para as sub-fases de emergência a espiguetta terminal (EM-ET) e espiguetta terminal a antese (ET-AN), determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. $TC_{original}$ = Temperaturas cardinais do modelo original, $TC_{m\acute{a}xima}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura máxima, $TC_{ot,max}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura ótica e máxima (Para valores de temperaturas cardinais consultar Tabela 2).

Genótipo	$WE_{Tm\acute{e}dia}$			WE_{Tmm}			WE_{TCM}		
	$TC_{original}$	TC_{maxima}	$TC_{ot,max}$	$TC_{original}$	TC_{maxima}	$TC_{ot,max}$	$TC_{original}$	TC_{maxima}	$TC_{ot,max}$
Sub-fase EM-ET									
BRS Louro	0,4600	1,0638	0,6300†	0,6475	0,9239	0,1760†	0,4288	0,9556	0,1310†
CEP 52	0,0210†‡	0,4034†	0,3010†	0,1035	0,2503	0,7054	0,0360†‡	0,3355	1,1398
CEP 51	0,0210†‡	0,0110†‡	0,3110†	0,0260†‡	0,0160†‡	0,1160†	0,0312†‡	0,0160†‡	0,6110†
BRS 177	0,0310†‡	0,0160†‡	0,2460†	0,0311†‡	0,0210†‡	0,6200	0,0260†‡	0,0160†‡	1,0666
Nova Era	0,0210†‡	0,0310†	0,1360†	0,2216	0,0160†‡	0,5818	0,0153†‡	0,0210†‡	5,9510
BRS Tarumã	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡	†‡
Sub-fase ET-AN									
BRS Louro	2,6586	3,0628	2,2610	2,6851	2,9186	2,5900	2,6869	3,0057	2,4330
CEP 52	0,0210†‡	0,0260†‡	0,3810†	0,0410†‡	0,0310†‡	0,1410†	0,031†‡	0,0260†‡	0,2560†
CEP 51	0,0360†‡	0,0410†‡	0,0360†‡	0,0510†‡	0,0510†‡	0,0510†‡	0,0460†‡	0,0460†‡	0,0510†‡
BRS 177	0,0560†‡	0,0560†‡	0,0560†‡	0,0660†‡	0,0612†‡	0,0710†‡	0,0560†‡	0,0560†‡	0,0660†‡
Nova Era	0,9130	0,5661	3,2784	0,5060	0,4775	1,3902	0,6802	0,5140	2,1699
BRS Tarumã	2,4347	†‡	†‡	0,8843	†‡	†‡	1,5302	†‡	†‡

†Não houve convergência nos resultados da análise estatística.

‡Coeficientes estimados não possuem significado biológico.

Tabela 5 - Valores estimados do fotoperíodo crítico (Pc, h) da função de fotoperíodo do modelo de desenvolvimento de WE usando diferentes combinações de temperaturas cardinais (TC_{original}, TC_{máxima}, TC_{ót,max}) e diferentes métodos de cálculo da f(T) e fvn (WE_{Tmédia}, WE_{Tmm} e WE_{TCM}) para seis genótipos de trigo para as sub-fases de emergência a espiguetas terminal (EM-ET) e espiguetas terminal a antese (ET-AN), determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. TC_{original} = Temperaturas cardinais do modelo original, TC_{máxima} = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura máxima, TC_{ót,max} = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura ótima e máxima (Para valores de temperaturas cardinais consultar Tabela 2).

Genótipo	WE _{Tmédia}			WE _{Tmm}			WE _{TCM}		
	TC _{original}	TC _{máxima}	TC _{ót,max}	TC _{original}	TC _{máxima}	TC _{ót,max}	TC _{original}	TC _{máxima}	TC _{ót,max}
Sub-fase EM-ET									
BRS Louro	8,1330	9,0737	0†	9,3917	9,3016	0†	8,6065	9,1830	0†
CEP 52	6,6266†‡	8,5890	0†	8,8405	8,7663	9,0603	7,8793†‡	8,7823	8,7124
CEP 51	3,4072†‡	0†‡	0†	6,6292†‡	4,4052†‡	0†	5,7467†‡	2,6699†‡	0†
BRS 177	5,7118†‡	3,9906†‡	0†	7,8280†‡	6,6655†‡	8,5734	5,9727†‡	5,4445†‡	7,63
Nova Era	3,1964†‡	0†	0†	8,2879	3,8445†‡	7,8122	5,4378†‡	2,4224†‡	10,4667
Sub-fase ET-AN									
BRS Louro	10,8275	10,9748	10,1743	10,9471	10,9893	10,7152	10,8937	10,9839	10,5275
CEP 52	0†‡	3,4685†‡	0†	3,5140†‡	4,3463†‡	0†	1,1383†‡	3,9727†‡	0†
CEP 51	4,4694†‡	6,4729†‡	0†	6,5053†‡	6,9840†‡	2,7993†‡	5,5918†‡	6,7428†‡	0†‡
BRS 177	8,0921†‡	8,6963†‡	5,8112†‡	8,6469†‡	8,8044†‡	7,3822†‡	8,3810†‡	8,7561†‡	6,7138†‡
Nova Era	10,2253	9,9986	10,6933	9,9559	9,924	10,3755	10,0825	9,9522	10,5682

†Não houve convergência nos resultados da análise estatística.

‡Coeficientes estimados não possuem significado biológico.

Tabela 6 - Valores de Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME, dias) para estimativa da data de espiguetas terminal de seis genótipos de trigo com o modelo de desenvolvimento de WE usando diferentes combinações de temperaturas cardinais ($TC_{original}$, TC_{maxima} , e $TC_{ot,max}$) e diferentes métodos de cálculo da $f(T)$ e f_{vn} ($WE_{Tmédia}$, WE_{Tmm} e WE_{TCM}) para as sub-fases de emergência a espiguetas terminal (EM-ET) e espiguetas terminal a antese (ET-AN), determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. $TC_{original}$ = Temperaturas cardinais do modelo original, $TC_{máxima}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura máxima, $TC_{ot,max}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura ótima e máxima (Para valores de temperaturas cardinais consultar Tabela 2).

Genótipo	$WE_{Tmédia}$			WE_{Tmm}			WE_{TCM}		
	$TC_{original}$	TC_{maxima}	$TC_{ot,max}$	$TC_{original}$	$TC_{máxima}$	$TC_{ot,max}$	$TC_{original}$	TC_{maxima}	$TC_{ot,max}$
BRS Louro	10,6	8,6	10,2	7,8	8,3	6,3	8,3	8,4	5,8
BRS 177	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEP 51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEP52	-	-	5,6	-	-	3,7	-	-	5,0
Nova Era	-	2,4	4,9	3,9	-	1,9	-	-	3,5
BRS Tarumã	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Com os mesmos coeficientes ω e P_c da sub-fase ET-AN									
BRS Louro	11,1	10,0	11,5	9,6	10,0	6,3	10,0	7,6	8,3
BRS 177	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEP 51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEP52	-	-	5,6	-	-	5,6	-	-	5,2
Nova Era	3,5	5,1	4,0	5,2	6,3	1,2	4,2	5,5	1,7
BRS Tarumã	-	-	-	7,3	-	-	26,2	-	-

Tabela 7 - Valores de Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME, dias) para estimativa da data de antese (AN) de seis genótipos de trigo com o modelo de desenvolvimento de WE usando diferentes combinações de temperaturas cardinais ($TC_{original}$, TC_{max} , $TC_{ot,max}$) e diferentes métodos de cálculo da $f(T)$ e f_vn ($WE_{Tmédia}$, WE_{Tmm} e WE_{TCM}) para as sub-fases de emergência a espiguetas terminal (EM-ET) e espiguetas terminal a antese (ET-AN), determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. $TC_{original}$ = Temperaturas cardinais do modelo original, $TC_{máxima}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura máxima, $TC_{ot,max}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura ótima e máxima (Para valores de temperaturas cardinais consultar Tabela 2).

Genótipo	Fase ET-AN								
	$WE_{Tmédia}$			WE_{Tmm}			WE_{TCM}		
	$TC_{original}$	TC_{maxima}	$TC_{ot,max}$	$TC_{original}$	TC_{maxima}	$TC_{ot,max}$	$TC_{original}$	TC_{maxima}	$TC_{ot,max}$
BRS Louro	9,3	8,7	8,9	8,5	8,6	3,9	8,1	8,7	4,4
BRS 177	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEP 51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEP52	-	-	11,4	-	-	11,7	-	-	12,0
Nova Era	-	4,6	5,7	5,3	-	4,2	-	-	5,6
BRS Tarumã	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Com os mesmos coeficientes ω e P_c da sub-fase ET-AN									
BRS Louro	9,4	7,5	9,8	9,0	8,0	3,2	9,1	6,7	5,8
BRS 177	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEP 51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEP52	-	-	11,4	-	-	12,5	-	-	11,9
Nova Era	5,3	2,5	5,5	5,7	3,9	3,5	5,5	3,2	4,2
BRS Tarumã	-	-	-	4,6	-	-	20,1	-	-
Com os mesmos coeficientes ω e P_c da sub-fase EM-ET									
BRS Louro	9,3	11,8	9,9	8,7	11,4	6,8	5,9	8,4	6,8
BRS 177	-	-	8,1	-	-	10,3	-	-	13,9
CEP 51	-	-	3,4	-	-	5,1	-	-	6,7
CEP52	-	7,0	12,0	-	9,7	7,9	-	19	11,0
Nova Era	-	-	4,9	5,3	-	8,2	-	-	7,4
BRS Tarumã	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 8 - Valores de Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME, dias) para estimativa da data de maturidade fisiológica (MF) de seis genótipos de trigo com o modelo de desenvolvimento de WE usando diferentes combinações de temperaturas cardinais ($TC_{original}$, $TC_{máxima}$ e $TC_{ot,max}$) e diferentes métodos de cálculo da $f(T)$ e f_{vn} ($WE_{Tmédia}$, WE_{Tmm} e WE_{TCM}) para as sub-fases de emergência a espiguetas terminal (EM-ET) e espiguetas terminal a antese (ET-AN), determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS. $TC_{original}$ = Temperaturas cardinais do modelo original, $TC_{máxima}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura máxima, $TC_{ot,max}$ = Temperaturas cardinais com aumento na temperatura ótima e máxima (Para valores de temperaturas cardinais consultar Tabela 2).

Genótipo	$WE_{Tmédia}$			WE_{Tmm}			WE_{TCM}		
	$TC_{original}$	$TC_{máxima}$	$TC_{ot,max}$	$TC_{original}$	$TC_{máxima}$	$TC_{ot,max}$	$TC_{original}$	$TC_{máxima}$	$TC_{ot,max}$
BRS Louro	15,8	16,5	9,2	17,4	17,6	10,5	16,0	17,2	8,6
BRS 177	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEP 51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEP52	-	-	9,8	-	-	15,1	-	-	12,4
Nova Era	-	10,2	6,1	8,8	-	8,3	-	-	6,9
BRS Tarumã	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Com os mesmos coeficientes ω e P_c da sub-fase ET-AN									
BRS Louro	16,7	13,6	9,6	17,5	17,4	9,6	16,4	12,9	9,6
BRS 177	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEP 51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEP52	-	-	9,8	-	-	15,9	-	-	12,6
Nova Era	5,5	7,8	6,4	6,9	7,4	7,2	6,5	7,8	6,7
BRS Tarumã	-	-	-	9,6	-	-	50,4	-	-
Com os mesmos coeficientes ω e P_c da sub-fase ET-AN									
BRS Louro	17,3	22,0	9,9	19,1	22,8	13,2	17,7	15,9	9,9
BRS 177	-	-	12,0	-	-	15,8	-	-	17,5
CEP 51	-	-	6,2	-	-	10,4	-	-	11,7
CEP52	-	14,4	10,4	-	18,5	12	-	26,5	11,7
Nova Era	-	-	1,1	12,7	-	12	-	-	8,4
BRS Tarumã	-	-	-	-	-	-	-	-	-

A Figura 2 apresenta os valores observados e simulados de ET, AN e MF com o melhor método de cálculo da $f(T)$ e $f(v_n)$ e as melhores combinações de temperaturas cardinais para cada genótipo. As melhores simulações são com o uso do modelo de WE com a mesma função de fotoperíodo para as sub-fases (EM-ET e ET-AN) durante a fase vegetativa do desenvolvimento do trigo. O modelo $WE_{T_{mm}}$ é o que apresentou os melhores resultados para a maioria dos genótipos e, para os genótipos em que o modelo $WE_{T_{média}}$ foi considerado melhor (BRS 177 e CEP 51) pode-se usar o modelo $WE_{T_{mm}}$ sem que hajam perdas consideráveis na precisão da estimativa (1, 2 e 4 dias nos estágios de ET, AN e MF, respectivamente). Os valores de RQME variaram de 1,2 (Nova Era) a 7,3 dias (BRS Tarumã) para o estágio de espiguetas terminal (ET), de 3,5 (BRS Louro) a 8,1 dias (BRS 177) para o estágio de antese e, de 6,3 (CEP 52) a 11,9 dias (BRS 177) para o estágio de MF. Com exceção do genótipo BRS Tarumã, aumentos nas temperaturas cardinais ótima e máxima ($TC_{ot,max}$) melhoraram a estimativa dos modelos.

Valores de $r_{max,v1}$ entre 0,0104 e 0,0291 dia^{-1} e $r_{max,v2}$ entre 0,0226 e 0,0510 dia^{-1} (Tabela 3) são próximos àqueles encontrados na literatura para trigos de inverno. Streck et al. (2003b) estimaram valores de $r_{max,v1}$ de 0,0198 dia^{-1} para o genótipo Arapahoe e 0,0241 dia^{-1} para o genótipo Karl 92 e valores de $r_{max,v2}$ de 0,0489 dia^{-1} e 0,0241 dia^{-1} para os genótipos Arapahoe e Karl 92, respectivamente. Valores de $r_{max,r}$ entre 0,0283 e 0,0703 dia^{-1} são valores próximos àqueles estimados por Streck et al. (2003b) para os genótipos Arapahoe e Karl 92 (0,0381 dia^{-1}). Estes valores confirmam que foi possível estimar coeficientes com significado biológico pelo método Marquardt para os genótipos brasileiros de trigo utilizados neste estudo, o que é uma contribuição relevante.

Os valores de ω (coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo) se apresentaram entre 0,1 e 3,3 h^{-1} , e na maioria das vezes foram superiores aos encontrados por Streck et al. (2003b) para os genótipos de trigo de inverno Arapahoe (0,34 h^{-1}) e Karl 92 (0,16 h^{-1}). Já os valores de fotoperíodo crítico (P_c) entre 7,5 e 11 h estimados para genótipos de trigo brasileiros são semelhantes aos valores estimados por Streck et al. (2003b) para os genótipos de trigo de inverno Arapahoe (9,5 h) e Karl 92 (7,0 h). Isto pode ser um indicativo de que os genótipos brasileiros usados neste trabalho apresentam sensibilidade ao fotoperíodo igual ou superior aos genótipos de trigo de inverno. Tentativas de realização de ajuste dos coeficientes para o modelo WE sem a $f(P)$ foram realizadas, porém não foi possível estimar os coeficientes para os genótipos usados neste estudo. Nos casos em que foi possível estimar os coeficientes, os resultados do teste do modelo não foram bons, apresentando elevados valores de RQME. Como exemplo, quando se excluiu a $f(P)$ durante a fase vegetativa, para o genótipo BRS

Louro, o melhor método sem $f(P)$ (WE_{TCM} e $TC_{ot,max}$) apresentou valores de RQME de 11,1; 11,7 e 14,4 dias, para os estágios de ET, AN e MF, respectivamente. Estes valores são bem superiores àqueles obtidos com o melhor método que utiliza a $f(P)$ (WE_{Tmm} e $TC_{ot,max}$), onde os valores de RQME foram 6,9; 3,5 e 9,6 dias, para os estágios ET, AN e MF, respectivamente.

No estudo em discussão, o método de WE_{Tmm} apresentou os menores valores de RQME, confirmando a hipótese de que melhora-se a simulação dos estágios de desenvolvimento utilizando o modelo WE_{Tmm} quando comparado com a $f(T)$ e $f(V)$ calculada com base na temperatura média diária do ar (WE_{Tmedia}).

Foram observados valores de RQME variando de 1,2 a 12,0 dias (Tabela 9), que são próximos aos valores de RQME encontrados por Streck et al. (2003b) para trigos de inverno. Porém, cabe ressaltar que as condições de temperatura deste trabalho aos quais os genótipos de trigo foram submetidos, em algumas datas de semeadura (semeaduras de primavera e verão), são completamente desfavoráveis quando comparadas a datas de semeadura situadas dentro da época recomendada. Este fato demonstra que os melhores modelos, apresentados na Figura 2, são apropriados para serem usados na simulação do desenvolvimento do trigo em situações diferentes das atuais, como por exemplo, em cenários de mudança climática que consideram aumento na temperatura, principalmente o modelo WE_{Tmm} , que possibilita o cálculo das funções de temperatura para a T_n e T_x independentemente, possibilitando a simulação do desenvolvimento do trigo com aumentos assimétricos nas T_n e T_x , condição esperada nos cenários projetados para o final deste século (IPCC, 2007).

Como verificado nas Tabelas 6, 7 e 8 e na Figura 2, aumentos nas temperaturas cardinais ótima e máxima ($TC_{ot,max}$) possibilitaram uma melhora na estimativa das datas de ocorrência dos estágios de desenvolvimento. Isto pode ser explicado pelo fato de que trigos de primavera são mais adaptados as condições de temperatura mais elevada do que os trigos de inverno, o que fica mais evidente quando se compara o genótipo BRS Tarumã com os demais usados neste estudo.

O genótipo BRS Tarumã é o que necessita de maior exposição ao frio (vernalização), principalmente, durante a sub-fase de EM-ET entre os usados e, só foi possível estimar os coeficientes do modelo para a sub-fase ET-AN utilizando as temperaturas cardinais do modelo original (temperaturas cardinais para trigos de inverno).

Tabela 9 - Valores dos coeficientes $r_{\max,v1}$ (dia^{-1}), $r_{\max,v2}$ (dia^{-1}), $r_{\max,r}$ (dia^{-1}), ω (h^{-1}), Pc (h), temperaturas cardinais (TC_{\min} , TC_{ot} e TC_{\max}) para seis genótipos de trigo com as melhores combinações de métodos de cálculo de $f(T)$ e f_{vn} (WE_{Tmedia} , WE_{Tmm} e WE_{TCM}) nas sub-fases de emergência a espiguetas terminal (EM-ET) e espiguetas terminal a antese (ET-AN) e na fase de antese a maturidade fisiológica (AN-MF), determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS.

