

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

**PARÂMETROS E PROBABILIDADES DE IRRIGAÇÃO  
PARA A CULTURA DA SOJA NA REGIÃO CENTRAL  
DO RIO GRANDE DO SUL POR ANÁLISE NUMÉRICA**

**TESE DE DOUTORADO**

**Roberto Trentin**

**Santa Maria, RS, Brasil.**

**2013**



**Parâmetros e probabilidades de irrigação para a cultura da soja  
na região central do Rio Grande do Sul por análise numérica**

**Roberto Trentin**

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. Dr. Arno Bernardo Heldwein**

**Santa Maria, RS, Brasil.**

**2013**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Trentin, Roberto

Parâmetros e probabilidades de irrigação para a cultura da soja na região central do Rio Grande do Sul por análise numérica / Roberto Trentin.-2013.

145 p.; 30cm

Orientador: Arno Bernardo Heldwein

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2013

1. Glycine max (L.) Merrill 2. Função densidade de probabilidade 3. Irrigação 4. Capacidade de armazenamento de água disponível 5. Datas de semeadura I. Heldwein, Arno Bernardo II. Título.

---

© 2013

Todos os direitos autorais reservados a Roberto Trentin. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: UFSM - Av. Roraima nº 1000 – Departamento: Fitotecnia - Santa Maria – RS CEP: 97105-900. Fone (0xx) 55 3217-7080; End. Eletr: robertotrentin@yahoo.com.br

---

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

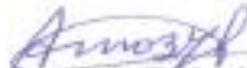
**Parâmetros e probabilidades de irrigação para a cultura da soja na  
região central do Rio Grande do Sul por análise numérica**

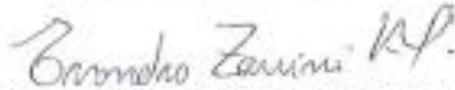
elaborada por

**Roberto Trentin**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

  
Arno Bernardo Heldwein, Dr.  
(Presidente/Orientador)

  
Evandro Zanini Righi, Dr. (UFSM)

  
Sandro Luis Petter Medeiros, Dr. (UFSM)

  
Joel Cordeiro da Silva, Dr. (IFF-SVS)

  
Luciano Streck, Dr. (IFC)

Santa Maria, 22 de fevereiro de 2013.



“Give me a way to accept things  
I cannot change anymore,  
The courage to change the things I can  
And the wisdom to know the difference”  
(Stratovarius, in Know the difference)

## **DEDICO**

Aos meus pais, João e Lídia, pelo amor e dedicação incondicional, pelo incentivo, pelo exemplo de vida. Ao meu irmão, Gustavo pelo incentivo, força e amizade.



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me conduzir com sabedoria nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar o caminho nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.

À Universidade Federal de Santa Maria, por meio do programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Professor Arno Bernardo Heldwein, pela orientação, competência, ensinamentos, estímulo e amizade.

Aos Professores Evandro Zanini Righi e Nereu Augusto Streck, pelas críticas construtivas e sugestões apresentadas.

Agradeço aos membros da banca examinadora, Professores Sandro Petter Medeiros, Joel Cordeiro da Silva (IFF-SVS) e Luciano Streck (IFC) pelas contribuições à Tese.

Ao meu irmão Gustavo Trentin e aos amigos Ivan Carlos Maldaner e Dionéia Daiane Pitol Lucas pelas contribuições e auxílio na correção do trabalho.

Aos Professores Cleber Maus Alberto e Gizelli Moiano de Paula pelas contribuições à modelagem do desenvolvimento da cultura da soja.

Aos professores do programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, pela atenção e ensinamentos transmitidos.

À turma do setor de Agrometeorologia/UFSM, pelos muitos momentos de convivência e companheirismo.

Aos meus amigos Adriano Gonçalves Schommer, Edenir Luís Grimm, Maurício Guerra Bandinelli e André Guareschi pelos momentos de alegria, pela descontração, pelo companheirismo e pela convivência durante o período do doutorado.

Ao professor Galileo Adeli Buriol (UNIFRA) pelo apoio e conhecimentos transmitidos durante a minha iniciação científica e aos Professores Sérgio Zolnier (UFV), Thieres George Freire da Silva (UFRPE), Antonio José Steidle Neto (UFSJ) durante o mestrado.

A todos aqueles que, embora não mencionados, direta ou indiretamente contribuíram para o êxito do trabalho, os meus sinceros agradecimentos.



## RESUMO

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

### **PARÂMETROS E PROBABILIDADES DE IRRIGAÇÃO PARA A CULTURA DA SOJA NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL POR ANÁLISE NUMÉRICA**

**AUTOR: ROBERTO TRENTIN**

**ORIENTADOR: DR. ARNO BERNARDO HELDWEIN**

Local e data da Defesa: Santa Maria, 22 de fevereiro de 2013.

O objetivo deste trabalho foi determinar os valores prováveis de duração dos subperíodos do ciclo para a cultura da soja semeada em diferentes datas, os valores Médios de lâmina de irrigação e do número de irrigações necessários e também sua relação com o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), considerando-se a capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) dos principais solos da região Central do Rio Grande do Sul. Este estudo foi realizado por meio de modelos matemáticos de desenvolvimento da cultura da soja publicados na literatura e dados meteorológicos, coletados na estação climatológica principal de Santa Maria, RS (latitude: 29°43'23" S, longitude: 53°43'15" W e altitude: 95 m), desde outubro de 1968 até julho de 2012, totalizando 44 anos de observações diárias. A simulação do desenvolvimento da cultura foi realizada para diferentes datas de semeadura, aproximadamente a cada dez dias, de acordo com os três grupos de maturação (GM) avaliados: 5.9–6.8 (Ciclo precoce/semiprecoce), 6.9–7.3 (Ciclo médio,) e 7.8–8.0 (Ciclo semitardio/tardio). Para simular a irrigação, os 13 solos da região de abrangência do estudo, foram agrupados em cinco grupos que apresentam características semelhantes de capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) e capacidade de infiltração. O balanço hídrico sequencial diário determinou a variação da água disponível e o momento da irrigação. O momento da irrigação foi determinado quando os solos alcançavam a fração mínima de água disponível a ser mantida. Para isso, foram utilizados quatro manejos que representaram a condição de quando a água retirada do solo alcançava a fração 20%, 30%, 40% e 50% da CAD. A análise dos dados consistiu de análise de variância, teste de comparação de médias e análise de distribuição de probabilidade para as variáveis: duração dos subperíodos e do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja, lâmina de irrigação, número de irrigações a lâmina de irrigação associada o fenômeno ENOS. A duração média dos subperíodos e do ciclo de desenvolvimento da soja é variável conforme a data de semeadura. A duração do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja é maior nas primeiras datas de semeadura (outubro) decrescendo até as últimas datas de semeadura (dezembro). As primeiras datas de semeadura necessitam de maior lâmina de irrigação do que as últimas datas de semeadura. Constatou-se que maior lâmina de irrigação necessária à cultura da soja está associada a anos neutros, enquanto que a menor lâmina de irrigação está relacionada a eventos de El Niño.

**Palavras-chave:** *Glycine max* (L.) Merrill. Função densidade de probabilidade. Irrigação. Capacidade de armazenamento de água disponível. Datas de semeadura.



## ABSTRACT

Doctoral Thesis  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria

### PROBABILITY AND PARAMETERS OF IRRIGATION FOR SOYBEAN CROP IN CENTRAL REGION OF RIO GRANDE DO SUL BY NUMERICAL ANALYSIS

AUTHOR: ROBERTO TRENTIN

ADVISOR: DR. ARNO BERNARDO HELDWEIN

Location and date of defense: Santa Maria, February 22<sup>nd</sup>, 2013.

The objective of this study was to determine the probable duration of the developmental phases of the cycle for the soybean at different sowing dates, the average values of water depth and number of irrigations needed and also its relationship with El Niño Oscillation South (ENSO), considering the capacity of water storage available (CAD) of the main soils of Central region of Rio Grande do Sul. This study was conducted by means of mathematical models of development of soybean and data published in the literature meteorological, climatological station collected in Santa Maria, RS (latitude: 29°43'23 "S, longitude: 53° 43'15" W and altitude: 95 m), from October 1968 to July 2012, totaling 44 years of daily observations. The simulation of crop development was carried out for different sowing dates every ten days, considering three maturity groups (GM): 5.9-6.8 6.9-7.3 and 7.8-8.0. To simulate irrigation, the 13 soils of the region covered in this study into five groups that have similar characteristics of water storage capacity available (CAD) and infiltration capacity. The daily water balance determined the variation of water availability and timing of irrigation. The timing of irrigation was determined when the soil reached a minimum fraction of available water to be maintained. For this, we used four handlings representing the condition when the water withdrawn from the soil fraction reached 20%, 30%, 40% and 50% of the CAD. Data analysis consisted of analysis of variance test for comparison of means and analysis of the probability distribution for the variables: duration of subperiods and development cycle of soybeans, water depth, number of irrigation and water depth associated to ENSO. The average duration of subperiods and soybean development cycle varies according to the date of sowing. The duration of the development cycle of the soybean crop is higher in the early sowing dates (October) decreasing until the last sowing dates (December). Early sowing dates require more water depth than the latest sowing dates. It was found that higher water depth necessary to soybean is associated with neutral years, while the lowest water depth is related to El Niño events.

**Keywords:** *Glycine max* (L.) Merrill. Probability density function. Irrigation. Water storage capacity. Sowing dates.



## LISTA DE TABELAS

### Capítulo I

- TABELA 1 – Datas de semeadura (DS) utilizadas na simulação do desenvolvimento da cultura da soja, para três grupos de maturação (GM)..... 38
- TABELA 2 – Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) selecionadas e respectivos parâmetros para determinar a duração dos subperíodos (Subp.) compreendidos entre a semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, nas datas de semeadura (DS) compreendidas entre 01/out e 11/nov, simuladas para cada ano do período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013..... 41
- TABELA 3 – Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) selecionadas e respectivos parâmetros para determinar a duração dos subperíodos (Subp.) compreendidos entre a semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, nas datas de semeadura (DS) compreendidas entre 21/nov e 31/dez, simuladas para cada ano do período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013..... 42
- TABELA 4 – Duração provável (dias) dos subperíodos (Subp.) compreendidos entre a semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, nas datas de semeadura (DS) compreendidas entre 01/out e 11/nov, simuladas para cada ano do período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013. .... 43
- TABELA 5 – Duração provável (dias) dos subperíodos (Subp.) compreendidos entre a semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, nas datas de semeadura (DS) compreendidas entre 21/nov e 31/dez, simuladas para cada ano do período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013. .... 44
- TABELA 6 – Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) selecionadas e respectivos parâmetros para determinar a duração do ciclo da cultura da soja e duração provável para três grupos de maturação (GM), nas diferentes datas de semeadura (DS) simuladas para cada ano do período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013..... 46

## Capítulo II

- TABELA 1 – Variáveis meteorológicas calculadas a partir dos dados meteorológicos e respectivas funções matemáticas..... 57
- TABELA 2 – Capacidade de armazenamento de água disponível no solo mínima (CADi) e máxima (CADx), curva número (CN) da precipitação efetiva, unidades de mapeamento (Brasil, 1973) e classificação dos solos (Streck et al., 2008a) da área de abrangência da estação meteorológica principal de Santa Maria, RS, utilizados no estudo simulado dos parâmetros de irrigação para os anos agrícolas de 1968 a 2012 ..... 59
- TABELA 3 – Datas de semeadura (DS) utilizadas na simulação do desenvolvimento da cultura da soja, para três grupos de maturação (GM)..... 60
- TABELA 4 – Coeficientes de cultura utilizados para determinar a evapotranspiração máxima da cultura da soja e variação da CAD conforme o desenvolvimento da cultura da soja..... 61
- TABELA 5 – Valores médios de lâmina de irrigação (mm) e de número de irrigações, considerando-se todos os manejos de irrigação totalizados em cada período do cultivo, comparados entre grupos de solos analisados na simulação do ciclo da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, durante o período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013 ..... 63
- TABELA 6 – Valores médios de lâmina de irrigação (mm), totalizados em cada período de cultivo para cada manejo de irrigação e solo, estudados na simulação do ciclo da soja para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, durante o período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013..... 64
- TABELA 7 – Comparações de valores médios de lâmina de irrigação (mm), totalizados em cada período de cultivo para cada manejo de irrigação e solo, estudados na simulação do ciclo da soja para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, durante o período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013 ..... 65
- TABELA 8 – Valores médios de número de irrigações, totalizados em cada período de cultivo para cada manejo de irrigação e solo, estudados na simulação do ciclo da soja para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, durante o período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013 ..... 66

## Capítulo III

- TABELA 1 – Capacidade de armazenamento de água disponível no solo inicial (CADi) e final (CADx), curva número (CN) da precipitação efetiva, unidades de mapeamento (Brasil, 1973) e classificação dos solos (Streck et al., 2008a) da área de abrangência da estação meteorológica principal de Santa Maria, RS, utilizados no estudo simulado dos parâmetros de irrigação para os anos agrícolas de 1968 a 2012..... 76

|  |    |
|--|----|
| TABELA 2 – Datas de semeadura (DS) utilizadas na simulação do desenvolvimento da cultura da soja, para três grupos de maturação (GM).....  | 77 |
| TABELA 3 – Coeficientes de cultura utilizados para determinar a evapotranspiração máxima da cultura da soja e variação da CAD conforme o desenvolvimento da cultura da soja. ....  | 78 |
| TABELA 4 – Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) e seus parâmetros, selecionadas para determinar a lâmina de irrigação, para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, para os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013. ....   | 80 |
| TABELA 5 – Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) e seus parâmetros, selecionadas para determinar a lâmina de irrigação, para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, para os solos Alto das Canas, São Pedro, Venda Grande e Cerrito, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013..... | 81 |
| TABELA 6 – Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) e seus parâmetros, selecionadas para determinar a lâmina de irrigação, para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, para os solos Santa Maria e Vacacaí, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.....                             | 82 |
| TABELA 7 – Estimativa da lâmina máxima de irrigação (mm) necessária à cultura da soja para a cultura da soja nos grupos de maturação (5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0), com 90% de probabilidade de ocorrência, para os grupos de solos Chaci, Savencal e Smva, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013. ....                   | 84 |

## Capítulo IV

|   |    |
|---|----|
| TABELA 1 – Classificação dos anos em função dos fenômenos ENOS ocorridos no período de 1968 a 2012.....   | 94 |
| TABELA 2 – Capacidade inicial de armazenamento de água disponível no solo (CADi) e final (CADx), curva número (CN) da precipitação efetiva, unidades de mapeamento (Brasil, 1973) e classificação dos solos (Streck et al., 2008a) da área de abrangência da estação meteorológica principal de Santa Maria, RS, utilizados no estudo simulado dos parâmetros de irrigação para os anos agrícolas de 1968 a 2012..... | 96 |

|  |     |
|--|-----|
| TABELA 3 – Datas de semeadura (DS) utilizadas na simulação do desenvolvimento da cultura da soja, para três grupos de maturação (GM).....  | 97  |
| TABELA 4 – Coeficientes de cultura utilizados para determinar a evapotranspiração máxima da cultura da soja e variação da CAD conforme o desenvolvimento da cultura da soja.....   | 98  |
| TABELA 5 – Comparação dos valores médios de lâmina de irrigação (mm), classificando os dados com base nos anos com eventos de El Niño (EN), La Niña (LN) e Neutros (N), para três grupos de maturação (GM) da cultura da soja, por simulação numérica em cada um dos anos do período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.....  | 99  |
| TABELA 6 – Comparação dos valores médios de lâmina de irrigação (mm), classificando os dados com base nos anos com eventos de El Niño (EN), La Niña (LN) e Neutros (N), totalizados em cada período de cultivo para cada grupo de solos, estudados na simulação do ciclo da soja para os grupos de maturação (GM) 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, durante o período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.....         | 100 |
| TABELA 7 – Comparação dos valores médios de lâmina de irrigação (mm), classificando os dados com base nos anos com eventos de El Niño (EN), La Niña (LN) e Neutros (N), nas diferentes datas de semeadura (DS) estudadas na simulação do ciclo da soja, para os grupos de maturação (GM) 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, durante o período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.....                                  | 101 |
| TABELA 8 – Comparação dos valores médios de lâmina de irrigação (mm), classificando os dados com base nos anos com eventos de El Niño (EN), La Niña (LN) e Neutros (N), totalizados em cada período de cultivo, para cada manejo de irrigação e solo estudados na simulação do ciclo da soja, para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, durante o período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013..... | 103 |

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo I

- FIGURA 1 – Duração média dos subperíodos de desenvolvimento da cultura soja simulados por meio de variáveis meteorológicas diárias, para a série histórica de 1968 a 2012, em função das datas de semeadura, compreendidos entre a semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para os grupos de maturação: 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0. Santa Maria, RS, 2013..... 48
- FIGURA 2 – Duração média do ciclo de desenvolvimento de três grupos de maturação da cultura da soja (GM) 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, em função das diferentes datas de semeadura simuladas durante os anos de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013..... 49



## LISTA DE APÊNDICES

- APÊNDICE A – Análise de variância da duração do ciclo total e dos subperíodos de desenvolvimento compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), em função das datas de semeadura (DS) para a soja grupo de maturação 5.9–6.8, para os municípios da região central do RS. Santa Maria, RS, 2013. .... 121
- APÊNDICE B – Análise de variância da duração do ciclo total e dos subperíodos de desenvolvimento compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), em função das datas de semeadura (DS) para a soja grupo de maturação 6.9–7.3, para os municípios da região central do RS. Santa Maria, RS, 2013. .... 122
- APÊNDICE C – Análise de variância da duração do ciclo total e dos subperíodos de desenvolvimento compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), em função das datas de semeadura (DS) para a soja grupo de maturação 7.4–8.0, para os municípios da região central do RS. Santa Maria, RS, 2013. .... 123
- APÊNDICE D – Análise de variância da lâmina de irrigação por ciclo de desenvolvimento para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0 da cultura da soja em função do tipo de solo, do manejo de irrigação, das épocas de semeadura (DS) e suas interações, para os municípios da região central do RS. Santa Maria, RS, 2013 ..... 124
- APÊNDICE E – Análise de variância do número de irrigações por ciclo de desenvolvimento para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0 da cultura da soja em função do tipo de solo, do manejo de irrigação, das épocas de semeadura (DS) e suas interações, para os municípios da região central do RS. Santa Maria, RS, 2013 ..... 125
- APÊNDICE F – Estimativa da lâmina máxima de irrigação (mm) necessária à cultura da soja para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013 ..... 126

- APÊNDICE G – Estimativa da lâmina máxima de irrigação (mm) necessária à cultura da soja para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos São Pedro, Venda Grande, Alto das canas e Cerrito, sob quatro manejos de irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013 ..... 127
- APÊNDICE H – Estimativa da lâmina máxima de irrigação (mm) necessária a cultura da soja para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos Santa Maria e Vacacaí, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013 ..... 128
- APÊNDICE I – Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) e seus parâmetros, selecionadas para determinar o número de irrigações, para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, para os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013 ..... 129
- APÊNDICE J – Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) e seus parâmetros, selecionadas para determinar o número de irrigações, para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, para os solos Alto das Canas, São Pedro, Venda Grande e Cerrito, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013 ..... 130
- APÊNDICE K – Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) e seus parâmetros, selecionadas para determinar o número de irrigações, para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, para os solos Santa Maria e Vacacaí, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013 ..... 131
- APÊNDICE L – Estimativa do número de irrigações à cultura da soja para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi, Júlio de Castilhos e Alto das canas, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013 ..... 132
- APÊNDICE M – Estimativa do número de irrigações à cultura da soja para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos São Pedro, Venda Grande, Alto das canas e Cerrito, sob quatro manejos de irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013 ..... 133

|  |     |
|--|-----|
| APÊNDICE N – Estimativa do número de irrigações a cultura da soja para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos Santa Maria e Vacacaí, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.<br>..... | 134 |
| APÊNDICE O – Análise de variância da lâmina de irrigação por ciclo de desenvolvimento para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0 da cultura da soja em anos de El Niño em função do tipo de solo, do manejo de irrigação, das épocas de semeadura (DS) e suas interações, para os municípios da região central do RS.....  | 135 |
| APÊNDICE P – Análise de variância da lâmina de irrigação por ciclo de desenvolvimento para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0 da cultura da soja em anos de La Niña em função do tipo de solo, do manejo de irrigação, das épocas de semeadura (DS) e suas interações, para os municípios da região central do RS.....  | 136 |
| APÊNDICE Q – Análise de variância da lâmina de irrigação por ciclo de desenvolvimento para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0 da cultura da soja em anos Neutros em função do tipo de solo, do manejo de irrigação, das épocas de semeadura (DS) e suas interações, para os municípios da região central do RS.....   | 137 |
| APÊNDICE R – Análise de variância da lâmina de irrigação por ciclo de desenvolvimento para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0 da cultura da soja em anos Neutros em função do tipo de solo, do manejo de irrigação, das épocas de semeadura (DS) e suas interações, para os municípios da região central do RS.....   | 138 |