	Genótipo					
	BRS Louro	CEP 52	CEP 51	BRS 177	Nova Era	BRS Tarumã
Sub-fase EM-ET						
Método de cálculo de $f(T)$ e f_{vn}	WE_{Tmm}	WE_{Tmm}	WE_{Tmedia}	WE_{Tmedia}	WE_{Tmm}	WE_{Tmm}
$r_{\max,v1}$ (dia^{-1})	0,0160	0,0128	0,0110	0,0110	0,0110	0,0291
ω (h^{-1})	2,5900	0,4034	0,3110	0,2460	1,3902	0,8843
Pc (h)	10,7152	8,5890	0	0	10,3755	10,0446
TC_{\min} ($^{\circ}\text{C}$)	0	0	0	0	0	0
TC_{ot} ($^{\circ}\text{C}$)	24	19	24	24	24	19
TC_{\max} ($^{\circ}\text{C}$)	35	35	35	35	35	30
Sub-fase ET-AN						
Método de cálculo de $f(T)$ e f_{vn}	WE_{Tmm}	WE_{Tmm}	WE_{Tmedia}	WE_{Tmedia}	WE_{Tmm}	WE_{Tmm}
$r_{\max,v2}$ (dia^{-1})	0,0384	0,0260	0,0310	0,0310	0,0354	0,0327
ω (h^{-1})	2,5900	0,4034	0,3110	0,2460	1,3902	0,8843
Pc (h)	10,7152	8,589	0	0	10,3755	10,0446
TC_{\min} ($^{\circ}\text{C}$)	4	4	4	4	4	4
TC_{ot} ($^{\circ}\text{C}$)	30	24	30	30	30	24
TC_{\max} ($^{\circ}\text{C}$)	40	40	40	40	40	35
Fase AN-MF						
Método de cálculo de $f(T)$ e f_{vn}	WE_{Tmm}	WE_{Tmm}	WE_{Tmedia}	WE_{Tmedia}	WE_{Tmm}	WE_{Tmm}
$r_{\max,r}$ (dia^{-1})	0,0547	0,0637	0,0597	0,0637	0,0615	0,0459
TC_{\min} ($^{\circ}\text{C}$)	8	8	8	8	8	8
TC_{ot} ($^{\circ}\text{C}$)	30	30	30	30	30	24
TC_{\max} ($^{\circ}\text{C}$)	40	40	40	40	40	35

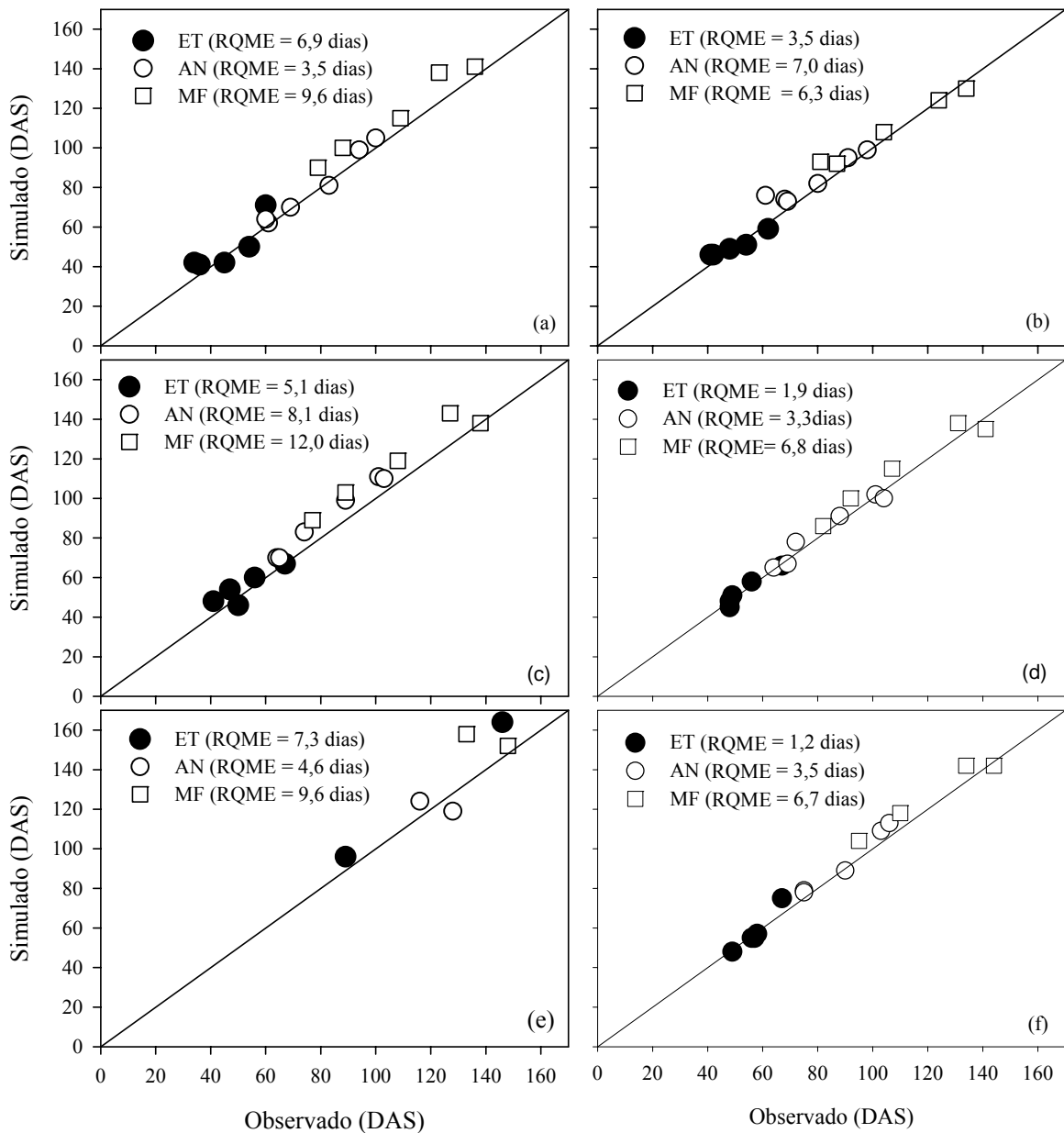


Figura 2 - Dias após a semeadura (DAS) observados vs. simulados até espiguetas terminal (ET), antese (AN) e maturidade fisiológica (MF) para os genótipos (a) BRS Louro, (b) CEP 52, (c) BRS 177, (d) CEP 51, (e) BRS Tarumã e (f) Nova Era, em seis datas de semeadura, com as melhores combinações de métodos de cálculo de $f(T)$ e f_{vn} , e com as temperaturas cardinais mais adequadas para cada genótipo (Tabela 9), determinados nos anos de 2005, 2006 e 2007. Santa Maria, RS.

Na Figura 2e observa-se que há somente dois valores para cada estágio de desenvolvimento. Isto se deve ao fato de que, das datas de semeadura selecionadas para a avaliação do modelo, só três atingiram a antese e duas a maturidade fisiológica, sendo que em uma destas datas não foi realizada a determinação da data de ocorrência da espiguetas terminal.

Já para os outros genótipos (BRS Louro, BRS 177, CEP 51, CEP 52 e Nova Era) o melhor desempenho dos modelos foi obtido com as temperaturas cardinais mais elevadas ($TC_{ot,max}$).

Em geral, semeaduras realizadas após a época recomendada, foram as que apresentaram as maiores diferenças entre os dados observados e simulados de datas de ocorrência dos estágios de desenvolvimento. Nestas datas, o modelo WE superestima os valores observados, indicando que o modelo foi mais lento ao simular a taxa de desenvolvimento.

A semeadura realizada no dia 26/10/2005 não foi utilizada para avaliação dos métodos neste trabalho, pois as datas de ocorrência dos estágios de desenvolvimento foi mais antecipada quando comparada a simulada pelo modelo WE em todas os genótipos usados neste trabalho. Por exemplo, para o genótipo Novo Era houve uma antecipação em 16, 21 e 22 dias, para os estágios de ET, AN e MF, respectivamente, quando se comparam os dados observados com os simulados. A precipitação acumulada da semeadura a maturidade fisiológica nesta data de semeadura foi de apenas 187,6 mm, sendo que quase metade desta precipitação ocorreu em um único evento nos dias 5 e 6 de dezembro de 2005 (82,7mm), indicando que houve uma baixa frequência de chuva. Além disso, a média das temperaturas máximas (T_x), durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, foi de 29,5°C, indicando alta evapotranspiração durante os horários mais quentes do dia. As datas de ocorrência dos estágios de desenvolvimento observados, que ocorreram antecipadamente aos simulados nesta data de cultivo, indicam que outro fator ambiental, além da temperatura e fotoperíodo, contribuiu para acelerar o ciclo de desenvolvimento da cultura no campo. Uma possível explicação para estes resultados é a de déficit hídrico no solo, uma vez que a precipitação foi baixa e mal distribuída e ocorreram altas temperaturas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

O déficit hídrico promove o fechamento estomático e conseqüentemente, a diminuição da transpiração, o que leva a um aumento da temperatura da folha e do dossel vegetal, principalmente durante a fase vegetativa (SIDDIQUE et al., 2000). Em trigo, Ehrler et al. (1998) constataram uma elevação de temperatura de até 9°C do dossel em relação à temperatura do ar em plantas submetidas a déficit hídrico. A maior temperatura do dossel vegetal pode ter acelerado o desenvolvimento das plantas, sendo que esse efeito não foi capturado pelo modelo. Assim, o aumento na taxa de desenvolvimento pode ter resultado do aumento de temperatura em plantas submetidas a déficit hídrico (SIDDIQUE et al., 2000).

CONCLUSÕES

O modelo WE modificado por Streck et al. (2003) simula melhor o desenvolvimento do trigo quando são usadas as temperaturas mínimas e máximas diárias para calcular as funções de resposta a temperatura ($WE_{T_{mm}}$), quando comparado aos modelos que calculam as funções de resposta a temperatura com a temperatura média diária do ar ($WE_{T_{media}}$) e utilizando oito temperaturas diárias do ar estimadas a partir das temperaturas mínima e máxima do ar (WE_{TCM}).

Para os genótipos BRS Louro, BRS 177, CEP 51, CEP 52 e Nova Era a simulação do desenvolvimento com o modelo de WE é melhor com valores maiores temperaturas cardinais ótima e máxima ($TC_{ot,max}$) do que os valores para o genótipo BRS Tarumã ($TC_{original}$).

Os genótipos de trigo de primavera BRS Louro, BRS 177, CEP 51, CEP 52 e Nova Era são sensíveis ao fotoperíodo e, com exceção da BRS Louro, tem alguma resposta a vernalização, mas não obrigatória.

O genótipo BRS Tarumã tem comportamento típico de trigo de inverno e necessita obrigatoriamente de temperaturas vernalizantes para completar seu ciclo de desenvolvimento.

Foi possível adaptar o modelo WE modificado por Streck et al. (2003) para os genótipos usados no sul do Brasil.

REFERÊNCIAS

BROOKING, I. R.; JAMIESON, P. D. Temperature and photoperiod response of vernalization in near-isogenic lines of wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.79, n. 1, p.21-38, jan./mar. 2002.

BROOKING, I. R.; JAMIESON, P. D.; PORTER, J. R. The influence of daylength on final leaf number in spring wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 41, n. 3, p. 155-165, jul./set. 1995.

CAO, W.; MOSS, D. N. Modelling phasic development in wheat: a conceptual integration of physiological components. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 129, n. 2, p. 163-172, 1997.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 400 p.

CRAUFURD, P. Q.; CARTWRIGHT, P. M. Effect of Photoperiod and Chloromequat on Apical Development and Growth in a Spring Wheat (*Triticum aestivum*) Cultivar. **Annals of Botany**, London, v. 63, n. 5, p. 515-525, mai. 1989.

EHRLER, W. L. et al. Wheat canopy temperature: Relation plant water potential. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, n. 2, p. 251-256, mar./abr. 1978.

FLOOD, R. G.; HALLORAN, G. M. Genetics and physiology of vernalization response in wheat. **Advances in Agronomy**, New York, v. 39, n. 1, p. 87-125, 1986.

GONZÁLEZ, F. G.; SLAFER, G. A.; MIRALLES, D. J. Vernalization and photoperiod responses in wheat pre-flowering reproductive phases. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 74, n. 2-3, p. 183-195, abr./set. 2002.

HAUN, J. R. Determination of wheat growth-environments relationships. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, n. 5, p. 813-816, set./out. 1973.

IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis: summary for policymakers**. Geneva: IPCC, 2007. 18 p. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>>. Acesso em: 20 jan.

2008.

JAME, Y. W.; CUTFORTH, H. W. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 124, n. 3-4, p. 207-218, jul./dez. 2004.

JANSSEN, P. H. M.; HEUBERGER, P. S. C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 83, n. 1-2, p. 55-56, jan./abr. 1995.

KIRBY, E. J. M. Factors affecting rate of leaf emergence in barley and wheat. **Crop Science**, Madison, v. 35, n. 1, p. 11-19, jan./mar. 1995.

KIRBY, E. J. M. et al. A study of wheat development in the field: analysis by phases. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 11, n. 1, p. 63-82, jan./mar. 1999.

LEVY, J.; PETERSON, M. L. Responses of spring wheats to vernalization and photoperiod. **Crop Science**, Madison, v.12, n. 4, p.487-492, jul./ago. 1972.

PORTER, J. R. et al. An analysis morphological development stages in avalon winter wheat crops with different sowing dates and at ten sites in England and Scotland. **Journal of Agricultural Sciences**, Cambridge, v. 109, n. 1, p. 107-121, 1987.

PORTER, J. R.; GAWITH, M. Temperatures and the growth and development of wheat: A review. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 10, n. 1, p. 23-36, jan. 1999.

REUNIÃO DA COMISSÃO SUL- BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO, 38, 2007, Passo Fundo. **Informações técnicas para a safra 2007: trigo e triticale**. Passo Fundo: EMBRAPA TRIGO, 2006. 75 p.

RIDDELL, J. A.; GRIES, G. A.; STEARNS, W. Development of spring wheat: I. The effect of photoperiod. **Agronomy Journal**, Madison, v. 50, n. 12, p. 735-738, dez. 1958.

SIDDIQUE, M. R. B.; HAMID, A.; ISLAM, M. S. Drought stress effects on water relations of wheat. **Botanical Bulletin of Academia Sinica**, Taipei, v. 41, n. 1, p. 35-39, jan./mar. 2000.

SLAFER, G. A.; RAWSON, H. M. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a reexamination of some assumptions made by physiologists and

modellers. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v.21, n. 4, p. 393-426, abr. 1994.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM – SAS. Getting started with the SAS® Learning Edition. Cary, NC: **SAS Institute**, 2002. 81p.

STRECK, N. A. et al. Simulating the development of Field grown potato (*Solanum tuberosum* L.). **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 142, n. 1, p. 1-11, jan./mar. 2007.

STRECK, N. A.; WEISS, A.; BAENZIGER, P. S. A generalized vernalization response function for winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n. 1, p. 155-159, jan./fev. 2003a.

STRECK, N. A. et al. Improving predictions of developmental stages in winter wheat. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 115, n. 3-4, p. 139-150, jul./dez. 2003b.

TAIZ, L. The control of flowering. In: TAIZ, L.; ZEIGER, E. (Ed.). **Plant Physiology**. Sunderland: Sinauer Associates, 2002. p. 559-590.

XUE, Q. **Phenology and gas exchange in winter wheat (*Triticum aestivum* L.)**. 2000. 128 f. Dissertation (PhD in Agronomy) – School of Natural Resources Sciences, Institut of natural Resources Sciences, University of Nebraska, Lincoln.

XUE, Q.; WEISS, A.; BAENZIGER, P. S. Predicting leaf appearance in field-grown winter wheat: evaluating linear and non-linear models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 175, n. 3, p. 261-270, mai./jun. 2004.

WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, Essex, v. 58, n. 1, p. 1-24, jan. 1998.

WENDT, W.; DUCA, L. de J. A. del; CAETANO, V. da R. **Avaliação de cultivares de trigo de duplo propósito, recomendados para cultivo no estado do Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 2 p. (Comunicado Técnico, 137).

WHITE, J. W. From genome to wheat: Emerging opportunities for modeling wheat growth and development. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 25, n. 2, p. 79-88, abr./jun. 2006.

YAN, W.; HUNT, L. A. An Equation for Modelling the Temperature Response of Plants using only the Cardinal Temperatures. **Annals of Botany**, Londres, v. 84, n. 5, p. 607-614, mai. 1999.

ZADOKS, J. C.; CHANG, T. T; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, Oxford, v. 14, n. 6, p. 415-421, nov./dez. 1974.

CAPITULO III

SIMULAÇÃO DO BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO EM TRIGO ATRAVÉS DA MODIFICAÇÃO DE DOIS MODELOS

INTRODUÇÃO

A água é o principal fator abiótico que causa variação no rendimento das culturas na maior parte das áreas agrícolas do Planeta (JAMIESON et al., 1998b; EITZINGER et al., 2003; OKUYAMA et al., 2004; STRECK, 2004). Diferentes regiões do mundo possuem diferentes tipos de problemas associados aos recursos hídricos, como os do uso e do controle, que podem afetar a sustentabilidade das reservas hídricas. No estado do Rio Grande do Sul, assim como em demais estados do Brasil, o cultivo agrícola é predominantemente não irrigado, podendo ocorrer estresse hídrico em um ou mais sub-períodos de desenvolvimento das plantas cultivadas.

Na agricultura, tanto o excesso como o déficit hídrico no solo podem influenciar negativamente a quantidade e qualidade de grãos de trigo (FERREIRA et al., 1973; AHMADI; BAKER, 2001). O efeito do estresse hídrico na produção das culturas depende do estágio de desenvolvimento da planta e da sua intensidade, duração do estresse hídrico e da capacidade das plantas em responder as mudanças do ambiente (SANTOS; CARLESSO, 1998). Pois, a quantidade de água disponível no solo para as plantas (ADSP) influencia a maioria dos processos físicos e fisiológicos no sistema solo-planta-atmosfera (EITZINGER et al., 2003), sendo um importante fator no crescimento e rendimento das culturas (FARIA; MADRAMOOTOO, 1996).

A estimativa da ADSP é parte de modelos de crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas agrícolas (DARDANELLI et al., 2004). Há na literatura um grande número de modelos que descrevem o balanço de água no solo com vários graus de complexidade, porém para a sua escolha deve-se levar em consideração a precisão da estimativa e a praticidade de aplicação. Dependendo da natureza do problema, a adaptação de

um modelo existente, ou o desenvolvimento de um novo modelo pode ser necessária (FARIA; MADRAMOOTOO, 1996).