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\gamma$  – constante psicrométrica;

$\Delta$  – tangente à curva de saturação de vapor do ar;

$b_1$  – coeficiente angular para a equação de Ångström-Prescott;

$b_0$  – coeficiente linear para a equação de Ångström-Prescott;

CAD – capacidade de armazenamento de água disponível;

CAD<sub>i</sub> – valor inicial da CAD utilizado na simulação;

CAD<sub>n</sub> – valor da CAD calculado para o dia  $n$ ;

CAD<sub>x</sub> – valor final da CAD utilizado na simulação;

CC – Capacidade de campo;

CN – curva número;

$d$  – déficit de saturação de vapor do ar;

DS – datas de semeadura;

E – emergência;

$e$  – pressão parcial de vapor;

ECPSM – Estação Climatológica Principal de Santa Maria;

EN – fenômeno El Niño;

$e_s$  – pressão de saturação de vapor;

ET<sub>m</sub> – evapotranspiração máxima da cultura;

ET<sub>o</sub> – evapotranspiração de referência;

EvP – evaporação medida no evaporímetro de Piche;

Fdp – função densidade de probabilidades;

G – função gama;

GM – grupo de maturação;

K<sub>c</sub> – coeficiente de cultura;

K<sub>o↓</sub> – densidade de fluxo da radiação solar global incidente no topo da atmosfera;

L – calor latente de evaporação da água;

$L^*$  – balanço de radiação de ondas longas;

LGN – função lognormal;

LN – fenômeno La Niña;

M – manejo de irrigação;

N – função normal;

n – insolação diária;

p – fração de água disponível;

$P_e$  – precipitação efetiva;

PMP – ponto de murcha permanente;

$Q^*$  - saldo de radiação;

r – refletividade do gramado;

R1 – início da floração;

R5 – início do enchimento do grão;

R7 – início da maturação;

R8 – maturação plena;

$R_g$  – densidade de fluxo da radiação global incidente;

S – semeadura;

SA – Sem ajuste a nenhuma função de distribuição de probabilidades;

SD – taxa de desenvolvimento acumulada até o estágio R1;

ST – soma térmica;

$ST_{R5-R7}$  – soma térmica acumulada entre os estágios R5 e R7;

$T_{15}$  – temperatura do ar determinada às 15 horas do dia;

$T_{21}$  – temperatura do ar determinada às 21 horas do dia;

$T_9$  – temperatura do ar determinada às 9 horas do dia;

$T_b$  – Temperatura base;

$T_m$  – temperatura média do ar, calculada pelo método do 8° DISME;

$T_{ma}$  – temperatura média diária, obtida entre os valores de  $T_{máx}$  e  $T_{min}$ ;

$T_{máx}$  – temperatura máxima do ar;

$T_{min}$  – temperatura mínima do ar;

$T_{minc}$  – Temperatura mínima do cultivo;

$U_2$  – velocidade do vento medida 2 m acima do solo;

$UR_{15}$  – umidade relativa do ar determinada às 15 horas do dia;

$UR_{21}$  – umidade relativa do ar determinada às 21 horas do dia;

$UR_9$  – umidade relativa do ar determinada às 9 horas do dia;

$UR_m$  – umidade relativa média do ar;

$V_2$  – estágio de primeira folha triflhada completamente desenvolvida;

$W$  – função Weibull;

$\varepsilon$  – emissividade do gramado (0,95);

$\sigma$  – constante de Stefan-Boltzmann;



## **LISTA DE ANEXOS**

|  |     |
|--|-----|
| ANEXO A – Descrição das principais características dos solos estudados, conforme Cardoso (2005)..... | 140 |
| ANEXO B – Descrição das principais funções de densidade de probabilidade, conforme Silva 2008).....  | 144 |



# SUMÁRIO

|  |            |
|--|------------|
| <b>Introdução geral .....</b>  | <b>31</b>  |
| <b>Capítulo I – Duração provável dos subperíodos e do ciclo da cultura da soja por meio de simulação numérica para a região central do Rio Grande do Sul .....</b> | <b>35</b>  |
| Introdução .....   | 36         |
| Material e métodos .....   | 37         |
| Resultados e discussão .....   | 40         |
| Conclusões.....  | 50         |
| Literatura citada.....   | 50         |
| <b>Capítulo II – Necessidade de irrigação para a cultura da soja na região central do Rio Grande do Sul .....</b>  | <b>53</b>  |
| Introdução.....  | 54         |
| Material e métodos .....   | 55         |
| Resultados e discussão .....   | 62         |
| Conclusões.....  | 67         |
| Literatura citada.....   | 67         |
| <b>Capítulo III – Análise de distribuição da lâmina de irrigação para a cultura da soja na região central do Rio Grande do Sul .....</b>                           | <b>71</b>  |
| Introdução.....  | 72         |
| Material e métodos .....   | 75         |
| Resultados e discussão .....   | 80         |
| Conclusões.....  | 86         |
| Literatura citada.....   | 86         |
| <b>Capítulo IV – Lâminas de irrigação para a cultura da soja na região central do Rio Grande do Sul associadas ao El Niño Oscilação Sul .....</b>                  | <b>91</b>  |
| Introdução.....  | 92         |
| Material e métodos .....   | 93         |
| Resultados e discussão .....   | 99         |
| Literatura citada.....   | 104        |
| <b>Capítulo V – Discussão geral .....</b>  | <b>109</b> |
| <b>Conclusões gerais.....</b>  | <b>115</b> |
| <b>Referências bibliográficas.....</b>   | <b>117</b> |
| <b>Apêndices.....</b>  | <b>121</b> |
| <b>Anexos.....</b>   | <b>139</b> |



## INTRODUÇÃO GERAL

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma dicotiledônea pertencente à família Leguminosae. É a oleaginosa mais cultivada e o quarto grão mais produzido no mundo, após do milho, do trigo e do arroz. O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, sendo cultivados no ano agrícola 2011/2012, aproximadamente, 25 milhões de hectares, resultando na produção de 66,4 milhões de toneladas (CONAB, 2012).

Para se alcançar essa produção os cultivos de soja abrangem muitas regiões diferentes e com fotoperíodos distintos. O fotoperíodo é determinado pela latitude, sendo esta a principal variável associada à influência da data de semeadura sobre a duração do ciclo da cultura da soja. A soja é uma planta de dias curtos, ou seja, é induzida a florescer quando o comprimento dos dias é inferior a determinado valor, chamado fotoperíodo crítico. Diferentes cultivares possuem fotoperíodos distintos, ficando em média, em torno de 13 a 14h (FARIAS et al., 2001). Assim, se uma determinada variedade cultivada estiver submetida durante muito tempo sob condições de dias longos, o período vegetativo poderá permanecer quase que indefinidamente.

A cultura da soja, bem como as demais grandes culturas de verão, tem seu ciclo de desenvolvimento nos meses de outubro a maio, período no qual, devido à deficiência hídrica, a redução da produção é inevitável em alguns anos agrícolas sem a utilização de irrigação. No Rio Grande do Sul é comum a ocorrência de deficiência hídrica durante o ciclo de desenvolvimento da soja, sendo esse um dos principais fatores limitantes à obtenção de elevados rendimentos de grãos (MATZENAUER et al., 1998). A variabilidade interanual e espacial no rendimento de grãos no Estado do Rio Grande do Sul se deve principalmente à distribuição aleatória temporal e espacial da precipitação pluvial. A água no solo é o fator que, com maior frequência e intensidade, afeta o rendimento de grãos.

A precipitação pluviométrica na região central do Rio Grande do Sul é uniformemente distribuída ao longo das estações do ano (BURIOL et al., 2006). Entretanto, nos meses mais quentes as chuvas normais são insuficientes para suprir a alta demanda hídrica atmosférica. Considerando-se a intensidade, as precipitações pluviométricas que ocorrem no verão são frequentemente mais intensas, devido à maior instabilidade térmica da atmosfera. As precipitações pluviais de fim de primavera e de verão também apresentam maior variabilidade no tempo e no espaço (BURIOL et al., 2006; SILVA et al., 2007) o que aumenta a probabilidade de ocorrer déficit hídrico.

Geralmente são utilizados dados acumulados na escala mensal ou anual para estudo das precipitações pluviométricas, e desta maneira podem ocorrer incoerências. A análise das precipitações pluviométricas engloba somente o total de precipitação pluviométrica e não a precipitação efetiva, gerando inconsistência dessas informações (FONTANA; ALMEIDA, 2002). Outro problema relacionado aos dados mensais é que eles em geral não demonstram deficiências hídricas quando estes ocorrem em uma parte do período mensal (NIED et al., 2005; SILVA, 2005; LEIVAS et al., 2006).

Para a agricultura, mais importante que o conhecimento dos valores normais dos elementos meteorológicos é o conhecimento das probabilidades, o que permite estabelecer os riscos e a provável redução do rendimento para cada adversidade. O estudo destas fornece informações úteis sobre a chance de ocorrência de um determinado valor de interesse para o período estudado (MATZENAUER et al., 2002). Dessa maneira, o conhecimento das probabilidades de ocorrência da lâmina e do número de irrigações é importante para o manejo das culturas e o planejamento da irrigação (ALFONSI et al., 1997), sendo a contabilização dos fluxos de entrada e saída de água através do balanço hídrico sequencial a metodologia mais adequada.

A determinação da lâmina de irrigação para cada local é de suma importância para o processo de tomada de decisões relacionadas ao dimensionamento de projetos de irrigação, bem como a análise de custos e viabilidade técnica/econômica destes projetos. Estudos com a determinação dos valores de lâmina de água, essenciais na elaboração de um projeto de irrigação, são escassos e incompletos para a região central do Rio Grande do Sul, sendo que, essa determinação é importante para o adequado planejamento de sistemas de irrigação na região.

Através da análise da distribuição e teoria das probabilidades é possível conhecer a variabilidade temporal da necessidade de água da cultura da soja cultivada sob irrigação e a partir da relação entre o consumo de água e a disponibilidade de água ao longo do tempo, dado pelo balanço hídrico sequencial diário, pode-se conhecer a necessidade de irrigação para um dado nível de probabilidade.

Aplicando-se a técnica da modelagem de desenvolvimento das culturas e por meio do balanço hídrico sequencial diário aplicado nos diferentes solos da região é possível estimar a provável lâmina de irrigação e número de irrigações com base em um banco de dados de longo período de observações meteorológicas.

O objetivo deste trabalho foi determinar os valores prováveis de duração dos subperíodos do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja simulado por meio de modelos

matemáticos para diferentes datas de semeadura, os valores médios e a análise de distribuição da lâmina de irrigação e do número de irrigações necessárias e também sua relação com o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), considerando-se a capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) dos principais solos da região Central do Rio Grande do Sul.

Procurando responder às hipóteses e atender os objetivos propostos para este trabalho de tese, foi feita segmentação do texto na forma de quatro capítulos, sendo estes: Capítulo I “Duração Provável dos subperíodos e do ciclo da cultura da soja por meio de simulação numérica para a região Central do Rio Grande do Sul”; Capítulo II “Necessidade de irrigação para a cultura da soja na região central do Rio Grande do Sul”; Capítulo III “Análise de distribuição da lâmina de irrigação para a cultura da soja na região Central do Rio Grande do Sul” e Capítulo IV “Lâminas de irrigação para a cultura da soja na região central do Rio Grande do Sul associadas ao El Niño Oscilação Sul”. Além destes há um Capítulo V intitulado “Discussão Geral”, no qual são integrados e discutidos os resultados como um todo.



## **CAPÍTULO I – Duração provável dos subperíodos e do ciclo da cultura da soja por meio de simulação numérica para a região Central do Rio Grande do Sul**

**Resumo:** A temperatura do ar e o fotoperíodo são os principais elementos meteorológicos que influenciam a duração do ciclo de desenvolvimento das plantas de soja. O objetivo deste trabalho foi determinar a duração média e provável dos subperíodos do ciclo para a cultura da soja para região Central do Rio Grande do Sul por meio do desenvolvimento simulado da cultura da soja semeada em diferentes datas. Este estudo foi realizado por meio de modelos matemáticos de desenvolvimento da cultura da soja publicados na literatura e dados meteorológicos, coletados na estação climatológica principal de Santa Maria, RS (29°43'23"S; 53°43'15"W; 95 m), desde outubro de 1968 até julho de 2012, totalizando 44 anos de observações diárias. A simulação do desenvolvimento da cultura foi realizada para diferentes datas de semeadura, a cada dez dias, foram considerados três grupos de maturação (GM): 5.9–6.8 (Ciclo precoce/semiprecoce), 6.9–7.3 (Ciclo médio,) e 7.8–8.0 (Ciclo semitardio/tardio). A duração média dos subperíodos e do ciclo de desenvolvimento da soja é variável conforme a data de semeadura. A duração do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja é maior nas primeiras datas de semeadura (outubro) decrescendo até as últimas datas de semeadura (dezembro). A distribuição lognormal estimou melhor a duração do ciclo de desenvolvimento da soja.

**Palavras-chave:** *Glycine max* (L.) Merrill, desenvolvimento vegetal, datas de semeadura, função densidade de probabilidade.

### **Probable duration of the cycle and subperiods of soybean by numerical simulation for the central region of Rio Grande do Sul**

**Abstract:** Temperature and photoperiod are the main meteorological elements that drive the duration of the development cycle of the soybean plants. The objective of this study was to determine the probably and average length of soybean cycle subperiods for the Central Region of Rio Grande do Sul, Brazil, by soybean simulated development at different sowing dates. This study was conducted by means of mathematical models of soybean development published in the literature and meteorological data collected at climatological station of Santa Maria, RS (29°43'23" S; 53°43'15" W; 95 m), from October 1968 until July 2012, totaling 44

years of daily observations. The simulation of crop development was carried out for different sowing dates every ten days, considering three maturity groups (GM): 5.9-6.8, 6.9-7.3 and 7.8-8.0. The average length of subperiods and soybean development cycle varies according to the sowing date. The duration of the development cycle of the soybean crop is higher in the early sowing dates (October) decreasing to latest sowing dates (December). The lognormal distribution estimated better the length of soybean development cycle.

**Key words:** *Glycine max* (L.) Merrill, plant development, sowing dates, probability density function

## INTRODUÇÃO

A soja é a cultura produtora de grãos que ocupa a maior área cultivada no Estado do Rio Grande do Sul. Na safra 2011/2012 foram colhidos cerca de 4,2 milhões de hectares com uma produção de 6,525 milhões de toneladas de grãos (CONAB, 2012). Em média, sua produtividade tem sido crescente nos últimos anos devido à aplicação de novas tecnologias à cultura, pelo emprego de materiais genéticos de bom potencial produtivo e pela crescente profissionalização dos produtores rurais.

Segundo Fehr & Cavines (1977), a soja apresenta dois principais períodos de desenvolvimento: vegetativo e reprodutivo. O período vegetativo inicia-se na emergência da plântula e termina com a abertura da primeira flor. O período reprodutivo inicia-se na abertura da primeira flor e termina com a maturação fisiológica.

A soja adapta-se melhor às regiões onde a temperatura do ar oscila entre 20 e 30 °C, sendo a temperatura ideal para seu desenvolvimento em torno de 30 °C. De forma geral, a temperatura mínima (ou base inferior), a partir da qual ocorre o desenvolvimento das cultivares brasileiras de soja, é de cerca de 10 °C (Farias et al., 2009).

Temperatura do ar e fotoperíodo são os principais fatores abióticos que influenciam o desenvolvimento da planta da soja. A soja é uma planta de dias curtos (PDC), ou seja, é induzida a florescer quando o comprimento dos dias é inferior a um determinado valor, chamado fotoperíodo crítico. Segundo Setiyono et al. (2007) a temperatura geralmente tem uma influência positiva sobre a taxa de desenvolvimento da cultura. Por outro lado, o fotoperíodo modifica a resposta da planta à temperatura, ou seja, uma planta de dia curto em um dia longo reduz sua taxa de desenvolvimento. Segundo Rodrigues et al. (2001), a sensibilidade fotoperiódica da soja varia conforme o genótipo e, em cultivares sensíveis, a

resposta ao fotoperíodo é quantitativa e não absoluta, o que significa que a floração ocorrerá de qualquer modo.

As funções de distribuição de probabilidades (Fdp) podem ser utilizadas para caracterizar a distribuição de dados de uma variável, analisar a probabilidade de ocorrência de um evento meteorológico, detalhar os estudos climatológicos de maneira a expressar a probabilidade de um evento não exceder um determinado valor. Para isso, necessita-se de uma longa série histórica de dados (Silva, 2008; Trentin, 2009).

Recentemente foram realizados vários trabalhos utilizando as Fdp para analisar a distribuição dos valores de duração dos subperíodos e do ciclo de desenvolvimento de diversas culturas na região central do Rio Grande do Sul como: feijoeiro (Silva, 2008), milho (Trentin, 2009) e girassol (Maldaner, 2012).

Utilizando-se modelos matemáticos de desenvolvimento das culturas e por meio da teoria de distribuição de probabilidades é possível estimar a duração provável dos subperíodos e do ciclo de desenvolvimento com base em um banco de dados de longo período de observações meteorológicas.

Os objetivos deste trabalho foram estimar os valores médios de duração dos subperíodos e do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja e determinar as Fdp que melhor caracterizam a distribuição destes dados para região Central do Rio Grande do Sul por meio do desenvolvimento simulado da cultura da soja com hábito de crescimento determinado semeada em diferentes datas de semeadura.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Este estudo foi realizado por meio de modelos de desenvolvimento da cultura da soja publicados na literatura e com dados meteorológicos, coletados na estação climatológica principal de Santa Maria (ECPSM) (29°43'23"S; 53°43'15"W; 95 m), desde outubro de 1968 até julho de 2012, totalizando 44 anos de observações diárias. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo fundamental Cfa, caracterizado como subtropical úmido, sem estação seca definida, com verões quentes (Heldwein et al., 2009).

Foram utilizadas as variáveis meteorológicas diárias do banco de dados da ECPSM necessárias para a realização da simulação de desenvolvimento da cultura da soja, sendo elas a temperatura máxima do ar ( $T_{max}$ , °C), a temperatura mínima do ar ( $T_{min}$ , °C) e a insolação (horas).

A simulação do desenvolvimento da cultura foi realizada para diferentes datas de semeadura em intervalos de aproximadamente 10 dias. Considerou-se três grupos de maturação (GM): 5.9–6.8 (Ciclo precoce/semiprecoce), 6.9–7.3 (Ciclo médio) e 7.8–8.0 (Ciclo semitardio/tardio), para os períodos de semeadura recomendados pelas indicações técnicas (Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul, 2010) (Tabela 1). Considerou-se também que as plantas tinham hábito de crescimento determinado.

Para estimar a data de emergência foi utilizado o cálculo da soma térmica, em graus-dia ( $^{\circ}\text{C d}^{-1}$ ), adotando-se o valor acumulado de  $92,5^{\circ}\text{C dia}$  a partir temperatura base de  $10^{\circ}\text{C}$  (Schneider, et al., 1987) e utilizando-se a temperatura média diária ( $T_{ma}$ ), que foi obtida a partir da média aritmética de  $T_{máx}$  e  $T_{min}$ . A data de ocorrência do estágio de emissão da primeira folha trifoliada (V2) foi estimada por meio do modelo Soydev (Setiyono et al., 2007) utilizando-se coeficientes obtidos por Streck et al. (2009) em Santa Maria, RS. O modelo Soydev utiliza uma função não linear de resposta à temperatura para determinar o número de nós da planta de soja. Esta simulação inicia na data de emergência e termina quando o número de nós for igual ou superior a três, definindo, assim, a data de ocorrência do estágio V2.