O modelo de balanço de água no solo de Campbell; Diaz (1988) é um modelo intermediário em termos de complexidade e apresenta um reduzido número de dados de entrada, descrevendo os principais componentes do ciclo hidrológico de maneira apropriada, através de relações simplificadas entre a cultura e o solo. Neste modelo, o solo é dividido em camadas e simula o crescimento radicular da planta de trigo. O modelo de Campbell; Diaz (1988) necessita como dado de entrada, a data da maturidade fisiológica da cultura para o cálculo da profundidade do sistema radicular. Na maioria dos modelos de desenvolvimento a data da maturidade fisiológica é estimada somente no final do ciclo de desenvolvimento da cultura. Portanto, este modelo só pode ser utilizado quando o ciclo de desenvolvimento da cultura estiver completo, o que impede que seja usado em tempo real durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

Para melhor entender os mecanismos limitantes do déficit hídrico no solo em trigos de primavera, Amir; Sinclair (1991b) propuseram um modelo para quantificar a resposta de trigos de primavera ao déficit hídrico. Uma vantagem no modelo de Amir; Sinclair (1991b) é que este necessita de poucos coeficientes de solo para o seu funcionamento (conteúdo volumétrico de água a tensões de água no solo a $-0,1$ MPa e $-1,5$ MPa). Outra característica do modelo de Amir e Sinclair (1991b) é que o solo é dividido em duas camadas. Uma camada superficial com 150 mm de espessura (PS1), onde ocorre a perda de água do solo por evaporação e transpiração da planta, e uma mais profunda(PS2), que inclui a PS1, onde ocorre perda de água apenas por transpiração, através da absorção da água pelo sistema radicular. A PS1 e a PS2 no modelo original de Amir; Sinclair (1991b) devem ser calibradas para cada tipo de solo, sendo a PS1 e a PS2 mantidas constante do início até o final da simulação. Considerar uma profundidade única do início ao fim do ciclo de desenvolvimento da cultura parece não ser realista sob o ponto de vista biológico, pois na fase inicial de desenvolvimento da cultura apenas uma pequena faixa de solo é explorada pelo sistema radicular da planta. O modelo de Amir; Sinclair (1991b) foi desenvolvido em Israel, para condições clima e solo diferente das encontradas em Santa Maria, RS.

Uma possibilidade para contornar a desvantagem em descrever o crescimento radicular no modelo de Campbell; Diaz (1988) é vincular o modelo de crescimento radicular a um modelo de desenvolvimento. Assim, não há a necessidade de saber data de ocorrência da maturidade fisiológica com antecedência. Existem vários modelos de simulação do desenvolvimento em trigo (STRECK et al., 2003a,b). Entre esses modelos, o modelo de

Wang; Engel (WE, WANG; ENGEL, 1998) é um modelo apropriado, pois é composto de funções de resposta não lineares combinadas de forma multiplicativa, o que é uma vantagem em relação aos modelos que usam soma térmica. Já no modelo de Amir; Sinclair (1991), a inclusão de um modelo de desenvolvimento e de um modelo de simulação do crescimento radicular no perfil do solo pode melhorar a estimativa do balanço de água do solo. A hipótese neste estudo é que tais alterações tornam esses dois modelos de simulação do balanço de água do solo mais realistas do que a versão original, melhorando sua capacidade preditiva em regiões distintas das que foram calibradas.

Os objetivos deste trabalho foram: (a) obter uma melhor predição do balanço de água no solo, introduzindo o modelo de desenvolvimento de WE em substituição à data de maturidade fisiológica do trigo no modelo de Campbell; Diaz (1988) e; (b) introduzir um modelo de crescimento radicular e substituir o modelo de desenvolvimento da soma térmica pelo modelo WE no modelo de Amir; Sinclair (1991a,b).

MATERIAL E MÉTODOS

Protocolo Experimental

O experimento a campo foi realizado na área do Departamento de Fitotecnia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria (29°43'S, 53°43'W e altitude de 95m), RS. O solo do local é pertencente à unidade de mapeamento São Pedro (Argissolo Vermelho Distrófico arênico). Santa Maria está localizada na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul. Conforme classificação de KÖPPEN, o clima da região é Cfa, subtropical úmido com verões quentes sem estação seca definida (MORENO, 1961).

O preparo do solo foi realizado de maneira convencional com gradagens. Na adubação de base foram aplicados 300 kg ha⁻¹ da formulação 5-20-20 no sulco de semeadura de acordo com a análise química do solo, seguindo as Recomendações de Adubação e Calagem para os Estados Do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, 2004). Foi realizada adubação nitrogenada em cobertura na quantidade de 80 kg ha⁻¹ de nitrogênio, parcelada em duas épocas, a primeira no início do

perfilhamento e a segunda no estágio de espiguetas terminal.

Foram utilizados os genótipos de trigo BRS 177 (EMBRAPA) e CEP 52 (FUNDA CEP), que foram selecionados por serem recomendados para o Rio Grande do Sul e por apresentarem ciclos de desenvolvimento distintos (médio e precoce, respectivamente). Foram realizadas três datas de semeadura durante os anos de 2006 e 2007 (Tabela 1), sendo uma data de semeadura realizada antes e as outras duas após a época recomendada para Santa Maria (11/05 – 20/06). Cada parcela foi constituída de quatro linhas espaçadas a 0,20 m com 2,40 m de comprimento e área de 1,92 m². A densidade de semeadura foi de 330 sementes m⁻².

As datas de ocorrência dos estágios de desenvolvimento para as três datas de semeadura estão apresentados na Tabela 1. A emergência (EM) foi considerada quando 50% das plantas em 0,5 m de cada linha da parcela estavam acima do nível do solo. A contagem do número de plantas foi feita diariamente até obter-se número constante de plantas emergidas. A data de ocorrência da antese (AN) foi considerada quando 50% das plantas selecionadas estavam com pelo menos uma flor aberta (ZADOKS et al., 1974). O estágio maturidade fisiológica (MF) foi considerado quando 50% das plantas estavam com 100% da folha bandeira amarelecida (STRECK et al., 2003b).

Tabela 1 - Data de semeadura, emergência, antese e maturidade fisiológica para os genótipos de trigo CEP 52 e BRS 177, utilizados neste estudo. Santa Maria, RS.

Genótipo	Data			
	Semeadura	Emergência	Antese	Maturidade Fisiológica
CEP 52	07/07/2006	17/07/2006	03/10/2006	16/11/2006
BRS 177	04/09/2006	13/09/2006	09/11/2006	06/12/2006
BRS 177	18/04/2007	25/04/2007	03/09/2007	26/09/2007

A quantidade de água no solo foi medida pelo método gravimétrico nas profundidades de 0-10, 10-30 e de 30-60 cm. Foram coletadas quatro amostras de solo para cada profundidade na linha central de cada parcela. Procurou-se coletar as amostras de solo a cada 14 dias, no período entre a emergência até a antese. As amostras de solo coletadas foram levadas a estufa a 105-110°C, onde permaneceram até peso constante. Para determinação da densidade do solo foi utilizado o método do anel volumétrico. Foram coletadas quatro amostras da densidade do solo nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm (Tabela 2). Com

estes dados foi possível a obtenção da umidade volumétrica do solo nas diferentes camadas (EMBRAPA, 1997).

Tabela 2 - Valores de conteúdo volumétrico de água no solo na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) estimados para unidade de mapeamento de solo São Pedro, um argissolo vermelho distrófico arênico.

Profundidade (cm)	CC ($\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$)	PMP ($\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$)
0-10	0,3186	0,1373
10-40	0,3143	0,1373
40-50	0,3318	0,1456
50-60	0,3318	0,1839

Os valores de conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo (CC, $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$) e no ponto de murcha (PMP, $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$) permanente foram estimados pela equação de pedotransferência proposta por Urach (2007), a partir de teores médios de argila para o solo da unidade de mapeamento São Pedro (GALVAGNI, 1998).

Para medir a profundidade máxima do sistema radicular (RD_{max}) foi feita uma trincheira no dia 30/08/2007 (uma semana após a antese do genótipo BRS 177, para a data de semeadura realizada no dia 18/04/2007), até a profundidade em que não fosse mais possível constatar a presença de raízes. Sendo que, do dia em que foi realizada a semeadura até o dia 30/08/2007, a precipitação acumulada foi de 461,1 mm, indicando boa disponibilidade hídrica durante este período. Constatou-se que havia raízes somente até a profundidade de 60 cm, porém a partir de 30 cm de profundidade as raízes eram raras e, normalmente concentradas em galerias decorrentes da macrofauna do solo. Em preparo de solo convencional, utilizando gradagens, Stone; Silveira (1999) verificaram a formação de uma camada compactada de solo entre 10-24 cm de profundidade. A baixa frequência de raízes em profundidades maiores que 30 cm na área de cultivo, provavelmente, foi ocasionada pela compactação do solo devido às sucessivas gradagens realizadas em cultivos anteriores. Devido a estas observações as simulações foram realizadas nas profundidades máxima de sistema radicular (RD_{max}) de 30 e 60 cm.

As variáveis meteorológicas (temperatura máxima e mínima, brilho solar real e precipitação pluviométrica) foram coletadas na Estação Climatológica Principal do 8º Distrito Meteorológico – Ministério da Agricultura, localizada a aproximadamente 100 m do local de cultivo.

Descrição do modelo de Campbell; Diaz (1998)

Dados de entrada do modelo Campbell; Diaz (1988)

Os dados meteorológicos necessários e utilizados para rodar o modelo de Campbell; Diaz (1988) foram temperatura mínima (T_n , °C) e máxima diária (T_x , °C) do ar e a precipitação diária ($m \text{ dia}^{-1}$) e os dados de solo foram: o conteúdo de água do solo na capacidade de campo (CC), o conteúdo de água do solo no ponto de murcha permanente (PMP) e o conteúdo de água do solo seco ao ar livre (ADSS). Os dados da cultura necessários no modelo são data de semeadura, data de emergência, data de maturidade fisiológica e a profundidade máxima que o sistema radicular pode alcançar no solo (RD_{max} , m).

Interceptação de água pelo dossel vegetal

Parte da água proveniente da precipitação ou irrigação pode ser interceptada pelo dossel vegetal e evaporada sem penetrar no solo. Logo, a quantidade de água interceptada depende da fração de área de solo coberta pela vegetação e da capacidade de armazenamento de água pelo dossel. No modelo de Campbell; Diaz (1988) foi assumido que a fração de interceptação da precipitação pelo dossel é a mesma da fração de interceptação da radiação solar incidente (FI). A capacidade de armazenamento de água do dossel (CA_{dossel} , $m \text{ dia}^{-1}$) varia com o ângulo de distribuição foliar e das propriedades da superfície das folhas e caules. A interceptação de água pelo dossel vegetal (I , $m \text{ dia}^{-1}$) é calculada por:

$$I = FI \times CA_{dossel} \quad (1)$$

Em que, a FI é calculada com a equação 12.

Escorrimento superficial (Runoff)

No modelo de Campbell; Diaz (1988), sempre que a precipitação diária é maior que 20 mm, ocorre escoamento superficial (RUNOFF, $m \text{ dia}^{-1}$), o qual aumentou proporcionalmente com a precipitação ($m \text{ dia}^{-1}$), sendo calculado como:

$$\begin{cases} \text{RUNOFF} = \frac{P - 0,2 \times S^2}{P + 0,8 \times S}, & \text{se } P > 0,2 \times S \\ \text{RUNOFF} = 0, & \text{se } P \leq 0,2 \times S \end{cases} \quad (2)$$

em que, P é a precipitação pluviométrica (m) e S representa a condição de armazenamento de água na superfície do solo e depende do tipo de solo, do tipo de sistema de semeadura (semeadura em linha reta, semeadura em linhas acompanhando a inclinação do terreno e/ou acompanhando terraços) e do tipo de cultura (pousio, gramíneas, leguminosas). Quanto menor o valor de S, maior o escoamento superficial (CAMPBELL; DIAZ, 1988).

Infiltração e percolação profunda de água no solo

No cálculo da infiltração e percolação profunda de água no solo (m dia^{-1}) pelo modelo de Campbell; Diaz (1988), o solo é dividido em camadas. Assumiu-se que cada camada de solo encheu do conteúdo atual de água no solo (CAA) até o conteúdo de água na capacidade de campo (CACC), e toda água que excedeu a CC da referida camada foi transferida para a camada inferior. Assumiu-se ser perdida por percolação profunda toda água que atravessou além da última camada de solo.

Evapotranspiração potencial e sua partição

A evapotranspiração potencial (ETP, m dia^{-1}) no modelo de Campbell; Diaz (1988) é calculada por:

$$\text{ETP} = 0,000014 \times (T_{\text{média}} + 3) \times \frac{K_{\downarrow}}{23,88} \quad (3)$$

em que, $T_{\text{média}}$ é a temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$), calculada como sendo a média da temperatura mínima (T_n) e máxima diária (T_x), e K_{\downarrow} é a densidade de fluxo de radiação solar incidente na superfície do local ($\text{cal cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$), o índice 23,88 transforma $\text{cal cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$. A equação 3 é derivada da equação de Penman, assumindo que o déficit atual de pressão de vapor é correlacionado com a densidade de fluxo de saldo de radiação através da equação de Priestley-Taylor. A densidade de fluxo de radiação solar líquida, por sua vez foi correlacionada com a densidade de fluxo de radiação solar incidente. A constante 0,000014 na equação 3 transforma ETP em metros de água quando a densidade de fluxo de radiação solar incidente é dada em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$. A densidade de fluxo de radiação incidente na superfície do solo (K_{\downarrow} , $\text{cal cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$) foi estimada pelo modelo de Ångström-Prescott com parâmetros b_0 e b_1 obtidos de Estefanel et al. (1990):

$$K_{\downarrow} = K_{0\downarrow} \left(b_0 + b_1 \frac{n}{N} \right) \quad (4)$$

em que, $K_{0\downarrow}$ é a densidade de fluxo de radiação solar incidente no topo da atmosfera

(cal cm⁻² dia⁻¹), n a insolação (h dia⁻¹) e N a duração do período diurno (h dia⁻¹). Sendo K_{0↓} e N calculados conforme Estefanel (1998):

$$K_{0\downarrow} = \left(\frac{1440}{\pi}\right) J_0 \left(\frac{\bar{R}}{R}\right)^2 (H \cdot \sin\phi \cdot \sin\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin H) \quad (5)$$

$$N = \frac{2H}{15} \quad (6)$$

em que, J₀ é a constante solar (2,0 cal cm⁻² min⁻¹), e $(\bar{R}/R)^2$ é a razão entre a distância Terra-Sol média e instantânea, calculada pela expressão:

$$\left(\frac{\bar{R}}{R}\right)^2 = 1,00011 + 0,034221 \cos\alpha + 0,00128 \sin\alpha + 0,000719 \cos 2\alpha - 0,000077 \sin 2\alpha \quad (7)$$

$$\alpha = 2\pi \frac{m}{n} \quad (8)$$

em que, m é o número de ordem do dia do ano e n o número de dias do ano (365 ou 366), ϕ a latitude do local, δ o ano de declinação do sol, H (radianos) o ângulo horário do nascer do sol ou por do sol, calculado pela expressão:

$$H = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad (9)$$

Depois de calculada, a ETP foi particionada em evaporação potencial de água do solo (EP, m dia⁻¹) e transpiração potencial das plantas (TP, m dia⁻¹). A EP foi calculada através da seguinte equação:

$$EP = (1 - FI) \times ETP \quad (10)$$

em que, FI é a fração de interceptação da radiação solar incidente. A TP foi calculada pela seguinte equação:

$$TP = FI \times ETP \quad (11)$$

em que, a FI foi calculada como:

$$FI = 1 - \exp(-k_c \times IAF) \quad (12)$$

em que, k_c é o coeficiente médio de extinção da radiação solar incidente pelo dossel vegetal (adimensional) e IAF é o índice de área foliar [(m² de área foliar) (m² de área de solo)⁻¹]. O IAF foi calculado em função da massa da matéria seca produzida pela cultura (MSA, kg matéria seca dia⁻¹):

$$IAF = \frac{4}{1 + 0,24 \div MSA} \quad (13)$$

em que, a MSA foi calculada pela equação:

$$MSA = \frac{TA \times DWR}{VDD} \quad (14)$$

em que, TA é a transpiração atual da cultura (m dia⁻¹), cujo algoritmo para cálculo está apresentado na equação 22, DWR é a razão de matéria seca e água ou a quantidade de matéria seca produzida por unidade de água consumida [(kg matéria seca) (m água)⁻¹] e o VDD foi calculado por:

$$VDD=(T_x-T_n)\times[(0,00109\times T_{\text{média}}+0,011)\times T_{\text{média}}+0,35] \quad (15)$$

Quando a transpiração atual (TA) foi menor que 95% da transpiração potencial (TP), o modelo considerou que a matéria seca produzida pela cultura diminuiu proporcionalmente com o stress hídrico da seguinte forma:

$$MSA=MSA\times\left(0,8+0,2\times\frac{TA}{TP}\right) \quad (16)$$

Evaporação real da água da superfície do solo

A quantidade atual de água evaporada a partir da superfície do solo (ER, m dia⁻¹) no modelo de Campbell; Diaz (1988) foi calculada levando em consideração dois estágios. No primeiro estágio a evaporação ocorreu na taxa potencial enquanto o conteúdo de água nos primeiros 10 cm de solo foi maior do que o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (PMP). No segundo estágio, a ER diminuiu de acordo com a quantidade de água no solo e foi calculada através da seguinte equação:

$$ER=EP\times\left[\frac{CAA(1)-ADSS}{PMP-ADSS}\right]^2 \quad (17)$$

em que, CAA (1) é o conteúdo de água na primeira camada de solo (10 cm), ADSS é o conteúdo de água do solo seco ao ar livre e os outros termos já foram definidos anteriormente.

Transpiração real da cultura, crescimento radicular e absorção de água pela cultura

Quando a água está livremente disponível no solo, a transpiração ocorre na taxa potencial (equação 5). A água fica disponível para a planta pelo movimento de água até as raízes e pelo crescimento das raízes em direção à água. O crescimento de raízes no modelo de Campbell; Diaz (1988) foi calculado como:

$$RD=[PES+(RD_{\text{max}}-PES)]\times\left[\frac{1}{1+44.2\times\exp(-8.5\times(DOY-DEM)-(DMF-DEM))}\right] \quad (18)$$

em que, RD é a profundidade (m) do sistema radicular em um determinado dia do ano (DOY), RDmax é a profundidade máxima (m) que o sistema radicular pode alcançar, PES é a

profundidade que ocorreu a evaporação (neste estudo 0,1 m; SILVA, 2006), DEM é o dia da emergência da cultura e DMF é o dia do ano em que ocorre a maturidade fisiológica da cultura.

A absorção de água pela cultura foi calculada da seguinte maneira: o solo foi dividido em camadas e assumiu-se que ocorreu a absorção de água em cada camada proporcionalmente à diferença de potencial de água entre o solo e o xilema e, inversamente proporcional à resistência das raízes em cada camada. A resistência das raízes foi considerada proporcional à fração de raízes em cada camada. A densidade de raízes diminuiu linearmente com a profundidade no solo, de maneira que a fração de raízes em uma camada dependeu apenas da profundidade das raízes. Quando a profundidade de raízes foi maior ou igual a profundidade da camada de solo, a fração de raízes em cada camada [F(J)] foi calculada como:

$$F(J)=DZ(J)\times\left[\frac{2\times(RD-Z)+DZ(J)}{RD^2}\right] \quad (19)$$

Quando a profundidade de raízes foi menor do que a profundidade da camada de solo, a fração de raízes em cada camada [F(J)] foi calculada como:

$$F(J)=\left\{\frac{[(RD-Z)+DZ(J)]}{RD}\right\}^2 \quad (20)$$

em que, DZ é a profundidade de cada camada de solo, Z é a profundidade do solo (ou seja, acumulado DZ) e RD já foi definido na equação 18.