**Tabela 1.** Datas de semeadura (DS) utilizadas na simulação do desenvolvimento da cultura da soja, para três grupos de maturação (GM).

| DS     | Grupo de Maturação                        |                            |   |
|--------|---|----------------------------|---|
|        | GM 5.9 – 6.8 (Ciclo precoce/ semiprecoce) | GM 6.9 – 7.3 (Ciclo médio) | GM 7.4 – 8.0 (Ciclo Semitardio/ tardio) |
| 01/out | — <sup>I</sup>                            | — <sup>I</sup>             | 1                                       |
| 11/out | — <sup>I</sup>                            | 1                          | 2                                       |
| 21/out | 1   | 2                          | 3                                       |
| 01/nov | 2   | 3                          | 4                                       |
| 11/nov | 3   | 4                          | 5                                       |
| 21/nov | 4   | 5                          | 6                                       |
| 01/dez | 5   | 6                          | 7                                       |
| 11/dez | 6   | 7                          | 8                                       |
| 21/dez | 7   | 8                          | 9                                       |
| 31/dez | — <sup>I</sup>                            | — <sup>I</sup>             | 10                                      |

<sup>I</sup>Datas de semeadura não recomendadas para a região.

A data do início da floração (R1) foi simulada com o modelo não linear de resposta do desenvolvimento à temperatura e fotoperíodo proposto por Sinclair et al. (1991), utilizando coeficientes interpolados de acordo com o grupo de maturação (GM). Este modelo inicia a integração a partir da data de emergência e termina quando a taxa de desenvolvimento atinge 1,0, que corresponde à data do estágio R1.

A data de ocorrência do estágio início do enchimento de grão (R5) foi simulada pelo modelo proposto por Sinclair et al. (2007), por meio de uma regressão linear baseada no fotoperíodo e coeficientes variáveis conforme o GM, iniciando na data de ocorrência de R1 e terminando quando a taxa de desenvolvimento atingiu 1,0, que equivale a data de ocorrência do estágio R5. A data do estágio início da maturação (R7) foi simulada a partir da data de ocorrência do estágio R5 por meio do cálculo da soma térmica de maneira similar à simulação da data de emergência adotando a temperatura base de 10 °C e soma térmica acumulada de 554 °C dia conforme Martorano et al. (2012).

Com as datas de início da floração (R1) e início de enchimento de grão (R5) já estimadas, a data da maturação fisiológica (R8), foi simulada pelo modelo proposto por Sinclair (1986). Esta simulação foi feita sem restrição hídrica, eliminando-se a função de resposta ao déficit hídrico no algoritmo. Além dos coeficientes apresentados no trabalho de Sinclair (1986) foram utilizados os valores de plastocrono da cultura da soja publicados por Streck et al. (2008).

A densidade de fluxo da radiação solar global incidente ( $R_g$ ), necessária para estimativa da data de R8 pelo modelo proposto por Sinclair (1986) foi estimada através da equação de Ångström-Prescott:  $R_g = K_o \downarrow (b_o + b_1 n N^{-1})$ , em que  $K_o \downarrow$  a densidade de fluxo da radiação solar global incidente no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) estimada em função da latitude e época do ano,  $b_o$  e  $b_1$  os coeficientes mensais ajustados para Santa Maria por Buriol et al. (2012),  $n$  a insolação diária registrada com heliógrafo ( $\text{h d}^{-1}$ ) e  $N$  é o comprimento do dia ( $\text{h d}^{-1}$ ), calculado em função da declinação solar e da latitude local. O fotoperíodo diário para Santa Maria, RS, (considerando-se a duração do crepúsculo civil de 6° abaixo do plano do horizonte) foi calculado por meio da metodologia proposta por Kiesling (1982).

Os cálculos foram realizados a partir do desenvolvimento de algoritmos escritos no software Statistical Analysis System (SAS, 2001). A análise de variância e teste de Scott-Knott (Scott & Knott, 1974), em nível de 5% de significância, foram aplicados aos dados de duração dos subperíodos do ciclo e duração total do ciclo, considerando as datas de semeadura como fonte de variação.

Os valores de duração do subperíodo e do ciclo total, foram submetidos à análise de distribuição de probabilidade e aos testes para qualidade de ajuste das funções, para verificar qual Função de distribuição de probabilidades (Fdp) melhor representou a distribuição destes dados. O critério para a escolha das melhores funções para cada situação foi o nível de significância de 10% para pelo menos um dos testes de aderência, qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov, conforme Silva (2008) e Trentin (2009). Quando houve mais de uma

função de distribuição ajustada, para cada caso, foi escolhida a Fdp que apresentou o maior nível de significância indicado pelo teste qui-Quadrado.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A duração dos subperíodos foi representada pelas funções de distribuição de probabilidade (Fdp) sempre que houve ajuste aos dados (Tabelas 2 e 3). Das Fdp, exponencial, gama, lognormal, normal e Weibull testadas para cada data de semeadura e subperíodos, não foi possível obter ajuste em todos os subperíodos. A Fdp exponencial não se ajustou em nenhum dos casos. Para os 150 subperíodos avaliados, somente 78 Fdp foram ajustadas e, assim, as Fdp com melhor ajuste foram a lognormal (35,9%), Weibull (32,1%), normal (24,4%), e gama (7,7%).

Com as Fdp selecionadas, calculou-se a duração provável dos subperíodos e do ciclo para cada data de semeadura para as probabilidades de 95, 90, 75 e 50% de ocorrência (Tabelas 4 e 5). A partir das probabilidades, pode-se afirmar que em 95% dos casos, isto é, em 95 de cada 100 anos, a duração do subperíodo S-E da cultura da soja, pertencente ao grupo de maturação 7.4–8.0 e semeada em 01/out, será menor ou igual do que 15 dias (Tabela 4). Esta interpretação é similar para as demais datas de semeadura e subperíodos estudados. A tendência dos valores obtidos pelos níveis de probabilidade são semelhantes aos valores médios da duração dos subperíodos. As maiores durações possíveis de subperíodos em 95% dos anos ocorrem nas datas de semeadura (DS) 01/out (GM 7.4–8.0) 11/out (GM 6.9–7.3) e 21/out (GM 5.9–6.8), e após esses valores diminuem até a última data de semeadura 21/dez (GM 5.9–6.8 e 6.9–7.3) e 31/dez (GM 7.4–8.0).

Observa-se, nas Tabelas 4 e 5, que a duração provável do subperíodo semeadura-emergência (S-E) é maior nas primeiras datas de semeadura, considerando-se a probabilidade de 90%, isto é, em nove de cada dez anos a duração do subperíodo S-E é igual ou menor que 14 dias na semeadura de 01/out e igual ou menor que sete dias na semeadura de 31/dez. Isto ocorre devido à temperatura do solo bem como a temperatura do ar são mais baixas em outubro, aumentando a duração do subperíodo. Nas últimas datas de semeadura (dezembro) a duração dos subperíodos é menor devido à maior disponibilidade de radiação solar, resultando em um maior saldo de radiação, aumentando a energia disponível para o aquecimento do solo e do ar, acelerando assim o desenvolvimento da cultura.

**Tabela 2.** Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) selecionadas e respectivos parâmetros para determinar a duração dos subperíodos (Subp.) compreendidos entre a semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, nas datas de semeadura (DS) compreendidas entre 01/out e 11/nov, simuladas para cada ano do período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.

| D<br>S | Subp. | GM 5.9 – 6.8     |                |                | GM 6.9 – 7.3 |                |                | GM 7.4 – 8.0     |                |                |
|--------|-------|------------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|
|        |       | Fdp              | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> | Fdp          | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> | Fdp              | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> |
| 01/out | S-E   | — <sup>III</sup> | —              | —              | —            | —              | —              | G                | 21,840         | 0,4828         |
|        | E-V2  | —                | —              | —              | —            | —              | —              | SA <sup>II</sup> |                |                |
|        | V2-R1 | —                | —              | —              | —            | —              | —              | LGN              | 3,7955         | 0,0915         |
|        | R1-R5 | —                | —              | —              | —            | —              | —              | SA               |                |                |
|        | R5-R7 | —                | —              | —              | —            | —              | —              | SA               |                |                |
|        | R7-R8 | —                | —              | —              | —            | —              | —              | N                | 9,5455         | 3,1287         |
| 11/out | S-E   | —                | —              | —              | N            | 9,6818         | 1,7885         | N                | 9,6818         | 1,7885         |
|        | E-V2  | —                | —              | —              | LGN          | 2,5931         | 0,1638         | SA               |                |                |
|        | V2-R1 | —                | —              | —              | N            | 40,204         | 3,0997         | LGN              | 3,8564         | 0,0634         |
|        | R1-R5 | —                | —              | —              | SA           |                |                | SA               |                |                |
|        | R5-R7 | —                | —              | —              | SA           |                |                | N                | 35,068         | 2,0954         |
|        | R7-R8 | —                | —              | —              | W            | 3,5790         | 8,2109         | N                | 11,840         | 2,8525         |
| 21/out | S-E   | SA               |                |                | SA           |                |                | SA               |                |                |
|        | E-V2  | SA               |                |                | W            | 6,4960         | 14,121         | N                | 13,545         | 2,3073         |
|        | V2-R1 | LGN              | 3,5967         | 0,070          | LGN          | 3,7134         | 0,0617         | SA               |                |                |
|        | R1-R5 | SA               |                |                | SA           |                |                | SA               |                |                |
|        | R5-R7 | SA               |                |                | W            | 19,344         | 36,268         | SA               |                |                |
|        | R7-R8 | SA               |                |                | N            | 8,3864         | 2,5628         | W                | 5,0674         | 14,7881        |
| 01/nov | S-E   | W                | 7,1205         | 8,850          | W            | 7,1205         | 8,8508         | W                | 7,1205         | 8,8508         |
|        | E-V2  | SA               |                |                | SA           |                |                | SA               |                |                |
|        | V2-R1 | W                | 19,699         | 37,11          | W            | 21,622         | 42,322         | SA               |                |                |
|        | R1-R5 | G                | 688,23         | 0,040          | N            | 26,840         | 1,0330         | SA               |                |                |
|        | R5-R7 | W                | 19,238         | 36,38          | W            | 18,790         | 36,315         | W                | 17,015         | 36,7552        |
|        | R7-R8 | SA               |                |                | LGN          | 2,2286         | 0,2562         | LGN              | 2,7143         | 0,1720         |
| 11/nov | S-E   | SA               |                |                | SA           |                |                | SA               |                |                |
|        | E-V2  | SA               |                |                | SA           |                |                | LGN              | 2,4180         | 0,1450         |
|        | V2-R1 | SA               |                |                | LGN          | 3,7212         | 0,0489         | LGN              | 3,9006         | 0,0435         |
|        | R1-R5 | N                | 25,318         | 0,934          | SA           |                |                | SA               |                |                |
|        | R5-R7 | LGN              | 3,5669         | 0,063          | W            | 15,386         | 37,101         | W                | 16,169         | 37,3967        |
|        | R7-R8 | LGN              | 1,9663         | 0,302          | SA           |                |                | G                | 27,227         | 0,5651         |

<sup>I</sup>Os parâmetros das Fdp lognormal (LGN), gama (G), Weibull (W) são denominados "escalar" e "de forma", ao invés de média e desvio-padrão, como os parâmetros da função normal (N).