O potencial de água em cada camada de solo [SPSI(J)] foi calculado a partir do conteúdo de água no solo em cada camada [CAA(J)] através da seguinte função exponencial:

$$SPSI(J)=-a\times\exp\{-b\times\log[CAA(J)]\} \quad (21)$$

em que,

$$a=\exp[\log(-PSIFC)+b\times\log(CC)] \quad (22)$$

e,

$$b=\frac{\log(PSIPMP\div PSICC)}{\log(CC\div PMP)} \quad (23)$$

em que, PSICC é o potencial de água no solo na capacidade de campo (-30 J kg^{-1}), PSIPMP é o potencial de água no solo no ponto de murcha permanente (-15000 J kg^{-1}), CC é o conteúdo volumétrico de água do solo na capacidade de campo ($\text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-3}$) e PMP é o conteúdo volumétrico de água do solo no ponto de murcha permanente ($\text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-3}$). O potencial médio de água no perfil do solo (AVEPSI) foi calculado por:

$$AVEPSI=\sum F(J)\times SPSI(J) \quad (24)$$

O potencial de água no xilema (PSIX) foi calculado como:

$$PSIX = AVEPSI - RBAR \times TP \quad (25)$$

em que, TP é a transpiração potencial (m) e RBAR é a resistência total das raízes, calculada por:

$$RBAR = \frac{RMIN}{FI} \quad (26)$$

em que, RMIN é a resistência mínima das raízes ($1000 \text{ J kg}^{-1} / 0,01 \text{ m}$) e FI já foi definido na equação 12. A equação 19 indicou que a resistência total das raízes diminuiu à medida que as plantas cresceram. A absorção de água pela planta foi limitada no modelo não permitindo que o potencial de água no xilema fosse inferior ao potencial de água no solo no ponto de murcha permanente. Uma vez que o valor do potencial de água no xilema (PSIX) foi calculado, a absorção de água e o novo valor do conteúdo de água em cada camada foram calculados como:

$$CAA(J) = CAA(J) - LOSS \quad (27)$$

em que, LOSS foi calculada por:

$$LOSS = F(J) \times \left\{ \frac{[SPSI(J) - PSIX]}{[RBAR \times DZ(J)]} \right\} \quad (28)$$

em que, a transpiração real da cultura (TR, m dia^{-1}) foi calculada por:

$$TR = LOSS \times DZ(J) \quad (29)$$

Balanço hídrico do solo

O modelo de Campbell; Diaz (1988) calcula o conteúdo atual de água no solo em cada camada e em cada dia. Sob o ponto de vista biológico, no entanto, é mais interessante representar a quantidade de água no solo que é disponível para a planta. Ritchie (1981) propôs o uso do índice Água Disponível no Solo para a Planta (ADSP). Neste trabalho foi considerada a fração de água disponível no solo para as plantas (FADS). O índice FADS varia de zero a um e foi calculado como:

$$FADS = \frac{CAA - PMP}{CC - PMP} \quad (30)$$

E todos os termos já foram definidos anteriormente.

Descrição do modelo de Amir; Sinclair (1991a,b) utilizado

Dados de entrada do modelo Amir; Sinclair (1991b)

Os dados meteorológicos obtidos para rodar o modelo de Amir; Sinclair (1991a,b) foram as temperatura mínima (T_n , °C) e máxima diária (T_x , °C) do ar e a precipitação pluviométrica diária (mm dia^{-1}) e os dados de solo utilizados foram o conteúdo de água do solo na capacidade de campo (CC), o conteúdo de água do solo no ponto de murcha permanente (PMP). Os dados da cultura usados no modelo foram número final de folhas (NFF), filocrono ($^{\circ}\text{C dia}^{-1} \text{ folha}^{-1}$), o ciclo de desenvolvimento da cultura (médio ou precoce), profundidade do solo em que ocorreu a evaporação (PS1) e a profundidade de solo explorada pelo sistema radicular (PS2).

Cálculo da capacidade de água armazenada no solo

A capacidade total de água que o solo pode armazenar depende da profundidade de solo que o sistema radicular pode explorar. O modelo de Amir; Sinclair (1991b) divide o solo em duas camadas. Na primeira camada de solo ocorre a evaporação de água do solo e a transpiração de água pela planta. Na segunda camada de solo (PS2), que envolve as duas camadas de solo, foi considerada a transpiração de água pela planta e a evaporação de água do solo da PS1. A quantidade de água que o solo pode armazenar na camada superficial de solo (APS1) foi calculada, segundo os autores, por:

$$APS1 = (CC - PMP) \times PS1 \quad (31)$$

em que, CC é o conteúdo volumétrico de água no solo na capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), PMP é o conteúdo volumétrico de água no solo no ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e PS1 é a profundidade do solo na camada superficial (mm).

A quantidade de água armazenada no solo na segunda camada de solo (APS2) foi calculada por:

$$APS2 = (CC - PMP) \times PS2 \quad (32)$$

Assumindo-se que, após chuva ou irrigação, a camada superior de solo (PS1) pode armazenar 4 mm ($APS1 + 4$) além da sua capacidade total de armazenamento de água. Quando a capacidade total de água no solo foi saturada, toda a água que excedeu a capacidade de armazenamento total foi considerada perdida por escoamento superficial ou percolação

profunda, não havendo a separação dos dois processos.

Evaporação de água no na superfície do solo

A evaporação de água no solo aconteceu em dois estágios. O primeiro estágio de evaporação (ESS_I) ocorreu quando a ADSP1 foi maior do que zero ou a ADSP foi maior do que 50%. Dessa forma, calculou-se o primeiro estágio da evaporação de água no solo (ESS_I , mm dia^{-1}) pela equação de Penman:

$$ESS_I = \frac{(K\downarrow \div 23,88) \times \Delta \times \exp(-0,5 \times IAF) + 0,68 \times 0,4 \times DPV}{\Delta + 0,68} \quad (33)$$

em que, $K\downarrow$ é a radiação solar incidente ($\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$), IAF é o índice de área foliar, DPV é o déficit de pressão parcial de vapor, Δ é a tangente de saturação do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$). No primeiro estágio admitiu-se uma evaporação do solo mínima de $1,5 \text{ mm dia}^{-1}$. O DPV foi calculado com a equação de Tanner; Sinclair (1983) em que DPV é 75% da diferença entre a DPV calculada para temperatura máxima (T_x) e mínima (T_n):

$$DPV = 0,75 \times (DPV_{\max} - DPV_{\min}) \quad (34)$$

em que, DPV_{\max} é o déficit de pressão parcial na temperatura máxima (T_x , $^\circ\text{C}$) e DPV_{\min} é o déficit de pressão parcial na temperatura mínima (T_n , $^\circ\text{C}$), calculados por:

$$DPV_{\max} = 6,11 \times 10^{[(7,5 \times T_x) \div (237,3 + T_x)]} \quad (35)$$

$$DPV_{\min} = 6,11 \times 10^{[(7,5 \times T_n) \div (237,3 + T_n)]} \quad (36)$$

em que, a tangente de saturação do ar (Δ , $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) foi calculada por:

$$\Delta = \frac{4098 \times es}{(T_{\text{media}} + 237,3)^2} \quad (37)$$

em que, T_{media} ($^\circ\text{C}$) é a temperatura média do ar e es é a pressão de saturação do ar (kPa), calculada por:

$$es = 0,6108 \times \exp \left[\frac{(17,27 \times T_{\text{media}})}{(237,3 \times T_{\text{media}})} \right] \quad (38)$$

O segundo estágio de evaporação ocorreu quando a camada superior do solo foi considerada seca ou quando a FADS do solo foi menor do que 0,50. No segundo estágio, a taxa de evaporação é proporcional a raiz quadrada do tempo em que se iniciou o segundo estágio (DS_{II}) multiplicado pela evaporação potencial calculada por Penman, e foi calculado como segue abaixo:

$$ESS_{II} = ESS_I \times \left[(\sqrt{DS_{II}}) - \sqrt{(DS_{II} - 1)} \right] \quad (39)$$

Perda de água do solo por transpiração das plantas

O cálculo da transpiração é a etapa final para a estimativa do balanço de água no solo. A transpiração (TRP) foi calculada por:

$$TRP = \frac{FTSS \times DPV}{(0,058 \times 1000)} \quad (40)$$

em que, FTSS é o acúmulo diário de fitomassa ($g\ m^{-2}$), e os outros termos já foram definidos anteriormente. A FTSS foi calculada por:

$$FTSS = K_{\downarrow} \times EUR \times [1 - \exp(-0.5 \times IAF)] \quad (41)$$

em que, K_{\downarrow} é a densidade de fluxo de radiação incidente ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$), EUR é a eficiência de uso da radiação ($g\ MJ^{-1}$). A transpiração da camada superior do solo foi calculada por:

$$TRP1 = TRP \times \left[\frac{2}{1 + \exp(-14 \times ADSP1 \div 19,5)} - 1 \right] \quad (42)$$

em que, o balanço de água na camada superior de solo foi definido por:

$$ADSP1 = ADSP1_{n-1} - TRP1 - ESS + P + Irr \quad (43)$$

em que, P é a precipitação pluviométrica (mm). O balanço de água em todo perfil de solo foi definido por:

$$ADSP = ADSP_{n-1} - TRP - ESS + P + Irr \quad (44)$$

E a fração de água transpirável no solo para as plantas (FADS) foi calculada pela equação 30.

Modificações propostas no modelo de Campbell; Diaz (1988)

O modelo de Campbell; Diaz (1988) necessita do conhecimento prévio da data de ocorrência da maturidade fisiológica para o cálculo da profundidade do sistema radicular do trigo. Com a finalidade de simular o crescimento radicular, sem a necessidade de se conhecer previamente a data de ocorrência da maturidade fisiológica, foi proposta a inclusão do modelo de desenvolvimento de WE para simular o crescimento radicular. Assim, pressupõe-se que o crescimento radicular ocorre de maneira similar ao crescimento da parte aérea, cessando quando a planta atinge a maturidade fisiológica. Para implementar o modelo de WE, substituiu-se os valores da diferença entre a data de ocorrência da maturidade fisiológica da equação 18 pelo índice de desenvolvimento de WE, sendo o RD calculado por:

$$RD = [PES + (RD_{max} - PES)] \times \left[\frac{1}{1 + 44,2 \times \exp\left(-8,5 \times \left(\frac{D}{2}\right)\right)} \right] \quad (45)$$

em que, PES é a profundidade do solo em que ocorre a evaporação (0,10 m), RD_{max} é a profundidade máxima do sistema radicular e D é o índice de desenvolvimento da planta. Para fins de simulação foram consideradas duas profundidades de RD_{max}, 0,3 e 0,6 m, conforme observado à campo. Quando não houve crescimento vegetativo sobre a superfície do solo foi considerado que a evaporação do solo ocorreu na camada de 0-10 cm de solo (SILVA et al., 2006). Um exemplo da evolução do crescimento radicular durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo simulado pelo modelo original de Campbell; Diaz (1988) e pelo modelo modificado para duas profundidades de solo na data de semeadura do dia 06/06/2007, está representado na Figura 1. O valor de D é o valor acumulado da taxa diária de desenvolvimento (r):

$$D = \sum r \quad (46)$$

No modelo de desenvolvimento WE, modificado por Streck et al. (2003b), a fase da EM-AN foi dividida em duas sub-fases: EM – ET (V1) e ET – AN (V2). A forma geral do modelo WE para a sub-fase EM – ET, é:

$$r = r_{\max,v1} \cdot f(T) \cdot f(P) \cdot f(V) \quad (47)$$

Para a sub-fase ET-AN, a f(V) foi desconsiderada, pois não existe efeito significativo da vernalização no desenvolvimento da cultura durante esta sub-fase (SLAFER; RAWSON, 1994; GONZÁLEZ et al., 2002):

$$r = r_{\max,v2} \cdot f(T) \cdot f(P) \quad (48)$$

Para a fase reprodutiva (AN-MF) somente a f(T) foi considerada:

$$r = r_{\max,r} \cdot f(T) \quad (49)$$

em que, os coeficientes $r_{\max,v1}$, $r_{\max,v2}$ e $r_{\max,r}$ são a taxa máxima de desenvolvimento para antes da ET, entre o estágio ET e AN e depois da antese (AN-MF), respectivamente, em condições ótimas de temperatura e fotoperíodo. Os valores dos coeficientes $r_{\max,v1}$, $r_{\max,v2}$ e $r_{\max,r}$ para os genótipos usados neste estudo estão apresentados na (Tabela 3).

A f(T) é calculada utilizando a função beta (STRECK et al., 2003b):

$$\begin{cases} f(T)=0, & T < TC_{\min} \\ f(T) = \frac{2(T - TC_{\min})^{\alpha} (TC_{ot} - TC_{\min})^{\alpha} - (T - TC_{\min})^{2\alpha}}{(TC_{ot} - TC_{\min})^{2\alpha}} & TC_{\min} \leq T \leq TC_{\max} \\ f(T)=0, & T > TC_{\max} \end{cases} \quad (50)$$

$$\alpha = \ln 2 / \ln [(TC_{\max} - TC_{\min}) / (TC_{ot} - TC_{\min})] \quad (51)$$

em que, TC_{\min} , TC_{ot} e TC_{\max} são as temperaturas cardinais (mínima, ótima e máxima) para o desenvolvimento, e T a temperatura do ar. Calculou-se a $f(T)$ usando a T_n e a T_x e depois foi calculada a $f(T)$ média (WE_{Tmm}). Os valores de temperaturas cardinais (TC_{\min} , TC_{ot} e TC_{\max}) para os genótipos usados neste estudo estão apresentados na (Tabela 3).

A $f(P)$ foi calculada por:

$$f(P) = 1 - \exp[-\omega(P - P_c)] \quad (52)$$

em que, P é o fotoperíodo atual (h), P_c é o fotoperíodo crítico (h) abaixo do qual o desenvolvimento não ocorre, e ω é o coeficiente de sensibilidade ao fotoperíodo (h^{-1}). Os valores de ω e P_c para os genótipos usados neste estudo estão apresentados na Tabela 3.

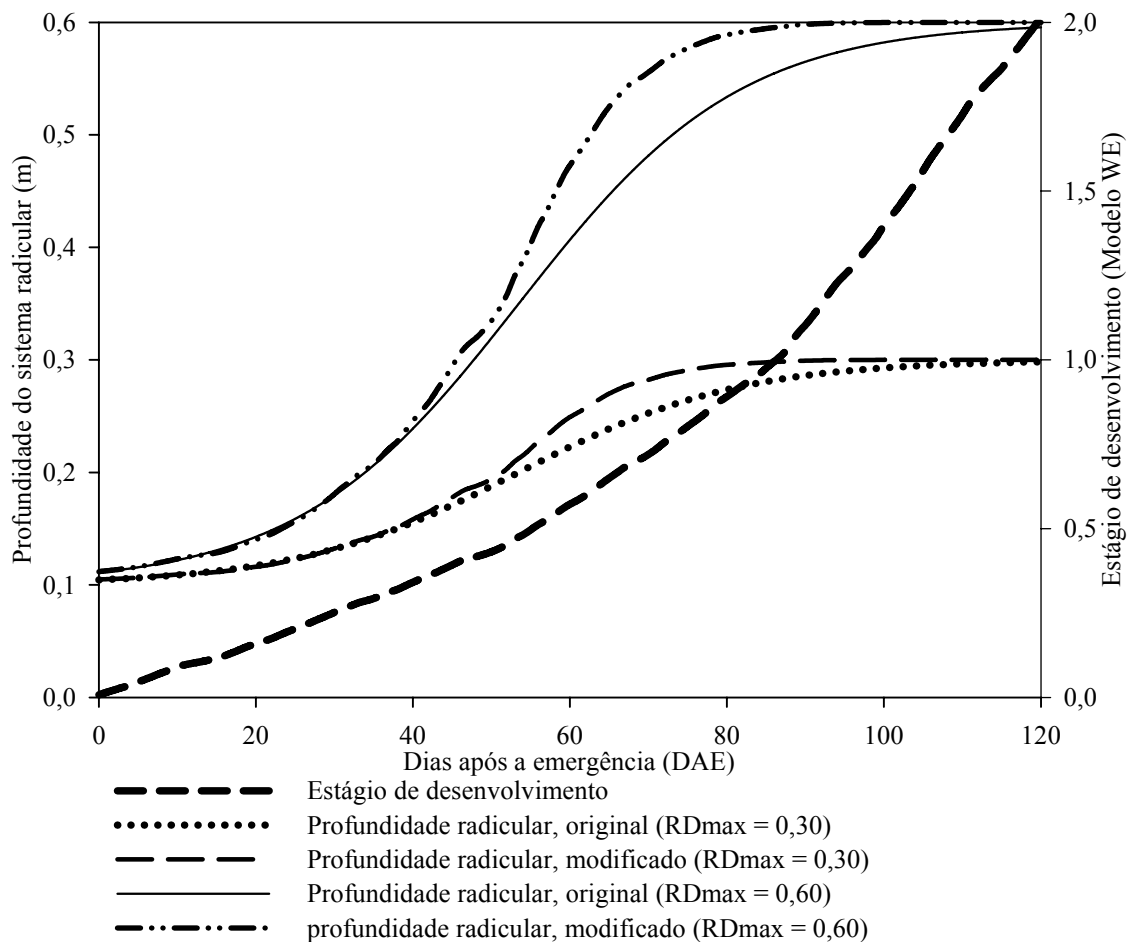


Figura 1 - Valores diários simulados da profundidade do sistema radicular utilizando as profundidades máxima do sistema radicular (RDmax) de 0,30 m e 0,60 m com o modelo de Campbell; Diaz (1988) original e modificado (não linear) e estágio de desenvolvimento do trigo com o modelo WE (emergência = 0, antese = 1 e maturidade fisiológica = 2) na semeadura de 07/07/2006 com emergência dia 17/07/2006 para o genótipo CEP 52, Santa Maria, RS.

A função de vernalização $f(V)$ utilizada foi uma função de resposta não linear, que para trigos de inverno foi proposta por Streck et al. (2003c) como:

$$f(V) = \frac{(VD)^n}{(X_{0,5})^n + (VD)^n} \quad (53)$$

em que, VD são os dias efetivos de vernalização efetiva e os coeficientes $X_{0,5}$ e n são dependentes da genótipo (Tabela 3). O número de dias efetivos de vernalização (VD) foi calculado pelo acúmulo da taxa diária de vernalização:

$$VD = \sum fvn \quad (54)$$

e a taxa diária de vernalização (fvn) foi calculada pela função beta de temperatura (STRECK et al., 2003a):

$$\begin{cases} fvn=0, & T < TC_{minv} \\ fvn = \frac{2(T - TC_{minv})^\alpha (TC_{otv} - T_{minv})^\alpha - (T - TC_{minv})^{2\alpha}}{(TC_{otv} - T_{minv})^{2\alpha}} & TC_{minv} \leq T \leq TC_{maxv} \\ fvn=0, & T > TC_{maxv} \end{cases} \quad (55)$$

$$\alpha = \frac{\ln 2}{\ln[(TC_{maxv} - TC_{minv}) / (TC_{otv} - TC_{minv})]} \quad (56)$$

em que, fvn é a taxa diária de vernalização, T é a temperatura do ar e TC_{minv} , TC_{otv} e TC_{maxv} são as temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima de vernalização assumidas como - 1,3; 4,9 e 15,7°C, respectivamente (PORTER; GAWITH, 1999; STRECK et al., 2003b). Calculou-se a fvn usando a Tn e a Tx e depois foi calculada a $f(t)$ média (WE_{Tmm}).

Tabela 3 - Valores dos coeficientes $r_{\max,v1}$ (dia^{-1}), $r_{\max,v2}$ (dia^{-1}), $r_{\max,r}$ (dia^{-1}), ω (h^{-1}), Pc (h), temperaturas cardinais (TC_{\min} , TC_{ot} e TC_{\max}), n e $X_{0,5}$ para os genótipos de trigo CEP 52 e BRS 177 com as melhores combinações de métodos de cálculo de $f(T)$ e f_{vn} (WE_{Tmm} : cálculo da função de temperatura utilizando as temperaturas máxima e mínima do ar) nas sub-fases de emergência a espiguetas terminal (EM-ET) e espiguetas terminal a antese (ET-AN) e na fase de antese a maturidade fisiológica (AN-MF). Santa Maria, RS.

	Genótipo	
	CEP 52	BRS 177
	Emergência à Espiguetas Terminal (EM-ET)	
Método de cálculo da $f(T)$ e f_{vn}	WE_{Tmm}	WE_{Tmm}
$r_{\max,v1}$	0,0128	0,0134
ω	0,4034	0,6200
Pc	8,589	8,5734
TC_{\min}	0	0
TC_{ot}	19	24
TC_{\max}	35	35
n	1,9	4,2
$X_{0,5}$	18,3	18,7
	Espiguetas Terminal à Antese (ET-AN)	
Método de cálculo da $f(T)$ e f_{vn}	WE_{Tmm}	WE_{Tmm}
$r_{\max,v2}$	0,026	0,0310
ω	0,4034	0,6200
Pc	8,589	8,5734
TC_{\min}	4	4
TC_{ot}	24	30
TC_{\max}	40	40
	Antese à Maturidade Fisiológica (AN-MF)	
Método de cálculo da $f(T)$ e f_{vn}	WE_{Tmm}	WE_{Tmm}
$r_{\max,r}$	0,0637	0,0671
TC_{\min}	8	8
TC_{ot}	30	30
TC_{\max}	40	40

Modificações propostas no modelo de Amir; Sinclair (1991a,b)

No modelo original de Amir; Sinclair (1991b) a $PS2$ é considerada constante do início ao final do ciclo de desenvolvimento da cultura. Para simular o crescimento radicular e, assim modificar a $PS2$, foi utilizada a mesma equação de crescimento radicular (equação 45) proposta para o modelo de Campbell; Diaz (1988), sendo que o valor de $PS2$ é de valor igual ao RD da equação 45. O número final de folhas é um dado necessário tanto para o modelo original de Amir; Sinclair (1991a,b) quanto para o modelo modificado. O número final de folhas pode variar de acordo com o genótipo e a época de semeadura. Assim, o número final

de folhas foi de 10 folhas para o genótipo CEP 52 na data de semeadura de 07/07/2006 , 10 folhas para o genótipo BRS 177 na data de semeadura de 04/09/2006 e de 11 folhas para data de semeadura de 18/04/2007. As simulações foram iniciadas na última precipitação pluviométrica (P) acima de 30 mm, ocorrida antes da semeadura, e todo o perfil de solo foi considerado em capacidade de campo na data de início da simulação. As simulações começaram no dia 25/06/2006 (P = 30,7 mm), 11/08/2006 (P = 32 mm) e 9/04/2007 (P = 47,3 mm) para as datas de semeadura de 07/07/2006, 04/09/2006 e 18/04/2007, respectivamente.

Análise estatística

A estatística utilizada para avaliar o desempenho das versões original e modificada dos modelos foi a raiz do quadrado médio do erro (RQME), calculada como (JANSSEN; HEUBERGER, 1995):

$$RQME = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - o_i)^2 \right]} \quad (57)$$

em que, s é o valor simulado da FADS, o é o valor observado da FADS e N é o número de observações. Modelos com RQME menores são considerados os melhores. Para análise de correlação entre os dados simulados e observados da FADS foi utilizado o teste não paramétrico de Spearman-R.

Nos modelos com simulação do crescimento radicular, a FADS é dependente da profundidade do sistema radicular em um dado momento. Portanto, para possibilitar a comparação entre dados observados e simulados foi efetuada a média ponderada dos dados observados de conteúdo de água no solo em cada camada, sendo este valor dependente da profundidade do sistema radicular (RD) simulada no dia da coleta das amostras de solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade do solo foi de 1,52, 1,56 e 1,40 g cm⁻³ nas camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm de profundidade. Esses valores de densidade do solo entre 1,40 e 1,56 g cm⁻³ situam-se um pouco acima dos valores de densidade do solo 1,23 e 1,43 g cm⁻³ para o solo da

unidade de mapeamento São Pedro descritos em Galvagni (1998), sendo que a maior densidade do solo em ambos os trabalhos foi verificada na camada de 20-40 cm de profundidade. Os valores de CC entre $0,261\text{cm}^{-3}\text{ cm}^{-3}$ e $0,336\text{ cm}^{-3}\text{ cm}^{-3}$ e PMP entre $0,138\text{ cm}^{-3}\text{ cm}^{-3}$ e $0,184\text{ cm}^{-3}\text{ cm}^{-3}$ calculados pela equação de pedotransferência (URACH, 2007), a partir dos teores de argila do solo São Pedro (GALVAGNI, 1998), são próximos aos verificados por Galvagni (1998) para a unidade de mapeamento São Pedro, indicando que os valores de CC e PMP são apropriados para este estudo.

Os modelos de Campbell; Diaz (1998) e Amir; Sinclair (1991a,b) modificados simulam o crescimento radicular conforme avança o desenvolvimento da planta (Figura 1). Tanto no modelo original quanto no modelo modificado, foi constatado um rápido crescimento radicular inicial e, após a antese a taxa de crescimento radicular diminuiu, cessando completamente na maturidade fisiológica.

Os valores da fração de água disponível no solo (FADS) observados e simulados pelo modelo de Campbell; Diaz (1988), versão original e modificada, para as profundidades máximas do sistema radicular (RDmax) de 30 e 60 cm nas três datas de semeadura com emergência em 17/07/2006, 13/09/2006 e 25/04/2007 estão apresentados nas Figuras 2, 3 e 4. O menor valor de RQME (0,135) para o modelo de Campbell; Diaz na data de semeadura com emergência no dia 17/07/2006 foi obtido utilizando o modelo de crescimento radicular original e RDmax de 30 cm e, o maior valor de RQME (0,246) foi obtido utilizando o modelo modificado e RDmax de 60 cm (Figura 2). Para a data de semeadura com emergência dia 13/09/2007 o menor valor de RQME (0,330) pelo modelo de Campbell; Diaz (1988) foi obtido utilizando-se o modelo de crescimento radicular modificado com RDmax de 30 cm e, o maior valor de RQME (0,367) foi obtido utilizando-se o modelo original com RDmax de 60 cm (Figura 3). Para a data de semeadura com emergência dia 25/04/2007 o menor valor de RQME (0,358) foi simulado pelo modelo de Campbell; Diaz (1988) utilizando o modelo de crescimento radicular modificado com RDmax de 30 cm e, o maior valor de RQME (0,396) foi simulado com o modelo Campbell; Diaz (1988) utilizando o modelo de crescimento radicular original com RDmax de 60 cm (Figura 4).

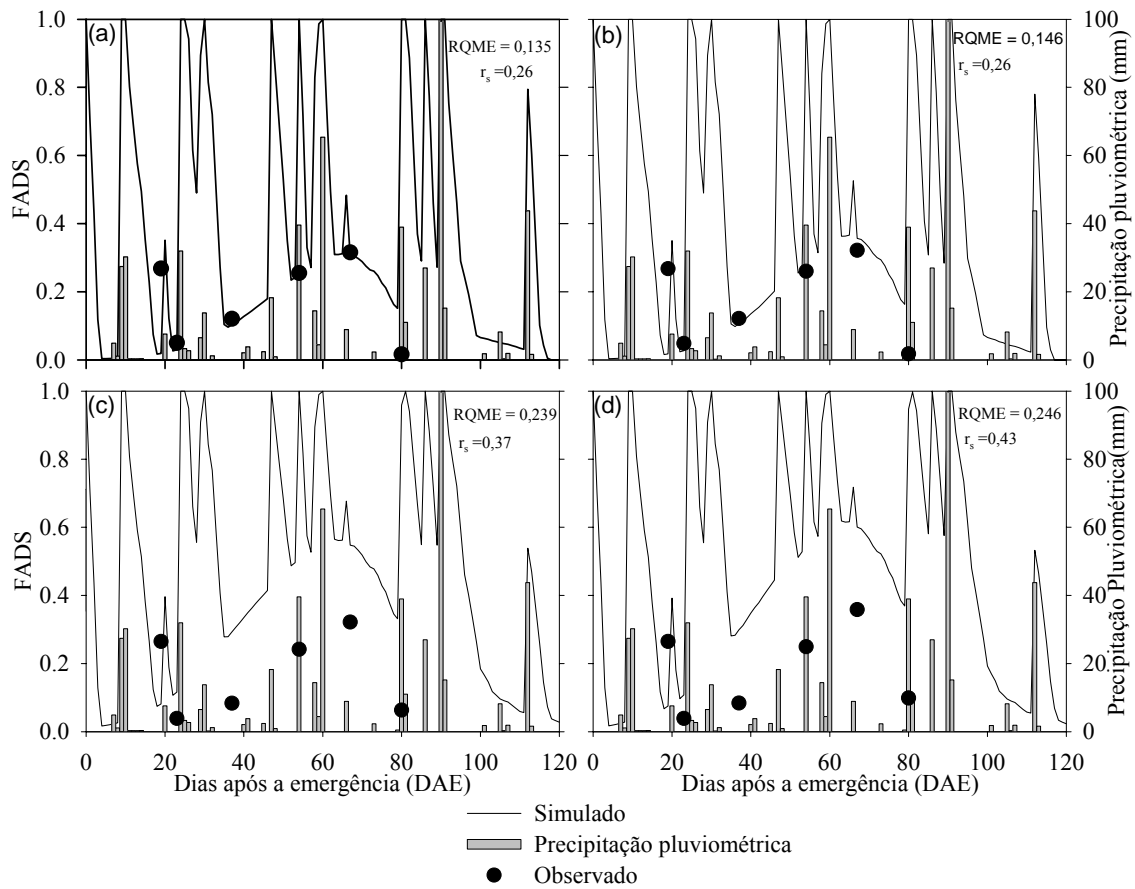


Figura 2 - Fração de água disponível no solo (FADS) observada e simulada para o perfil de solo com crescimento radicular pelo modelo de Campbell; Diaz (1988) com RDmax de 0,30m com o modelo original (a) e modificado (b) e para RDmax de 0,60 m com o modelo original (c) e modificado (d) e precipitação pluviométrica (P, mm), para a data de semeadura de 07/07/2006 com emergência dia 17/07/2006 para o genótipo CEP 52. Santa Maria, RS. RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro, r_s = teste de correlação não paramétrico de Spearman R.

Utilizando-se o teste não-paramétrico de correlação Spearman R para o modelo de Campbell; Diaz (1988) a menor correlação entre dados simulados e observados ($r_s = 0,26$, NS; $n = 6$), para a data de semeadura com emergência dia 17/07/2006, foi obtida com RDmax de 30 cm tanto com o modelo de crescimento radicular original quanto com o modificado, e a maior correlação ($r_s = 0,43$; NS; $n = 6$) foi obtida com o com crescimento do sistema radicular modificado utilizando RDmax de 60 cm (Figura 2).

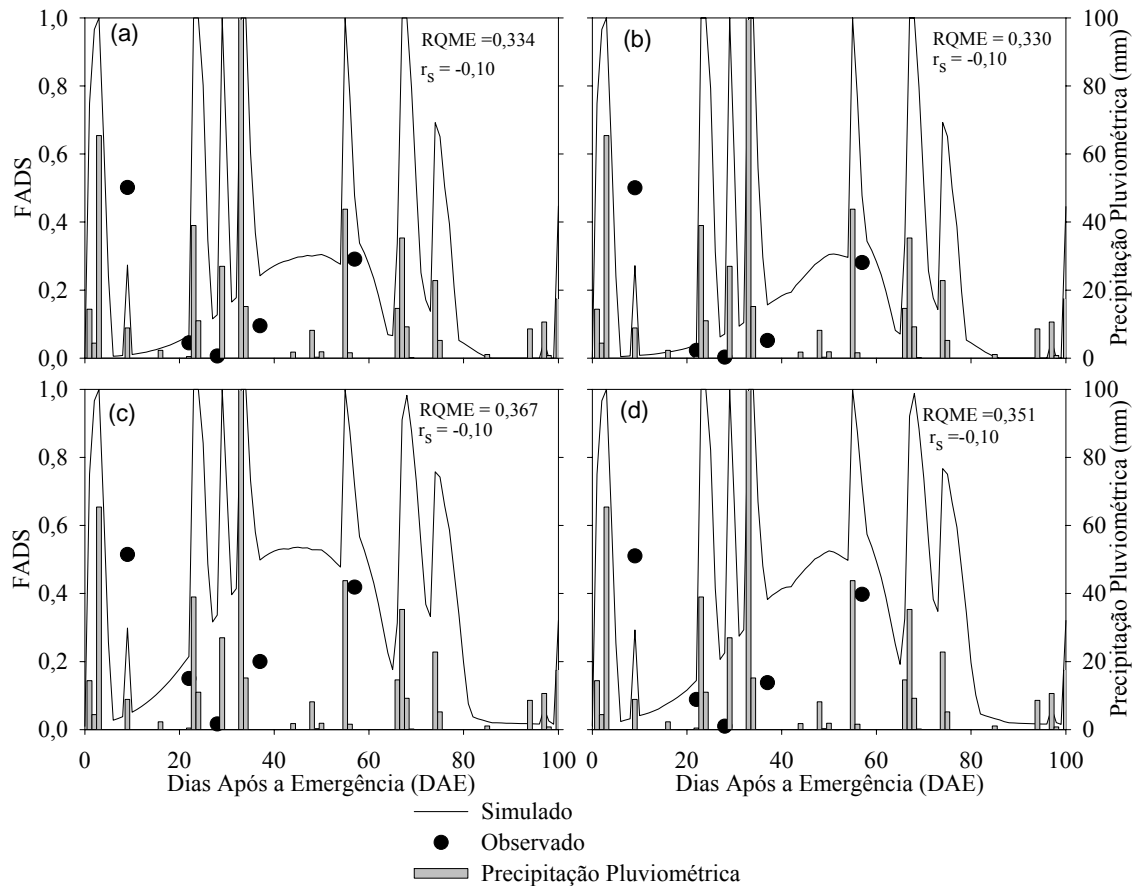


Figura 3 - Fração de água disponível no solo (FADS) observada e simulada para o perfil de solo com crescimento radicular pelo modelo de Campbell; Diaz (1988) com RDmax de 0,30m com o modelo original (a) e modificado (b) e para RDmax de 0,60 m com o modelo original (c) e modificado (d) e precipitação pluviométrica (P, mm) para a data de semeadura de 04/09/2006 com emergência em 13/09/2006 para o genótipo BRS 177. Santa Maria, RS. RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro, r_s = teste de correlação não paramétrico de Spearman R.

As simulações com o modelo de Campbell; Diaz (1988) para a data de semeadura com emergência dia 13/09/2006 não apresentaram boa correlação para nenhum dos modelos testados (Figura 3). Sendo que, a maior correlação para o modelo de Campbell; Diaz (1988) na data de semeadura com emergência dia 25/04/2007, foi obtida para a RDmax de 60 cm, com crescimento do sistema radicular modificado (0,94; $p < 0,05$; $n = 11$) e a menor correlação com RDmax de 60 cm com o modelo de crescimento radicular original ($r_s = 0,86$; $p < 0,05$; $n = 11$).

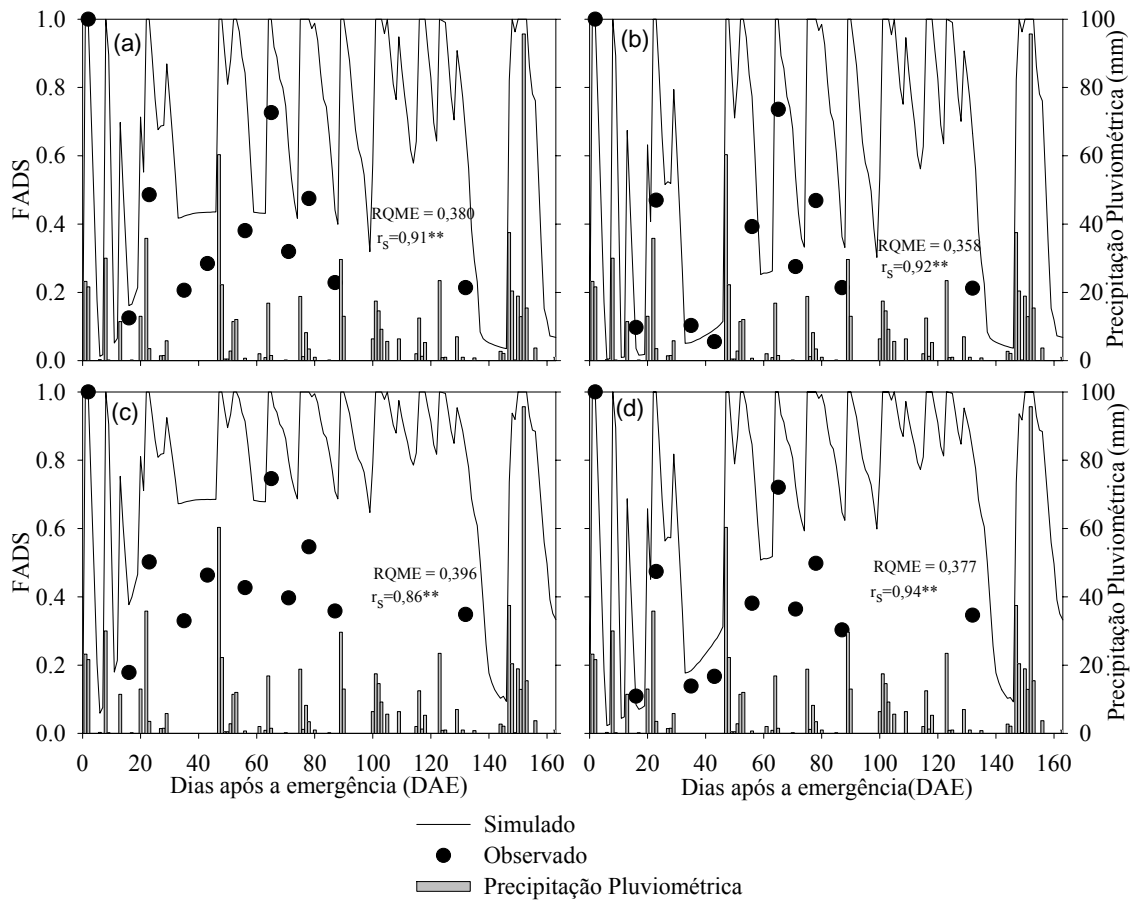


Figura 4 - Fração de água disponível no solo (FADS) observada e simulada para o perfil de solo com crescimento radicular pelo modelo de Campbell; Diaz (1988) com RDmax de 0,30m com o modelo original (a) e modificado (b) e para RDmax de 0,60 m com o modelo original(c) e modificado (d) e precipitação pluviométrica (P, mm), para a data de semeadura de 18/04/2007 com emergência dia 25/04/2007 para o genótipo BRS 177. Santa Maria, RS. RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro, r_s = teste de correlação não paramétrico de Spearman R. **significativo em nível de 5% de probabilidade de erro.