<sup>II</sup>Os dados não se ajustaram a nenhuma das Fdp testadas.

<sup>III</sup>Datas de semeadura não recomendadas pelas Indicações técnicas para a cultura da soja no RS e SC

**Tabela 3.** Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) selecionadas e respectivos parâmetros para determinar a duração dos subperíodos (Subp.) compreendidos entre a semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, nas datas de semeadura (DS) compreendidas entre 21/nov e 31/dez, simuladas para cada ano do período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | Subp. | GM 5.9 – 6.8     |                |                | GM 6.9 – 7.3 |                |                | GM 7.4 – 8.0 |                |                |
|--------|-------|------------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
|        |       | Fdp              | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> | Fdp          | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> | Fdp          | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> |
| 21/nov | S-E   | LGN              | 1,9517         | 0,1432         | LGN          | 1,9518         | 0,1432         | LGN          | 1,9518         | 0,1432         |
|        | E-V2  | LGN              | 2,2795         | 0,1191         | LGN          | 2,3215         | 0,1089         | LGN          | 2,3509         | 0,1180         |
|        | V2-R1 | LGN              | 3,5486         | 0,0559         | LGN          | 3,6978         | 0,0515         | SA           |                |                |
|        | R1-R5 | SA <sup>II</sup> |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | R5-R7 | W                | 17,454         | 36,977         | W            | 16,689         | 37,819         | W            | 14,353         | 38,5128        |
|        | R7-R8 | LGN              | 1,8667         | 0,3936         | LGN          | 2,0932         | 0,3250         | N            | 14,340         | 3,2916         |
| 01/dez | S-E   | SA               |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | E-V2  | SA               |                |                | SA           |                |                | LGN          | 2,2826         | 0,1308         |
|        | V2-R1 | SA               |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | R1-R5 | SA               |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | R5-R7 | N                | 36,7955        | 2,6552         | W            | 13,471         | 38,7559        | LGN          | 3,6346         | 0,0932         |
|        | R7-R8 | W                | 2,0880         | 6,4946         | N            | 7,1818         | 3,2369         | W            | 3,5628         | 14,1047        |
| 11/dez | S-E   | SA               |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | E-V2  | N                | 8,81818        | 1,2440         | SA           |                |                | N            | 9,5227         | 1,1908         |
|        | V2-R1 | SA               |                |                | G            | 604,31         | 0,0611         | LGN          | 3,7554         | 0,0330         |
|        | R1-R5 | SA               |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | R5-R7 | N                | 37,3409        | 2,9170         | N            | 38,250         | 3,2716         | W            | 11,526         | 40,9224        |
|        | R7-R8 | G                | 4,3987         | 1,2145         | W            | 2,2654         | 6,7708         | N            | 9,8605         | 3,9435         |
| 21/dez | S-E   | SA               |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | E-V2  | SA               |                |                | SA           |                |                | LGN          | 2,1834         | 0,1334         |
|        | V2-R1 | SA               |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | R1-R5 | SA               |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | R5-R7 | W                | 14,7460        | 39,522         | SA           |                |                | LGN          | 3,7075         | 0,0890         |
|        | R7-R8 | G                | 2,84344        | 1,492          | LGN          | 1,2781         | 0,6291         | N            | 7,1538         | 3,4909         |
| 31/dez | S-E   | — <sup>III</sup> | —              | —              | —            | —              | —              | SA           |                |                |
|        | E-V2  | —                | —              | —              | —            | —              | —              | SA           |                |                |
|        | V2-R1 | —                | —              | —              | —            | —              | —              | SA           |                |                |
|        | R1-R5 | —                | —              | —              | —            | —              | —              | SA           |                |                |
|        | R5-R7 | —                | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 15,548         | 43,5021        |
|        | R7-R8 | —                | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 1,8929         | 5,6491         |

<sup>I</sup>Os parâmetros das Fdp lognormal (LGN), gama (G), Weibull (W) são denominados "escalar" e "de forma", ao invés de média e desvio-padrão, como os parâmetros da função normal (N).

<sup>II</sup>Os dados não se ajustaram a nenhuma das Fdp testadas.

<sup>III</sup>Datas de semeadura não recomendadas pelas Indicações técnicas para a cultura da soja no RS e SC.

**Tabela 4.** Duração provável (dias) dos subperíodos (Subp.) compreendidos entre a semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, nas datas de semeadura (DS) compreendidas entre 01/out e 11/nov, simuladas para cada ano do período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | Subp. | GM 5.9 – 6.8   |     |     |     | GM 6.9 – 7.3 |     |     |     | GM 7.4 – 8.0 |     |     |     |
|--------|-------|----------------|-----|-----|-----|--------------|-----|-----|-----|--------------|-----|-----|-----|
|        |       | 95%            | 90% | 75% | 50% | 95%          | 90% | 75% | 50% | 95%          | 90% | 75% | 50% |
| 01/out | S-E   | — <sup>I</sup> | —   | —   | —   | —            | —   | —   | —   | 15           | 14  | 12  | 10  |
|        | E-V2  | —              | —   | —   | —   | —            | —   | —   | —   | 20*          | 19* | 17* | 16* |
|        | V2-R1 | —              | —   | —   | —   | —            | —   | —   | —   | 52           | 50  | 47  | 44  |
|        | R1-R5 | —              | —   | —   | —   | —            | —   | —   | —   | 25*          | 25* | 24* | 23* |
|        | R5-R7 | —              | —   | —   | —   | —            | —   | —   | —   | 38*          | 37* | 36* | 35* |
|        | R7-R8 | —              | —   | —   | —   | —            | —   | —   | —   | 15           | 14  | 12  | 10  |
| 11/out | S-E   | —              | —   | —   | —   | 13           | 12  | 11  | 10  | 13           | 12  | 11  | 10  |
|        | E-V2  | —              | —   | —   | —   | 18           | 16  | 15  | 13  | 18*          | 17* | 16* | 14* |
|        | V2-R1 | —              | —   | —   | —   | 45           | 44  | 42  | 40  | 52           | 51  | 49  | 47  |
|        | R1-R5 | —              | —   | —   | —   | 32*          | 31* | 31* | 31* | 26*          | 25* | 25* | 24* |
|        | R5-R7 | —              | —   | —   | —   | 38*          | 37* | 36* | 36* | 39           | 38  | 36  | 35  |
|        | R7-R8 | —              | —   | —   | —   | 11           | 10  | 9   | 7   | 17           | 15  | 14  | 12  |
| 21/out | S-E   | 11*            | 10* | 9*  | 8*  | 11*          | 10* | 9*  | 8*  | 11*          | 10* | 9*  | 8*  |
|        | E-V2  | 16*            | 16* | 14* | 13* | 17           | 16  | 15  | 13  | 17           | 17  | 15  | 14  |
|        | V2-R1 | 41             | 40  | 38  | 36  | 45           | 44  | 43  | 41  | 53*          | 52* | 51* | 49* |
|        | R1-R5 | 31*            | 30* | 30* | 30* | 31           | 30  | 30  | 29  | 24*          | 24* | 24* | 23* |
|        | R5-R7 | 38*            | 38* | 37* | 35* | 38           | 38  | 37  | 36  | 39*          | 38* | 37* | 35* |
|        | R7-R8 | 11*            | 11* | 9*  | 7*  | 13           | 12  | 10  | 8   | 18           | 17  | 16  | 14  |
| 01/nov | S-E   | 10             | 10  | 9   | 8   | 10           | 10  | 9   | 8   | 10           | 10  | 9   | 8   |
|        | E-V2  | 15*            | 14* | 13* | 12* | 15*          | 15* | 13* | 12* | 16*          | 15* | 14* | 13* |
|        | V2-R1 | 39             | 39  | 38  | 36  | 45           | 44  | 43  | 42  | 53*          | 52* | 51* | 50* |
|        | R1-R5 | 29             | 29  | 28  | 28  | 29           | 28  | 28  | 27  | 22*          | 22* | 22* | 21* |
|        | R5-R7 | 39             | 38  | 37  | 36  | 38           | 38  | 37  | 36  | 39           | 39  | 37  | 36  |
|        | R7-R8 | 11*            | 11* | 9*  | 8*  | 14           | 13  | 11  | 9   | 20           | 19  | 17  | 15  |
| 11/nov | S-E   | 10*            | 9*  | 9*  | 8*  | 10*          | 9*  | 9*  | 8*  | 10*          | 9*  | 9*  | 8*  |
|        | E-V2  | 13*            | 13* | 12* | 11* | 14*          | 13* | 12* | 11* | 14           | 14  | 12  | 11  |
|        | V2-R1 | 39*            | 38* | 37* | 36* | 45           | 44  | 43  | 41  | 53           | 52  | 51  | 49  |
|        | R1-R5 | 27             | 27  | 26  | 25  | 26*          | 26* | 25* | 25* | 20*          | 20* | 20* | 19* |
|        | R5-R7 | 39             | 38  | 37  | 35  | 40           | 39  | 38  | 36  | 40           | 39  | 38  | 37  |
|        | R7-R8 | 12             | 11  | 9   | 7   | 14*          | 13* | 11* | 10* | 21           | 19  | 17  | 15  |

\*As probabilidades para DS sem ajuste de Fdp (SA) foram determinadas pela distribuição empírica.