Nas Figuras 5, 6 e 7 são apresentados os valores de fração de água disponível no solo (FADS) observados e simulados pelo modelo Amir; Sinclair (1991a,b) com o modelo original para as profundidades (PS2) de 30 e 60 cm e, com o modelo de desenvolvimento e crescimento radicular modificados para RDmax de 30 e 60 cm, para as datas de semeadura com emergência em 17/07/2006, 13/09/2006 e 25/04/2007, respectivamente. Para a data de semeadura de 17/07/2006 o menor valor de RQME (0,111) foi obtido para a profundidade de 30 cm utilizando o modelo modificado e, o maior valor de RQME (0,370) foi obtido para a profundidade de 60 cm, com o modelo original (Figura 5).

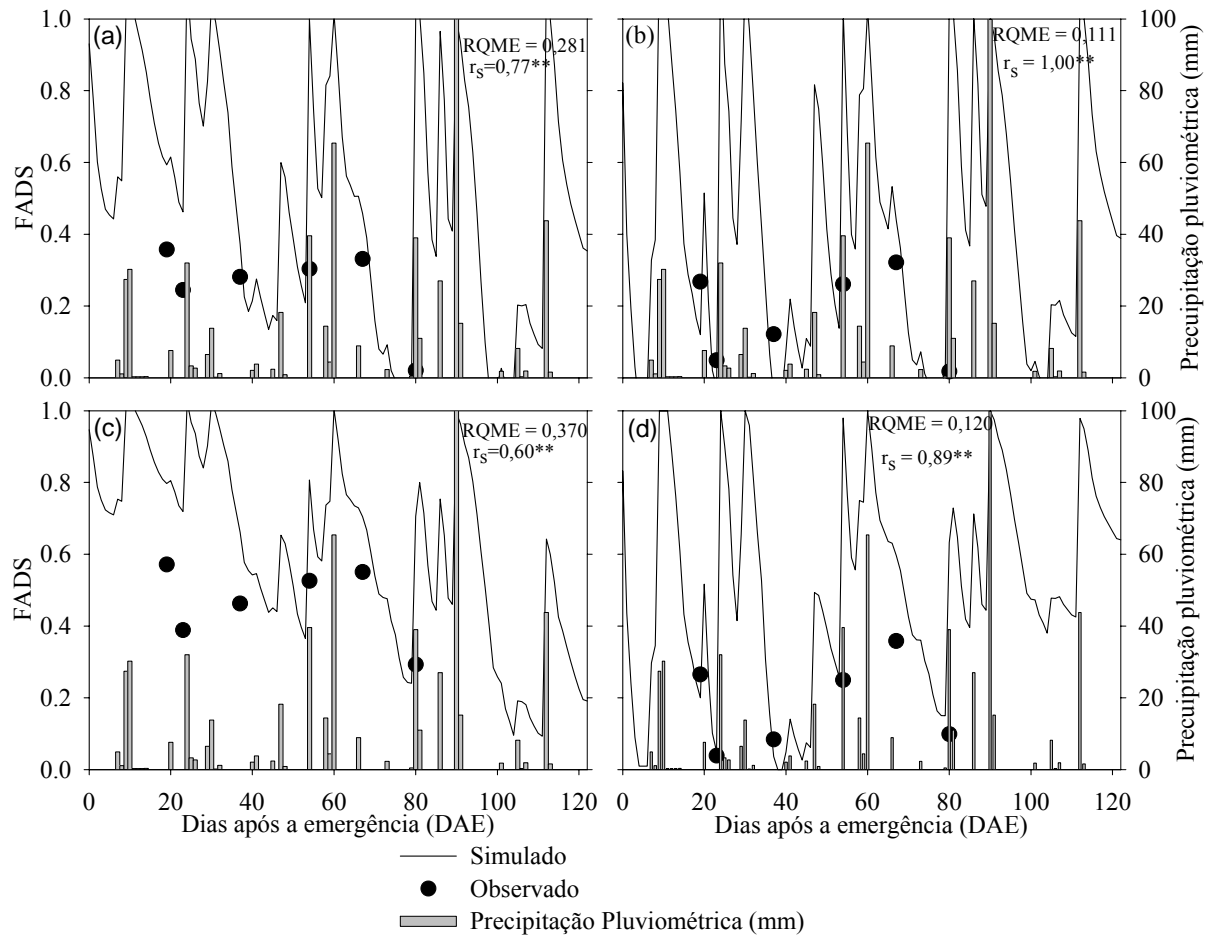


Figura105 - Fração de água disponível no solo (FADS) observada e simulada pelo modelo de Amir; Sinclair (1991a,b) para PS2 (profundidade total de solo explorado pelo sistema radicular) de 0,30m com o modelo original (a) e RDmax (profundidade máxima do sistema radicular) de 0,30m com o modelo de desenvolvimento modificado e com modelo decrescimento radicular (b) e para PS2 de 0,60m com o modelo original (c) e RDmax de 0,60m com o modelo de desenvolvimento modificado e com o modelo de crescimento radicular (d) e precipitação pluviométrica (P, mm), para a data de semeadura de 07/07/2006 com emergência dia 17/07/2006 para o genótipo CEP 52. Santa Maria, RS. RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro, r_s = teste de correlação não paramétrico de Spearman R. **significativo em nível de 5% de probabilidade de erro.

O modelo original de Amir; Sinclair (1991a,b), na data de semeadura com emergência dia 13/09/2006, apresentou o menor valor de RQME (0,316) para a profundidade de 60 cm e, o maior valor de RQME (0,412) foi obtido para a profundidade de 30 cm (Figura 6). Para a data com emergência no dia 25/04/2007 o menor valor de RQME (0,234) com o modelo modificado de Amir; Sinclair (1991a,b) foi obtido para a profundidade de 60 cm e, o maior valor de RQME (0,326) foi obtido para a profundidade de 30 cm utilizando o modelo

original (Figura 7).

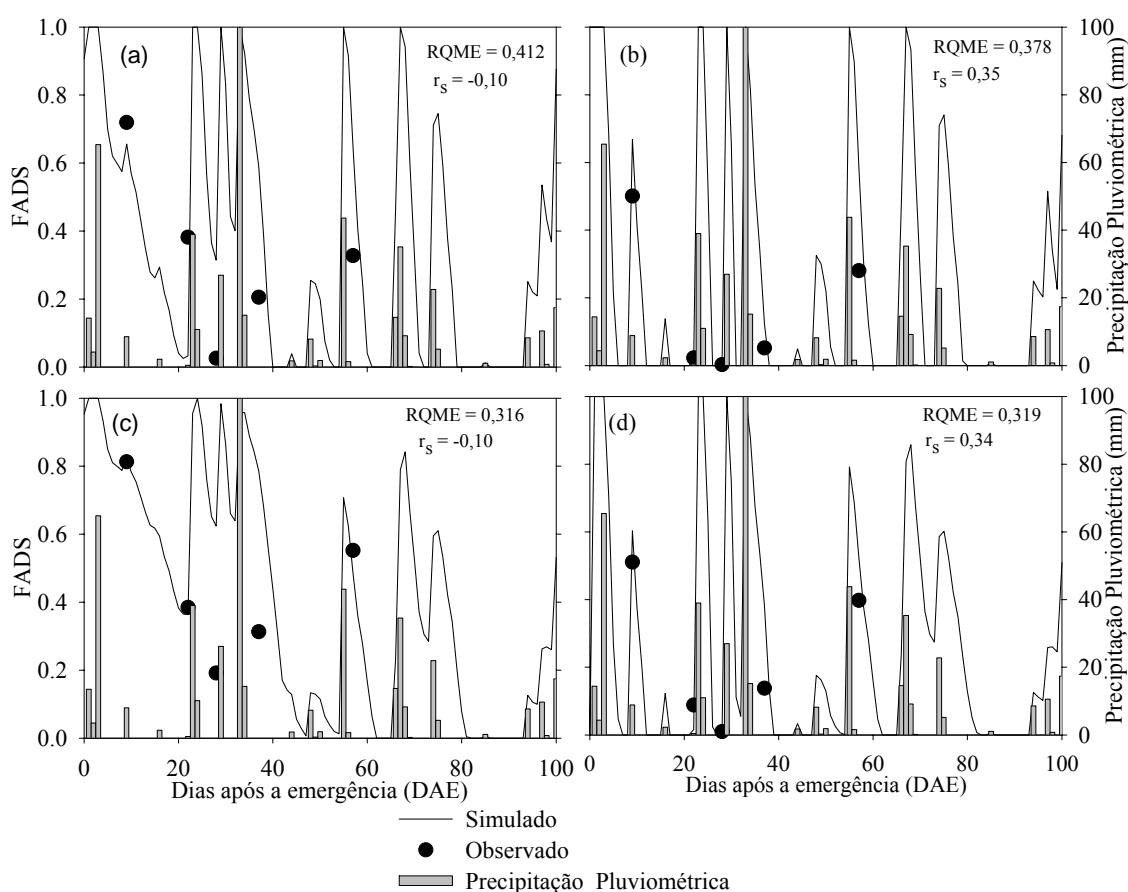


Figura 6 - Fração de água disponível no solo (FADS) observada e simulada pelo modelo de Amir; Sinclair (1991a,b) para PS2 (profundidade total de solo explorado pelo sistema radicular) de 0,30m com o modelo original (a) e RDmax (profundidade máxima do sistema radicular) de 0,30m com o modelo de desenvolvimento modificado e com modelo decrescimento radicular (b) e para PS2 de 0,60m com o modelo original (c) e RDmax de 0,60m com o modelo de desenvolvimento modificado e com o modelo de crescimento radicular (d) e precipitação pluviométrica (P, mm), para a data de semeadura de 04/09/2006 com emergência dia 13/09/2006 para o genótipo BRS 177. Santa Maria, RS. RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro, r_s = teste de correlação não paramétrico de Spearman R.

Ainda com o modelo de Amir; Sinclair (1991a,b), na data de semeadura com emergência dia 17/07/2006, a maior correlação entre a FADS simulada e observada ($r_s = 1,00$; $p < 0,05$, $n = 6$), foi obtida com RDmax de 30 cm com o modelo modificado e, a menor correlação ($r_s = 0,60$; $p < 0,05$, $n = 6$), foi obtida utilizando RDmax de 0,60 m com o modelo original (Figura 5). De maneira similar ao modelo de Campbell; Diaz (1988), para a data de semeadura com emergência dia 13/09/2006, a simulação da FADS pelo modelo de Amir; Sinclair (1991a,b), não apresentou boa correlação para nenhum dos modelos testados

(Figura 6). Porém, com os modelos de Amir; Sinclair (1991a,b) modificados, com RDmax de 30 e 60 cm, as correlações pelo teste não paramétrico de Spearman R foram superiores ($r_s = 0,35$ e $r_s = 0,34$, respectivamente) aos modelos originais ($r_s = -0,10$). Para o modelo de Amir; Sinclair (1991a,b) a maior correlação ($r_s = 0,88$; $p < 0,05$; $n = 11$) pelo teste de Spearman R, para a data de semeadura com emergência no dia 25/04/2007, foi obtida para a RDmax de 60 cm com o modelo modificado e, a menor correlação ($r_s = 0,72$; $p < 0,05$; $n = 11$) foi obtida com PS2 de 60 cm com o modelo original (Figura 7).

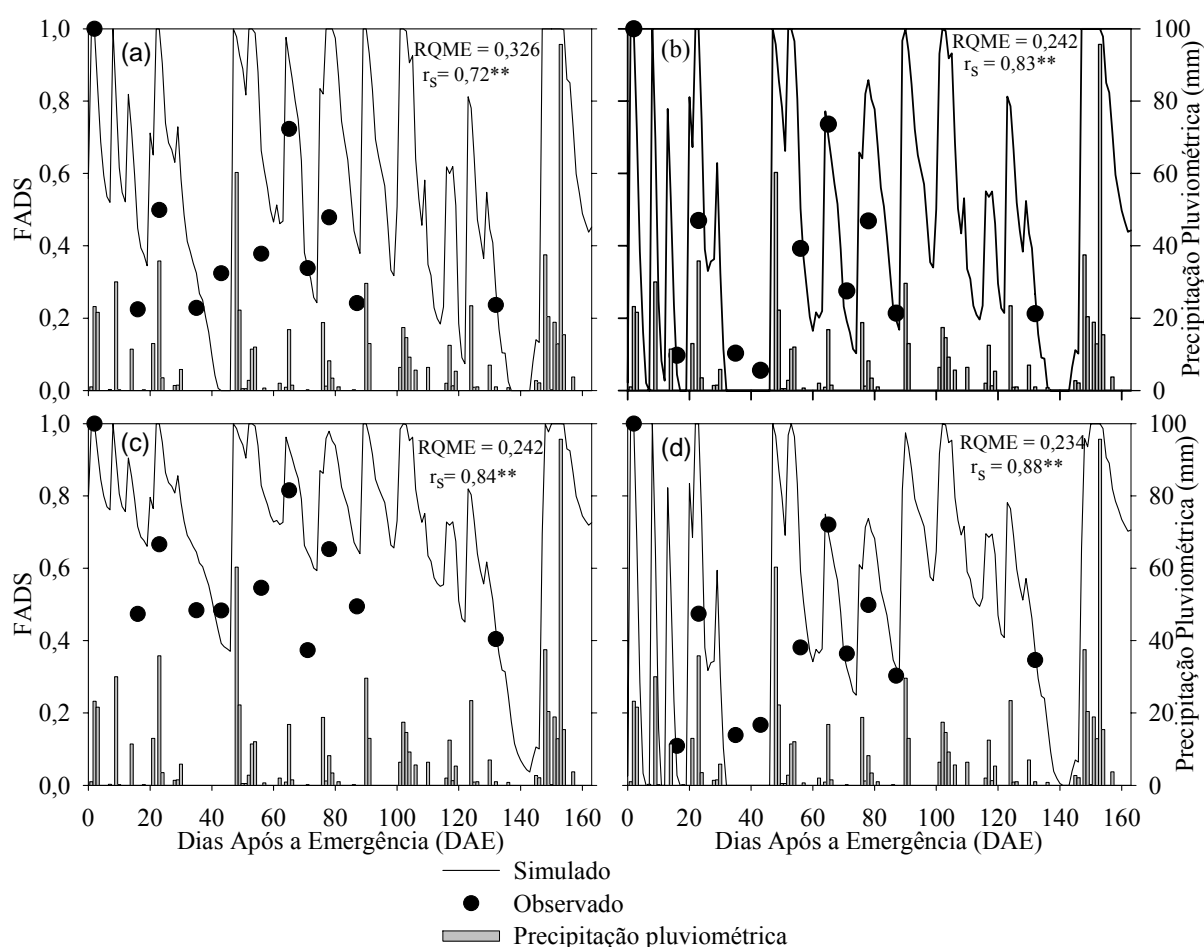


Figura 7 - Fração de água disponível no solo (FADS) observada e simulada pelo modelo de Amir; Sinclair (1991a,b) para PS2 (profundidade total de solo explorado pelo sistema radicular) de 0,30m com o modelo original (a) e RDmax (profundidade máxima do sistema radicular) de 0,30m com o modelo de desenvolvimento modificado e com modelo de crescimento radicular (b) e para PS2 de 0,60m com o modelo original (c) e RDmax de 0,60m com o modelo de desenvolvimento modificado e com modelo de crescimento radicular (d) e precipitação pluviométrica (P, mm), para a data de semeadura de 18/04/2007 com emergência dia 25/04/2007 para o genótipo BRS 177. Santa Maria, RS. RQME = Raiz do Quadrado Médio do Erro, r_s = teste de correlação não paramétrico de Spearman R. **significativo em nível de 5% de probabilidade de erro.

Para o modelo de Campbell; Diaz (1988) observa-se que os valores simulados superestimam os valores observados, principalmente, quando se considera um RDmax de 60 cm. No entanto, há uma proximidade maior entre os valores simulados e observados quando se utiliza a RDmax de 30 cm, tanto para o modelo original quanto para o modelo modificado. Este fato pode ser melhor evidenciado na data de semeadura com emergência no dia 17/07/2006 (Figura 2).

Para o modelo de Amir; Sinclair (1991a,b) a profundidade do sistema radicular de 30 cm e a utilização do modelo de desenvolvimento da planta, taxa de aparecimento de folhas e de crescimento radicular não linear, possibilitaram melhor correlação e menor RQME para a data de semeadura com emergência no dia 17/07/2006, e a segunda maior correlação e o segundo menor valor RQME para a data com emergência no dia 25/04/2007. Estes dados sugerem que as modificações no modelo de Amir; Sinclair (1991a,b) possibilitam uma melhor simulação para as condições de clima e solo de Santa Maria, quando comparados ao modelo original de Amir; Sinclair (1991a,b).

Na data de semeadura com emergência dia 17/07/2006, observam-se que três valores de FADS, coletados nos dias 4/10/2006 (21 DAE), 10/10/2006 (27 DAE) e 19/10/2006 (36 DAE), apresentaram valores observados de FADS próximos ao PMP, mesmo com as freqüentes chuvas observadas no período (Figuras 2 e 5). Uma possível explicação para esses valores é que a água proveniente das precipitações ocorridas neste período teve baixa infiltração no perfil do solo. Este fato pode ter sido ocasionado pelo sistema de preparo convencional do solo e a possível compactação do solo na camada de 20-40 cm de solo ocasionada pelos vários anos de sistema convencional (aragens e gradagens) utilizados na área de estudo. Outra possibilidade é que a primeira chuva após a semeadura (65,4 mm no dia 15/09/2006) provocou a formação de uma crosta superficial de solo (selamento superficial) diminuindo a infiltração de água no solo, aumentando o escoamento superficial e conseqüentemente, diminuindo o conteúdo de água observado no solo.

A formação de uma camada compactada entre 20-40 cm também pode provocar a diminuição da penetração do sistema radicular no perfil do solo, mantendo o crescimento radicular restrito aos primeiros centímetros da camada de solo, com poucas raízes atingindo as camadas mais profundas do solo. Isto pode explicar os valores de RQME mais baixos para a RDmax de 30 cm de quando comparado a um RDmax de 60 cm.

O modelo modificado de Campbell; Diaz (1988), apesar de não ter simulado melhor a FADS que o modelo original em algumas situações, pode ser recomendado, pois tem a

vantagem de não ser necessário o conhecimento prévio da data da maturidade fisiológica. Quando se utilizam diferentes datas de semeadura a data da maturidade fisiológica é variável dependendo do genótipo utilizado, fato este que torna difícil o uso do modelo original. Na escolha de um modelo matemático, o critério de operacionalidade, valor biológico dos coeficientes e funções de resposta pode ser preferido ao critério da precisão da simulação, pois o primeiro critério dá ao usuário maior segurança para usar o modelo em regiões distintas das quais o modelo foi desenvolvido.

O modelo modificado de Amir; Sinclair (1991a,b), simulou melhor a FADS do que o modelo original em todas as situações, apresentando menores valores de RQME e maiores valores de correlação pelo teste não paramétrico de Spearman R. Assim, recomenda-se a utilização do modelo Amir; Sinclair (1991a,b) modificado pois, além de simular melhor a FADS, este é mais realista sob o ponto de vista biológico, do que a utilização de uma profundidade constante durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura.

Um exemplo da aplicação de modelos de balanço de água no solo é a utilização destes modelos em conjunto com modelos de crescimento, desenvolvimento e rendimento de culturas. Como o déficit hídrico afeta o crescimento e o desenvolvimento nas mais diferentes regiões agrícolas no mundo (LECOEUR; SINCLAIR, 1996), a determinação do conteúdo de água disponível no solo é importante para o melhor entendimento do sistema solo-planta-atmosfera.

O efeito do déficit hídrico no crescimento e desenvolvimento de plantas de trigo ainda não está bem quantificado. O déficit hídrico em plantas de trigo acelera o desenvolvimento, porém existe plasticidade na resposta em alguns genótipos (BRISSEON et al., 2001). Quando se compara o déficit hídrico no estágio reprodutivo com o vegetativo, normalmente a iniciação do primórdio floral ocorre mais cedo em plantas submetidas a déficit hídrico.

Simulou-se o modelo de balanço de água no solo com o modelo de Amir; Sinclair (1991a,b) modificado com RDmax de 30cm, para a semeadura de trigo realizada no dia 26/10/2005, que foi realizada na área experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria. Este modelo foi escolhido por apresentar baixos valores RQME e elevado valor de correlação pelo teste não paramétrico de Spearman R (Figura 8). Verifica-se que no período compreendido da emergência a maturidade fisiológica, durante o ciclo de desenvolvimento de desenvolvimento da cultura, de um total de 75 dias, 54 dias apresentaram FADS igual a zero, indicando altos níveis de déficit hídrico a que as plantas de trigo estavam submetidas nesta data de semeadura. Houve considerável aceleração no desenvolvimento do trigo, e a hipótese para esse fato pode ter relação com o déficit hídrico.

Isso foi confirmado pela simulação da FADS (Figura 8), ilustrando como um modelo matemático pode auxiliar no teste de hipóteses científicas em experimentos agrícolas.

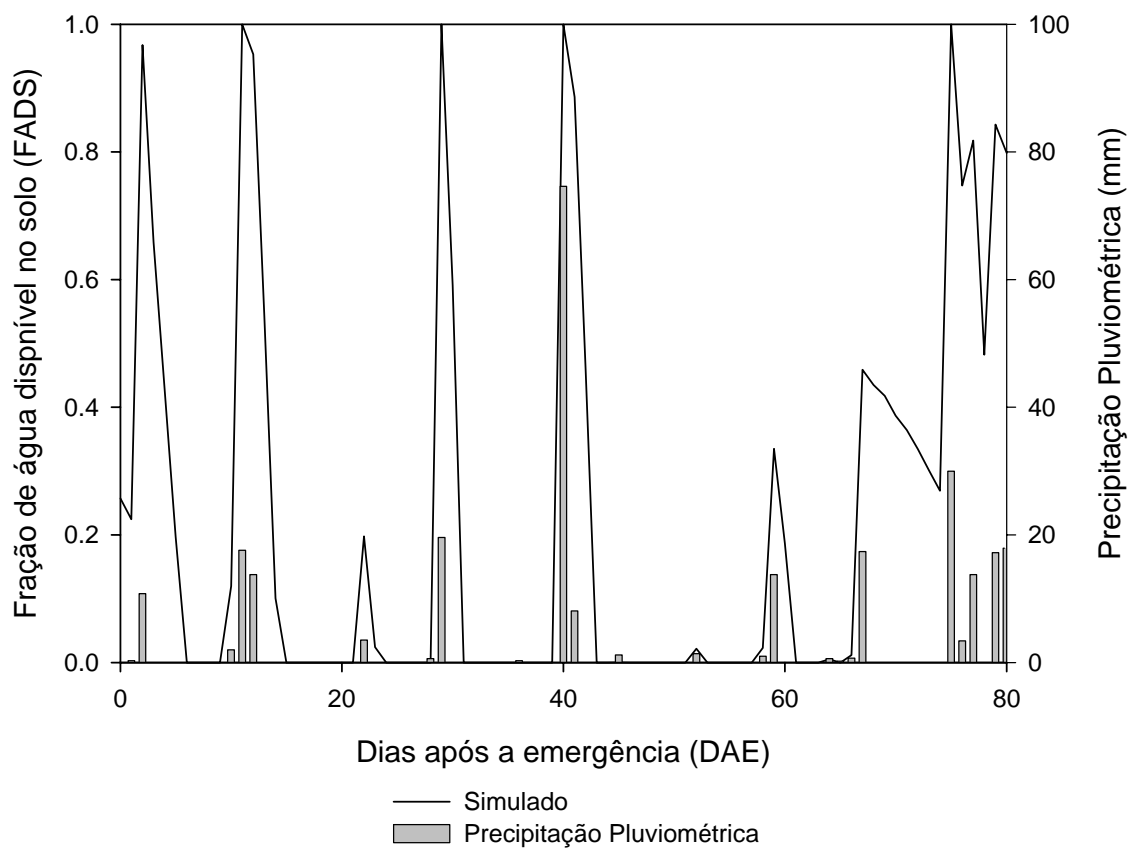


Figura 8 - Fração de água disponível no solo (FADS) observada e simulada pelo modelo de Amir; Sinclair (1991a,b) para RDmax (profundidade máxima do sistema radicular) de 0,30 m com o modelo de desenvolvimento modificado e com modelo de crescimento radicular e precipitação pluviométrica (P, mm), para a data de semeadura de 26/10/2005 com emergência dia 01/11/2005 para o genótipo BRS 177. Santa Maria, RS.

CONCLUSÕES

A substituição da data de maturidade fisiológica do trigo pelo modelo de desenvolvimento WE torna o modelo de balanço de água no solo de Campbell; Diaz (1988) mais realista e com maior possibilidade de desempenho satisfatório em regiões de clima distinto daquele que foi desenvolvido, tornando-o mais robusto e geral.

A substituição do modelo de soma térmica pelo modelo de desenvolvimento WE e a introdução de um modelo de crescimento radicular melhoraram o desempenho do modelo de balanço de água no solo de Amir; Sinclair (1991a,b).

A profundidade máxima do sistema radicular de 30 cm é mais apropriada para simular o balanço de água no solo nas condições de clima e solo de Santa Maria, RS, tanto no modelo de Campbell; Diaz (1988) quanto no modelo de Amir; Sinclair (1991a,b).

REFERÊNCIAS

AHMADI, A.; BAKER, D. A. The effect of water stress on grain filling process in wheat. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 136, n. 3, p. 257-269, 2001.

AMIR, J.; SINCLAIR, T. R. A model of the temperature and solar-radiation effects on spring wheat growth and yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 29, n. 1, p. 47-58, jan./mar. 1991a.

AMIR, J.; SINCLAIR, T. R. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 29, n. 1, p. 59-96, jan./mar. 1991b.

BRISSON, N. et al. Response of five wheat cultivars to early drought in the Pampas. **Agronomie**, Paris, v.21, n. 5, p.483-495, jul./ago. 2001.

CAMPBELL, G. S.; DIAZ, R. Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. In: BIDINGER, F. R.; JOHANSEN, C. **Drought research priorities for the dryland tropics**. Parancheru: ICRISAT, 1988. Cap. 2, p. 15-26.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 400 p.

DARDANELLI, J. L. et al. An empirical model for root water uptake. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 87, n. 1, p. 59-71, jan./mar. 2004.

EITZINGER, J. et al. A simulation study of the effect of soil water balance and water stress on winter wheat production under different climate change scenarios. **Agricultural Water Management**, Columbus, v. 61, n. 3, p. 195-217, jul./set. 2003.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA/SCNLS) – **Manual de métodos de análise de solos**, Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

FARIA, R. T. de; MADRAMOOTOO, C. A. Simulation of soil moisture profiles for wheat in Brazil. **Agricultural Water Management**, Columbus, v. 31, n. 1-2, p. 35 - 49, jan./jun. 1996.

FERREIRA, P. A. et al.. Efeito dos diferentes níveis de tensão de água no solo sobre a produção de trigo. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 20, p. 129-135, 1973.

GALVAGNI, G. A. **Disponibilidade e crescimento de plantas de milho submetidas a déficit hídrico terminal**. 1998. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GONZÁLEZ, F. G.; SLAFER, G. A.; MIRALLES, D. J. Vernalization and photoperiod responses in wheat pre-flowering reproductive phases. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 74, n. 2-3, p. 183-195, abr./set. 2002.

JAMIESON, P. D. et al. Comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 55, n. 1-2, p. 23-44, jan./jun. 1998b.

JANSSEN, P. H. M.; HEUBERGER, P. S. C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 83, n. 1-2, p. 55-56, jan./abr. 1995.

LECOEUR, J.; SINCLAIR, R. T. Field pea transpiration and leaf growth in response to soil water deficits. **Crop Science**, Madison, v. 36, n. 2, p. 331-335, mar./abr. 1996.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 46p.

OKUYAMA, L. A.; FEDERIZZI, L. C.; BARBOSA NETO, J. F. Correlation and path analysis of yield and its components and plant traits in wheat. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n. 6, jan./abr. 2004.

PORTER, J. R.; GAWITH, M. Temperatures and the growth and development of wheat: A review. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 10, n. 1, p. 23-36, jan. 1999.

RITCHIE, J. T. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 58, n. 1, p. 81-86, 1981.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, set./dez. 1998.

SILVA, J. C. et al. Simulação para determinação das épocas de semeadura com menor risco de estresse hídrico para o feijão na região central do estado do Rio Grande do Sul. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 2, p. 188-197, abr./jul. 2006.

SLAFER, G. A.; RAWSON, H. M. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a reexamination of some assumptions made by physiologists and modellers. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v.21, n. 4, p. 393-426, abr. 1994.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da. Efeitos do sistema de prepare na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 83-91, jan. 1999.

STRECK, N. A. Do we know how plants sense a drying soil? **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 2, n. 34, p.581-584, mai./set. 2004.

STRECK, N. A.; WEISS, A.; BAENZIGER, P. S. A generalized vernalization response function for winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n. 1, p. 155-159, jan./fev. 2003a.

STRECK, N. A. et al. Improving predictions of developmental stages in winter wheat. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 115, n. 3-4, p. 139-150, jul./dez. 2003b.

TANNER, C. B.; SINCLAIR, T. R. Efficient water use in crop production: research or re-research? Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. In: TAYLOR, H. M.; JORDON, W. R.; SINCLAIR, T.R. **Limitations to Efficient Water use in crop production**, America Society of Agronomy, p. 1-27, 1983.

URACH, F. L. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação**. 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, Essex, v. 58, n. 1, p. 1-24, jan. 1998.

ZADOKS, J. C.; CHANG, T. T; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, Oxford, v. 14, n. 6, p. 415-421, nov./dez. 1974.

3 CONCLUSÕES GERAIS

O genótipo BRS Louro não é sensível à vernalização e o genótipo BRS Tarumã é fortemente sensível à vernalização, enquanto os genótipos BRS 177, CEP 51, CEP 52 e Nova Era apresentam sensibilidade intermediária a vernalização.

A função Morgan-Mercer-Flodin pode ser usada como função de resposta à vernalização em modelos de simulação do desenvolvimento de genótipos usados no sul do Brasil com distintos requerimentos em vernalização.

O modelo WE modificado por Streck et al. (2003) simula melhor o desenvolvimento do trigo quando são usadas as temperaturas mínimas e máximas diárias para calcular as funções de resposta a temperatura ($WE_{T_{mm}}$), quando comparado aos modelos que calculam as funções de resposta a temperatura com a temperatura média diária do ar ($WE_{T_{media}}$) ou quando utilizam-se oito temperaturas diárias do ar estimadas a partir das temperaturas mínima e máxima do ar (WE_{TCM}).

Para os genótipos BRS Louro, BRS 177, CEP 51, CEP 52 e Nova Era a simulação do desenvolvimento com o modelo de WE é melhor com valores maiores de temperaturas cardinais ótima e máxima ($TC_{ot,max}$) do que para o genótipo BRS Tarumã ($TC_{original}$).

Os genótipos de trigo de primavera BRS Louro, BRS 177, CEP 51, CEP 52 e Nova Era são sensíveis ao fotoperíodo e, com exceção da BRS Louro, tem alguma resposta a vernalização, mas não obrigatória.

O genótipo BRS Tarumã tem comportamento típico de trigo de inverno, sendo sensível ao fotoperíodo e necessita obrigatoriamente de temperaturas vernalizantes para completar seu ciclo de desenvolvimento.

Foi possível adaptar o modelo WE modificado por Streck et al. (2003) para os genótipos de trigo utilizados no sul do Brasil.

A substituição da data de maturidade fisiológica do trigo pelo modelo de desenvolvimento WE torna o modelo de balanço de água no solo de Campbell; Diaz (1988) mais realista e com maior possibilidade de desempenho satisfatório em regiões de clima distinto daquele em que foi desenvolvido, tornando-o mais robusto e geral.

A substituição do modelo de soma térmica pelo modelo de desenvolvimento WE e a introdução de um modelo de crescimento radicular melhoraram o desempenho do modelo de balanço de água no solo de Amir; Sinclair (1991a,b).

A profundidade máxima do sistema radicular de 30 cm é mais apropriada para simular o balanço de água no solo nas condições de clima e solo de Santa Maria, RS, tanto no modelo de Campbell; Diaz (1988) quanto no modelo de Amir; Sinclair (1991a,b).

4 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Durante a realização deste trabalho, foram encontradas algumas dificuldades e incertezas na modelagem do desenvolvimento do trigo, que podem ser utilizadas como recomendações para futuras pesquisas. A modelagem tem como objetivo simular a realidade através de funções matemáticas. Porém, para que as funções matemáticas funcionem de maneira realista, é necessário o conhecimento básico das respostas dos genótipos de trigo ao ambiente. Através de ensaios o melhoramento busca genótipos que sejam adaptados a um determinado local.

A maioria dos genótipos de trigo utilizada no Brasil possui pouca sensibilidade ao fotoperíodo e vernalização. Porém, é possível que essas baixas exigências sejam suficientes para influenciar a duração do ciclo de desenvolvimento. Assim, uma caracterização que possibilite uma maior abrangência de genótipos de trigo pode ser necessária. Uma maneira é agrupar genótipos de acordo com as suas exigências em vernalização e fotoperíodo.

Em plantas de trigo que apresentam sensibilidade a vernalização, outro fator que pode influenciar o desenvolvimento é a desvernalização. Porém, o tempo de exposição a temperaturas altas e a duração destas para que ocorra a desvernalização ainda não apresentam consenso entre pesquisadores. Além disso, a desvernalização e suas respectivas temperaturas cardinais podem variar com o genótipo, fase do desenvolvimento que a planta se encontra e número de dias de vernalização que a planta foi submetida.

O desenvolvimento de plantas de trigo é controlado por vários genes. Alguns destes genes promovem o desenvolvimento vegetativo e reprimem o reprodutivo, porém outros agem de maneira contrária. Para possibilitar um melhor entendimento do mecanismo que desencadeia a fase reprodutiva é importante a caracterização destes genes. Para que isto ocorra é necessário que geneticistas e modeladores atuem em conjunto, quantificando as respostas de um determinado genótipo (ou genes envolvidos) ao ambiente, melhorando a estimativa da data de ocorrência dos estágios de desenvolvimento a partir de coeficientes com significado biológico. Assim, será possível selecionar os genótipos com características específicas para cada local e época de semeadura.

Como a resposta a fatores ambientais pode diferir dependendo da fase do desenvolvimento em que a planta se encontra, uma possível alternativa seria o melhoramento atuar no sentido de aumentar a sensibilidade ao fotoperíodo durante a fase de espiguetas

terminal à antese, aumentando a duração dessa. Pois, uma maior duração da fase de espiguetas terminal a antese pode promover o aumento no número de espiguetas férteis e, conseqüentemente, um aumento no potencial produtivo.

A temperatura é o principal fator ambiental que determina o crescimento, o desenvolvimento das plantas e a produção agrícola. Para quantificar o desenvolvimento de uma planta é necessário que as temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima sejam conhecidas. Com os dados obtidos neste trabalho foi possível constatar que as temperaturas cardinais ótima e máxima para o desenvolvimento, para os genótipos de trigo utilizados neste estudo, são superiores àquelas encontradas na literatura. Assim, um estudo que quantifique as temperaturas cardinais para genótipos brasileiros, com ciclo de desenvolvimento distinto, auxiliaria na elaboração de modelos de desenvolvimento mais precisos e confiáveis.

Além dos fatores ambientais principais (temperatura e fotoperíodo), existem outros fatores abióticos que influenciam a duração do ciclo de desenvolvimento. Dentre esses o estresse hídrico parece ser o principal. Não foram encontradas na literatura funções de resposta de desenvolvimento do trigo ao estresse hídrico consistentes. Parte da inconsistência parece ser procedente da alta plasticidade do trigo, em que diferentes genótipos respondem de maneira diferente as condições de água no solo. A maioria dos trabalhos encontrados na literatura não estuda as diferentes intensidades, duração e época de ocorrência do estresse hídrico sobre o desenvolvimento, não possibilitando uma inferência precisa do stress hídrico sobre o desenvolvimento do trigo.