<sup>I</sup>Datas de semeadura não recomendadas pelas Indicações técnicas para a cultura da soja no RS e SC.

**Tabela 5.** Duração provável (dias) dos subperíodos (Subp.) compreendidos entre a semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, nas datas de semeadura (DS) compreendidas entre 21/nov e 31/dez, simuladas para cada ano do período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | Subp. | GM 5.9 – 6.8   |     |     |     | GM 6.9 – 7.3 |     |     |     | GM 7.4 – 8.0 |     |     |     |
|--------|-------|----------------|-----|-----|-----|--------------|-----|-----|-----|--------------|-----|-----|-----|
|        |       | 95%            | 90% | 75% | 50% | 95%          | 90% | 75% | 50% | 95%          | 90% | 75% | 50% |
| 21/nov | S-E   | 9              | 8   | 8   | 7   | 9            | 8   | 8   | 7   | 9            | 8   | 8   | 7   |
|        | E-V2  | 12             | 11  | 11  | 10  | 12           | 12  | 11  | 10  | 13           | 12  | 11  | 10  |
|        | V2-R1 | 38             | 37  | 36  | 35  | 44           | 43  | 42  | 40  | 51*          | 50* | 49* | 48* |
|        | R1-R5 | 24*            | 24* | 23* | 23* | 24*          | 23* | 23* | 22* | 19*          | 19* | 18* | 18* |
|        | R5-R7 | 39             | 39  | 38  | 36  | 40           | 40  | 39  | 37  | 42           | 41  | 39  | 38  |
|        | R7-R8 | 12             | 11  | 8   | 6   | 14           | 12  | 10  | 8   | 20           | 19  | 17  | 14  |
| 01/dez | S-E   | 8*             | 8*  | 7*  | 7*  | 8*           | 8*  | 7*  | 7*  | 8*           | 8*  | 7*  | 7*  |
|        | E-V2  | 11*            | 11* | 10* | 9*  | 12*          | 11* | 10* | 10* | 12           | 12  | 11  | 10  |
|        | V2-R1 | 37*            | 36* | 35* | 34* | 42*          | 41* | 40* | 39* | 49*          | 48* | 47* | 46* |
|        | R1-R5 | 22*            | 22* | 21* | 21* | 21*          | 21* | 21* | 19* | 18*          | 17* | 17* | 17* |
|        | R5-R7 | 41             | 40  | 39  | 37  | 42           | 41  | 40  | 38  | 44           | 43  | 40  | 38  |
|        | R7-R8 | 11             | 10  | 8   | 5   | 13           | 11  | 9   | 7   | 19           | 18  | 15  | 13  |
| 11/dez | S-E   | 8*             | 7*  | 7*  | 6*  | 8*           | 7*  | 7*  | 6*  | 8*           | 7*  | 7*  | 6*  |
|        | E-V2  | 11             | 10  | 10  | 9   | 11*          | 11* | 10* | 9*  | 11           | 11  | 10  | 10  |
|        | V2-R1 | 35*            | 35* | 34* | 33* | 39           | 39  | 38  | 37  | 45           | 45  | 44  | 43  |
|        | R1-R5 | 20*            | 19* | 19* | 19* | 20*          | 19* | 19* | 18* | 16*          | 16* | 16* | 15* |
|        | R5-R7 | 42             | 41  | 39  | 37  | 44           | 42  | 40  | 38  | 45           | 44  | 42  | 40  |
|        | R7-R8 | 10             | 9   | 7   | 5   | 11           | 10  | 8   | 6   | 16           | 15  | 13  | 10  |
| 21/dez | S-E   | 7*             | 7*  | 7*  | 6*  | 7*           | 7*  | 7*  | 6*  | 7*           | 7*  | 7*  | 6*  |
|        | E-V2  | 10*            | 10* | 9*  | 8*  | 11*          | 10* | 10* | 9*  | 11           | 11  | 10  | 9   |
|        | V2-R1 | 33*            | 33* | 32* | 31* | 37*          | 36* | 36* | 35* | 43*          | 42* | 41* | 40* |
|        | R1-R5 | 17*            | 17* | 17* | 16* | 18*          | 18* | 17* | 17* | 15*          | 15* | 15* | 15* |
|        | R5-R7 | 43             | 42  | 40  | 39  | 45*          | 43* | 41* | 39* | 47           | 46  | 43  | 41  |
|        | R7-R8 | 9              | 8   | 6   | 4   | 10           | 8   | 5   | 4   | 13           | 12  | 10  | 7   |
| 31/dez | S-E   | — <sup>1</sup> | —   | —   | —   | —            | —   | —   | —   | 7*           | 7*  | 6*  | 6*  |
|        | E-V2  | —              | —   | —   | —   | —            | —   | —   | —   | 10*          | 10* | 9*  | 9*  |
|        | V2-R1 | —              | —   | —   | —   | —            | —   | —   | —   | 39*          | 39* | 38* | 37* |
|        | R1-R5 | —              | —   | —   | —   | —            | —   | —   | —   | 15*          | 15* | 14* | 14* |
|        | R5-R7 | —              | —   | —   | —   | —            | —   | —   | —   | 47           | 46  | 44  | 42  |
|        | R7-R8 | —              | —   | —   | —   | —            | —   | —   | —   | 10           | 9   | 7   | 5   |

\*As probabilidades para DS sem ajuste de Fdp (SA) foram determinadas pela distribuição empírica. <sup>1</sup>Datas de semeadura não recomendadas pelas Indicações técnicas para a cultura da soja no RS e SC.

A duração do ciclo foi representada pelas Fdp sempre que houve ajuste aos dados (Tabela 6). Não foi possível obter ajuste de Fdp em todos os ciclos totais e a Fdp exponencial também não obteve ajuste. Para ciclo total nos três grupos de maturação foram avaliados 25 ciclos, dos quais 19 apresentaram o ajuste a pelo menos uma Fdp. A Fdp lognormal foi a que apresentou melhor ajuste das frequências, com 52,6%, seguida da Weibull (26,3%), normal (15,8%) e gama (5,3%). Silva (2008) e Maldaner (2012) também observaram maior ajuste da Fdp Lognormal para a duração do ciclo das culturas do feijoeiro e do girassol, respectivamente.

A partir destas probabilidades, pode-se afirmar que em 95% dos casos o ciclo da soja do grupo de maturação 5.9–6.8 será menor ou igual a 137 dias e 110 dias se as semeaduras ocorrem em 01/out e 21/dez, respectivamente. Essa interpretação pode ser utilizada para as demais datas de semeadura, grupos de maturação e níveis de probabilidade. A tendência dos valores estimados pelos níveis de probabilidade foram similares aos valores médios da duração do ciclo, ou seja, a duração do ciclo é maior nas primeiras datas de semeadura e menor nas últimas datas de semeadura.

Os resultados mostram que a duração de todos os subperíodos manteve-se abaixo de 50 dias nos três grupos de maturação avaliados (Figura 1). A maior duração foi no subperíodo compreendido entre a primeira folha trifoliada (V2) e início da floração (R1), nas primeiras datas de semeadura (outubro). Contudo, nas datas de semeadura a partir de meados de novembro a maior duração foi no subperíodo compreendido entre o início do enchimento do grão (R5) e início da maturação (R7). Isto pode ser explicado pelo fato da cultura da soja apresentar resposta fotoperiódica e sendo uma planta de dias curtos, é induzida a florescer quando o comprimento do dia for inferior ao fotoperíodo crítico da cultivar.

Utilizando-se a metodologia proposta por Kiesling (1982), adotando-se o crepúsculo civil de 6° abaixo do plano do horizonte, em função da latitude em que está situada a estação meteorológica (29°43' S), o fotoperíodo varia de aproximadamente 11,11 a 14,97 horas, nos solstícios de inverno (21/jun) e de verão (21/dez), respectivamente. Deste modo, as semeaduras de outubro terão durações maiores do ciclo em comparação às semeadas em dezembro, pois a duração diária do fotoperíodo está em ascensão até 21/dez, após esta data a duração do fotoperíodo está em declínio, favorecendo o aumento da taxa de desenvolvimento e, conseqüentemente, diminuindo a duração do ciclo.

**Tabela 6.** Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) selecionadas e respectivos parâmetros para determinar a duração do ciclo da cultura da soja e duração provável para três grupos de maturação (GM), nas diferentes datas de semeadura (DS) simuladas para cada ano do período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.

| GM        | DS               | Fdp              | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> | Probabilidade |     |     |     |
|-----------|------------------|------------------|----------------|----------------|---------------|-----|-----|-----|
|           |                  |                  |                |                | 95%           | 90% | 75% | 50% |
| 5.9 – 6.8 | 21/out           | LGN              | 4,866          | 0,032          | 137           | 135 | 133 | 130 |
|           | 01/nov           | N                | 126,659        | 3,423          | 132           | 131 | 129 | 127 |
|           | 11/nov           | W                | 37,677         | 123,613        | 127           | 126 | 125 | 122 |
|           | 21/nov           | SA <sup>II</sup> |                |                | 122           | 121 | 119 | 118 |
|           | 01/dez           | N                | 112,886        | 2,451          | 117           | 116 | 115 | 113 |
|           | 11/dez           | SA <sup>II</sup> |                |                | 111           | 111 | 109 | 108 |
|           | 21/dez           | LGN              | 4,638          | 0,019          | 107           | 106 | 105 | 103 |
| 6.9 – 7.3 | 11/out           | LGN              | 4,915          | 0,043          | 147           | 144 | 140 | 136 |
|           | 21/out           | LGN              | 4,909          | 0,032          | 143           | 141 | 139 | 136 |
|           | 01/nov           | N                | 133,500        | 3,560          | 139           | 138 | 136 | 134 |
|           | 11/nov           | SA <sup>II</sup> |                |                | 135           | 134 | 132 | 130 |
|           | 21/nov           | LGN              | 4,831          | 0,0225         | 130           | 129 | 127 | 125 |
|           | 01/dez           | W                | 60,831         | 121,119        | 123           | 123 | 122 | 120 |
|           | 11/dez           | SA <sup>II</sup> |                |                | 117           | 116 | 115 | 114 |
| 21/dez    | SA <sup>II</sup> |                  |                | 112            | 111           | 110 | 109 |     |
| 7.4 – 8.0 | 01/out           | LGN              | 4,941          | 0,059          | 154           | 151 | 146 | 140 |
|           | 11/out           | G                | 523,462        | 0,272          | 153           | 151 | 147 | 143 |
|           | 21/out           | LGN              | 4,963          | 0,038          | 152           | 150 | 147 | 143 |
|           | 01/nov           | LGN              | 4,963          | 0,300          | 150           | 149 | 146 | 143 |
|           | 11/nov           | W                | 41,023         | 142,297        | 146           | 145 | 143 | 141 |
|           | 21/nov           | W                | 52,292         | 137,719        | 141           | 140 | 139 | 137 |
|           | 01/dez           | W                | 48,172         | 132,376        | 135           | 135 | 133 | 131 |
|           | 11/dez           | LGN              | 4,815          | 0,021          | 128           | 127 | 125 | 123 |
|           | 21/dez           | SA <sup>II</sup> |                |                | 121           | 120 | 119 | 117 |
|           | 31/dez           | LGN              | 4,703          | 0,019          | 114           | 113 | 112 | 110 |