Para determinar a intensidade do estresse hídrico e a quantidade de água disponível no solo para as plantas também é necessário o conhecimento da profundidade explorada pelo sistema radicular. Um modelo que simule o crescimento radicular levando em consideração as propriedades físicas e a disponibilidade de água no solo pode melhorar a estimativa do balanço de água disponível no solo para as plantas, mas ainda não é disponível.

5 REFERÊNCIAS

AHMADI, A.; BAKER, D. A. The effect of water stress on grain filling process in wheat. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 136, n. 3, p. 257-269, 2001.

AMASINO, R. Vernalization, competence, and the epigenetic memory of winter. **The Plant Cell**, Rockville, v. 16, n. 10, p. 2553–2559, out. 2004.

AMIR, J.; SINCLAIR, T. R. A model of the temperature and solar-radiation effects on spring wheat growth and yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 29, n. 1, p. 47-58, jan./mar. 1991a.

AMIR, J.; SINCLAIR, T. R. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 29, n. 1, p. 59-96, jan./mar. 1991b.

BERG, M. van den; DRIESSEN, P. M.; RABBINGE, R. Water uptake in crop growth models for land use systems analysis. II. Comparison of three simple approaches. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 148, n. 3, p. 233–250, mai./jun. 2002.

BLOMBÄCK, K.; STÄHLI, M.; ECKERSTEN, H. Simulation of water and nitrogen flows and plant growth winter wheat stand in central Germany. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.81, n. 1-3, p. 157-167, jan./jul. 1995.

BÖRNER, A. et al. Associations between geographical origin and morphological characters in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant Genetic Resources**, Cambridge, v. 3, n. 3, p. 360-372, jul./set. 2005.

BOYER, J. S. Plant productivity and environment. **Science**, Washington, v. 218, n. 4571, p. 443-448, out. 1982.

BRISSON, N. et al. Response of five wheat cultivars to early drought in the Pampas. **Agronomie**, Paris, v.21, n. 5, p.483-495, jul./ago. 2001.

BROOKING, I. R. Temperature response of vernalization in wheat: A developmental analysis. **Annals of Botany**, London, v. 78, n. 4, p. 507-512, abr. 1996.

BROOKING, I. R.; JAMIESON, P. D. Temperature and photoperiod response of vernalization in near-isogenic lines of wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.79, n. 1,

p.21-38, jan./mar. 2002.

BROOKING, I. R.; JAMIESON, P. D.; PORTER, J. R. The influence of daylength on final leaf number in spring wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 41, n. 3, p.155-165, jul./set. 1995.

CAMPBELL, G. S.; DIAZ, R. Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. In: BIDINGER, F. R.; JOHANSEN, C. **Drought research priorities for the dryland tropics**. Parancheru: ICRISAT, 1988. Cap. 2, p. 15-26.

CAO, W.; MOSS, D. N. Daylength effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. **Crop Science**, Madison, v. 29, n. 4, p. 1021-1025, jul./ago. 1989.

_____. Modelling phasic development in wheat: a conceptual integration of physiological components. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 129, n. 2, p. 163-172, 1997.

CARROLL, J. E.; BERGSTROM, G. C.; GRAY, S. M. Assessing the resistance of winter wheat to wheat spindle streak mosaic bymovirus. **Canadian Journal of Plant Pathology**, Ottawa, v. 52, n. 4, p.465-470, out./dez. 2002.

CHOUDHURY, B. J. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 216, n. 1-2, p. 99–110, 1999.

CHUJO, H. Difference in vernalization effect in wheat under various temperatures. **Proceedings of the Crop Science Society of Japan**, v. 35, p. 177-186, 1966.

CICHOTA, R.; LIER, Q. de J. van. Avaliação no campo de um TDR segmentado para a estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n.1, p.72-78, jan./abr. 2004.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 400 p.

CONAB. **Safras – Grãos**: Avaliação da Safra Agrícola 2007/2008 – Segundo Levantamento de Intenção de Plantio – Novembro/2007. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/estudo_safra.pdf> . Acesso em: 18 nov. 2007.

CRAUFURD, P. Q.; CARTWRIGHT, P. M. Effect of Photoperiod and Chlormequat on Apical Development and Growth in a Spring Wheat (*Triticum aestivum*) Cultivar. **Annals of Botany**, London, v. 63, n. 5, p. 515-525, mai. 1989.

CUNHA, G. R. et al. Índice de resposta à vernalização em trigos sul-brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 29-33, 1998.

DARDANELLI, J. L. et al. An empirical model for root water uptake. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 87, n. 1; p. 59–71, jan./mar. 2004.

DUCA, L. J. A. et al. BRS Tarumã - a new, double-purpose wheat cultivar for southern Brazil. **Annual Wheat Newsletter**, Manhattan, v. 52, p. 21-21, 2006.

EHRLER, W. L. et al. Wheat canopy temperature: Relation plant water potential. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, n. 2, p. 251-256, mar./abr. 1978.

EITZINGER, J. et al. A simulation study of the effect of soil water balance and water stress on winter wheat production under different climate change scenarios. **Agricultural Water Management**, Columbus, v. 61, n. 3, p. 195–217, jul./set. 2003.

EKMEKÇI, Y.; TERZIOĞLU, S. Interactive Effects of Vernalization, Day Length and Light Intensity on the Number of Leaves and Flag Leaf Area in Some Wheat Cultivars. **Turkish Journal of Botany**, Ankara, v.22, n.5, p. 303-312, set./out. 1998.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA/SCNLS) – **Manual de métodos de análise de solos**, Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EWERT, F.; PORTER, J.; HONERMEIER, B. Use of AFRCWHEAT2 to predict the development of main stem and tillers in winter triticale and winter wheat in North East Germany. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 5, n. 1-2, p.89-103, jan./jun. 1996.

FARIA, R. T. de; MADRAMOOTOO, C. A. Simulation of soil moisture profiles for wheat in Brazil. **Agricultural Water Management**, Columbus, v. 31, n. 1-2, p. 35 - 49, jan./jun. 1996.

FERREIRA, P. A. et al.. Efeito dos diferentes níveis de tensão de água no solo sobre a produção de trigo. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 20, p. 129-135, 1973.

FLOOD, R. G.; HALLORAN, G. M. Genetics and physiology of vernalization response in wheat. **Advances in Agronomy**, New York, v. 39, n. 1, p. 87-125, 1986.

GALVAGNI, G. A. **Disponibilidade e crescimento de plantas de milho submetidas a déficit hídrico terminal**. 1998. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GERAKIS, A.; ZALIDIS, G. Estimating field-measured, plant extractable water from soil properties: beyond statistical models. **Irrigation and Drainage Systems**, Dordrecht, v. 12, n. 4, p. 311-322, out./dez. 1998.

GONZÁLEZ, F. G.; SLAFER, G. A.; MIRALLES, D. J. Vernalization and photoperiod responses in wheat pre-flowering reproductive phases. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 74, n. 2-3, p. 183-195, abr./set. 2002.

_____. Grain and floret number in response to photoperiod during stem elongation in fully and slightly vernalized wheats. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p.17-27, jan./mar. 2003.

HAUN, J. R. Determination of wheat growth-environments relationships. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, n. 5, p. 813-816, set./out. 1973.

IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis: summary for policymakers**. Geneva: IPCC, 2007. 18 p. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2008.

JAME, Y. W.; CUTFORTH, H. W. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 124, n. 3-4, p. 207-218, jul./dez. 2004.

JAMIESON, P. D. et al. Making sense of wheat development: a critique of methodology. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 55, n. 1, p. 117-127, jan./mar. 1998a.

JAMIESON, P. D. et al. Comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 55, n. 1-2, p. 23-44, jan./jun. 1998b.

JANSSEN, P. H. M.; HEUBERGER, P. S. C. Calibration of process-oriented models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 83, n. 1-2, p. 55-56, jan./abr. 1995.

JEDEL, P. E.; EVANS, L. E.; SCARTH, R. Vernalization responses of a selected group of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 66, n. 1, p. 1-9, jan./fev. 1986.

KIRBY, E. J. M. Co-ordination of leaf emergence and leaf and spikelet primordium initiation in wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 25, n. 1-2, p. 235-264, jan./jun. 1990.

KIRBY, E. J. M. Factors affecting rate of leaf emergence in barley and wheat. **Crop Science**, Madison, v. 35, n. 1, p.11-19, jan./mar. 1995.

KIRBY, E. J. M. et al. A study of wheat development in the field: analysis by phases. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 11, n. 1, p. 63-82, jan./mar. 1999.

KIRBY, E. J. M.; WEIGHTMAN, R. M. Discrepancies between observed and predicted growth stages in wheat. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 129, n. 4, p. 379-384, 1997.

LECOEUR, J.; SINCLAIR, R. T. Field pea transpiration and leaf growth in response to soil water deficits. **Crop Science**, Madison, v. 36, n. 2, p. 331-335, mar./abr. 1996.

LEVY, J.; PETERSON, M. L. Responses of spring wheats to vernalization and photoperiod. **Crop Science**, Madison, v.12, n. 4, p.487-492, jul./ago. 1972.

LIMIN, A. E.; FOWLER, D. B. Developmental traits affecting low-temperature tolerance response in near-isogenic lines for the vernalization locus *Vrn-A1* in wheat (*Triticum aestivum* L. em Thell). **Annals of Botany**, Oxford, v. 89, n. 5, p. 579-585, mai. 2002.

LIU, D. L. Incorporating vernalization response functions into an additive phenological model for reanalysis of the flowering data of annual pasture legumes. **Field Crops Research**, Amsterdam, n. 3, v. 101, p. 331-342, jul./set. 2007.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 46p.

MUCHOW, R. C.; SINCLAIR, T. R. Water deficit effects on maize yields modeled under current and "Greenhouse" climates. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, n. 6, p. 1052-1059, nov./dez. 1991.

OKUYAMA, L. A.; FEDERIZZI, L. C.; BARBOSA NETO, J. F. Correlation and path analysis of yield and its components and plant traits in wheat. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n. 6, jan./abr. 2004.

O'LEARY, G. J.; CONNOR, D. J. A simulation model of the wheat crop in response to water and nitrogen supply: I. Model construction. **Agricultural Systems**, London, v. 52, n. 1; p. 1-29, jan. 1996.

ÖZKAN, H. et al. AFLP Analysis of a collection of tetraploid wheats indicates the origin of emmer and hard wheat domestication in Southeast Turkey. **Molecular Biology and Evolution**, v. 19, n. 10, p. 1797-1801, out. 2002.

PANIGRAHI, B.; PANDA, S. N. Field test of a soil water balance simulation model. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 58, n. 2, p. 223-240, abr./jun. 2003.

PENROSE, L. D. J.; MARTIN, R. H.; LANDERS, C. F. Measurement of response to vernalization in Australian wheats with winter habit. **Euphytica**, Wageningen, v. 57, n. 1, p. 9-17, 1991.

PERRY, M. W.; SIDDIQUE, K. H. M.; WALLACE, J. F. Predicting phenological development for Australian wheats, **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 38, n. 5, p. 809-819, set./out. 1987.

PETR, J.; HNILIČKA, F. Changes in requirements on vernalization of winter wheat varieties in the Czech Republic in 1950-2000. **Rostlinná Výroba**, Praha, v. 48, n. 4, p.148-153, abr. 2002.

PORTER, J. R.; GAWITH, M. Temperatures and the growth and development of wheat: A review. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 10, n. 1, p. 23-36, jan. 1999.

PORTER, J. R. et al. An analysis morphological development stages in avalon winter wheat crops with different sowing dates and at ten sites in England and Scotland. **Journal of Agricultural Sciences**, Cambridge, v. 109, n. 1, p. 107-121, 1987.

PRÁŠIL, I.T.; PRÁŠILOVÁ, P.; PÁNKOVÁ, K. Relationships among vernalization, shoot apex development and frost tolerance in wheat. **Annals of Botany**, London, v. 94, n. 3, p. 413-418, mar. 2004.

RAHMAN, M. S.; WILSON, J. H. Determination of spikelet number in wheat. I. Effect of varying photoperiod on ear development. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 28, n. 2, p. 265–274, abr./jun. 1977.

RAWSON, H. M.; ZAJAC, M.; PENROSE, L. D. J. Effect of seedling temperature and its duration of development of wheat cultivars differing in vernalization response. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 57, n. 3, p. 289-300, jul./set. 1998.

REUNIÃO DA COMISSÃO SUL- BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 37, 2005, Cruz Alta. **Indicações técnicas da Comissão Sul- Brasileira de Pesquisa de Trigo: trigo e triticale – 2005**. Cruz Alta: FUNDACEP, 2005. 159 p.

REUNIÃO DA COMISSÃO SUL- BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO, 38, 2007, Passo Fundo. **Informações técnicas para a safra 2007: trigo e triticale**. Passo Fundo: EMBRAPA TRIGO, 2006. 75 p.

RICKMAN, R. W.; WALDMAN, S. E.; KLEPPER, B. MODWht3: A development-driven wheat growth simulation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 2, p. 176-185, mar./abr. 1996.

RIDDELL, J. A.; GRIES, G. A.; STEARNS, W. Development of spring wheat: I. The effect of photoperiod. **Agronomy Journal**, Madison, v. 50, n. 12, p. 735-738, dez. 1958.

RITCHIE, J. T. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 58, n. 1, p. 81-86, 1981.

ROBERTSON, M. J.; BROOKING, I. R.; RITCHIE, J. T. Temperature response of vernalization in wheat: modelling the effect on the final number of main stem leaves. **Annals of Botany**, London, v. 78, n. 4, p. 371-381, abr. 1996.

SAARIKKO, R. A.; CARTER, T. R. Phenological development in spring cereals: response to temperature and photoperiod under northern conditions. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 5, n. 1-2, p. 59 -70, jan./jun. 1996.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, set./dez. 1998.

SCHEEREN, P. L. et al. BRS Guamirim: cultivar de trigo da classe pão, precoce e de baixa estatura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, p. 293-296, fev. 2007.

SIDDIQUE, M. R. B.; HAMID, A.; ISLAM, M. S. Drought stress effects on water relations of wheat. **Botanical Bulletin of Academia Sinica**, Taipei, v. 41, n. 1, p. 35-39, jan./mar. 2000.

SILVA, J. C. et al. Simulação para determinação das épocas de semeadura com menor risco de estresse hídrico para o feijão na região central do estado do Rio Grande do Sul. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 2, p. 188-197, abr./jul. 2006.

SINCLAIR, T. R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. I. Model development. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 15, n. 2, p. 125-141, abr./jun. 1986.

SLAFER, G. A.; ARAUS, J. L. Physiological traits for improving wheat yield under a wide range of conditions. In: SPIERTZ, J. H. J.; STRUIK, P. C.; LAAR, H. H. van. **Scale and complexity in plant systems research: Gene-plant-crop relations**, 2007. p. 147-156.

SLAFER, G. A.; RAWSON, H. M. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a reexamination of some assumptions made by physiologists and modellers. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v.21, n. 4, p. 393-426, abr. 1994.

SNAPE, J. W. et al. Waiting for fine times: genetics of flowering time in wheat. **Euphytica**, Wageningen, v. 119, n. 1-2, p. 185-190, mai. 2001.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM – SAS. Getting started with the SAS® Learning Edition. Cary, NC: **SAS Institute**, 2002. 81p.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da. Efeitos do sistema de prepare na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 83-91, jan. 1999.

STRECK, N. A. A generalized vernalization response function for lily (*Lilium spp.*). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 221-228, jul./dez. 2002.

STRECK, N. A. A vernalization model in onion (*Allium cepa* L.). **Revista Brasileira de Agrocência**, Pelotas, v. 9, n. 2, p. 99-105, mai./set. 2003.

STRECK, N. A. Do we know how plants sense a drying soil? **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 2, n. 34, p.581-584, mai./set. 2004.

STRECK, N. A. et al. Simulating the development of Field grown potato (*Solanum tuberosum* L.). **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 142, n. 1, p. 1-11, jan./mar. 2007.

STRECK, N. A.; WEISS, A.; BAENZIGER, P. S. A generalized vernalization response function for winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n. 1, p. 155-159, jan./fev. 2003a.

STRECK, N. A. et al. Improving predictions of developmental stages in winter wheat. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 115, n. 3-4, p. 139-150, jul./dez. 2003b.

TAIZ, L. The control of flowering. In: TAIZ, L.; ZEIGER, E. (Ed.). **Plant Physiology**. Sunderland: Sinauer Associates, 2002. p. 559-590.

TANNER, C. B.; SINCLAIR, T. R. Efficient water use in crop production: research or re-research? Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. In: TAYLOR, H. M.; JORDON, W. R.; SINCLAIR, T.R. **Limitations to Efficient Water use in crop production**, America Society of Agronomy, p. 1-27, 1983.

URACH, F. L. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação**. 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

XUE, Q. **Phenology and gas exchange in winter wheat (*Triticum aestivum* L.)**. 2000. 128 f. Dissertation (PhD in Agronomy) – School of Natural Resources Sciences, Institut of natural Resources Sciences, University of Nebraska, Lincoln.

XUE, Q.; WEISS, A.; BAENZIGER, P. S. Predicting leaf appearance in field-grown winter wheat: evaluating linear and non-linear models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 175, n. 3, p. 261-270, mai./jun. 2004.

WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, Essex, v. 58, n. 1, p. 1-24, jan. 1998.

WANG, E. et al. Vernalization in wheat I. A model based on the interchangeability of plant age and vernalization duration. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 41, n. 2, p. 91-100, abr./jun. 1995.

WEGEHENKEL, M. Test of a modelling system for simulating water balances and plant growth using various different complex approaches. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 129, n. 1, p. 39–64, jan./mar. 2000.

WENDT, W.; DUCA, L. de J. A. del; CAETANO, V. da R. **Avaliação de cultivares de trigo de duplo propósito, recomendados para cultivo no estado do Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 2 p. (Comunicado Técnico, 137).

WHITE, J. W. From genome to wheat: Emerging opportunities for modeling wheat growth and development. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 25, n. 2, p. 79-88, abr./jun. 2006.

YAN, W.; HUNT, L. A. An Equation for Modelling the Temperature Response of Plants using only the Cardinal Temperatures. **Annals of Botany**, Londres, v. 84, n. 5, p. 607-614, mai. 1999.

YAN, W.; WALLACE, D. H. Simulation and prediction of plant phenology for five crops based on photoperiod X temperature interaction. **Annals of Botany**, Londres, v.81, n. 6, p. 705-716, jun. 1998.

ZADOKS, J. C.; CHANG, T. T; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, Oxford, v. 14, n. 6, p. 415-421, nov./dez. 1974.