<sup>I</sup>Os parâmetros das Fdp lognormal (LGN), gama (G), Weibull (W) são denominados "escalar" e "de forma", ao invés de média e desvio-padrão, como os parâmetros da função normal (N).

<sup>II</sup>Os dados não se ajustaram a nenhuma das Fdp testadas. Nestes casos o valor provável foi obtido pela probabilidade empírica.

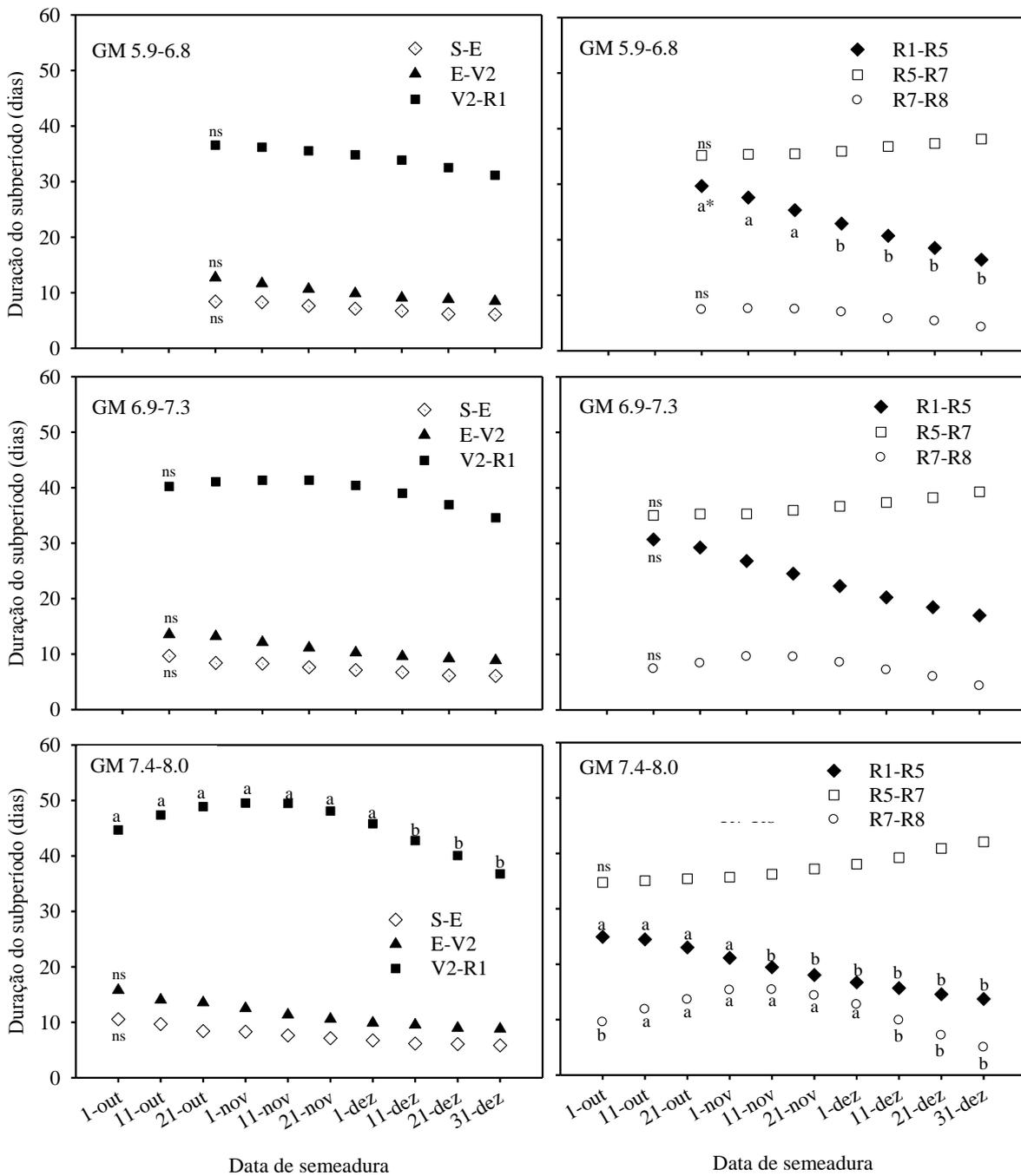
Ao observar a duração média dos subperíodos e do ciclo em função das datas de semeadura (Figura 1) verifica-se que o subperíodo compreendido entre a semeadura e emergência (S-E) é maior nas primeiras datas de semeadura (DS). Isso é atribuído à temperatura do solo, que é mais baixa nas primeiras datas de semeadura, aumentando assim a duração deste subperíodo (Schneider, et al., 1987). O subperíodo emergência (E) até a primeira folha trifoliada (V2) variou de 12,0 dias (21/out) até 8,4 dias (21/dez). O subperíodo V2-R1 apresentou uma variação similar na duração, sendo maior nas primeiras DS e menor nas últimas DS para os grupos de maturação 5.9–6.8 e 6.9–7.3. Essa variação se deve não

somente ao aumento da disponibilidade térmica como também à resposta fotoperiódica da cultura da soja.

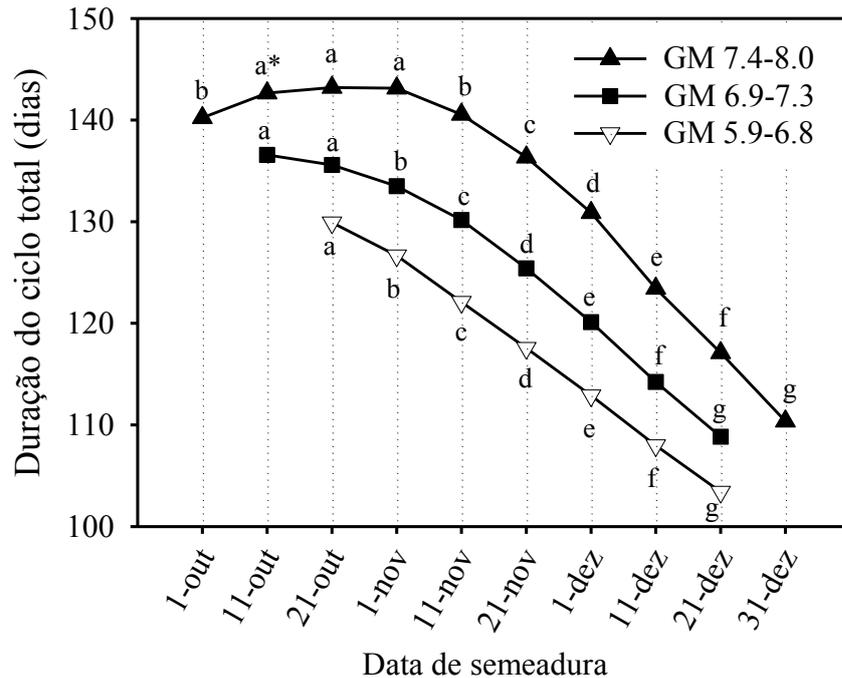
No subperíodo compreendido entre início da floração (R1) e início do enchimento do grão (R5), a primeira data de semeadura simulada (21/out) resulta na maior duração, decrescendo até a última data de semeadura (21/dez). Por outro lado, o subperíodo compreendido entre o início do enchimento do grão (R5) e início da maturação (R7) apresenta uma variação inversa, com duração maior na última data de semeadura. Isso é devido a maior disponibilidade térmica em meados de fevereiro (ocorrência do subperíodo R5-R7 da primeira data de semeadura) do que em meados de abril (ocorrência do subperíodo R5-R7 da última data de semeadura). Com a proximidade do Solstício de verão, há uma maior duração do dia e maior radiação solar disponível. Assim, o saldo de radiação é maior, resultando em maior energia para aquecimento do ar e, por consequência, o desenvolvimento da cultura da soja ocorre de forma mais rápida.

Os valores de duração dos subperíodos para os grupos de maturação 6.9–7.3 e 7.4–8.0 seguiram tendências similar ao grupo de maturação 5.9–6.8, a diferença está na escala dos valores de duração dos subperíodos. Não houve diferenças estatisticamente significativas entre as diferentes datas de semeadura na duração dos subperíodos iniciais, S-E, E-V2 e V2-R1, com exceção do subperíodo V2-R1 do grupo de maturação 7.4–8.0, neste caso as três últimas datas de semeadura diferiram estatisticamente das demais datas de semeadura. Estas similaridades nos valores médios de duração dos subperíodos podem ser explicadas pela grande variabilidade dos valores de duração dos subperíodos e isso se deve a grande variabilidade dos dados meteorológicos nos 44 anos avaliados.

A variação da duração do ciclo de desenvolvimento para os três grupos de maturação (Figura 2) foi similar, sendo a maior duração na primeira data de semeadura diminuindo gradativamente até a última data de semeadura com a menor duração do ciclo. Uma exceção a esta variação foram as data de semeadura 11/out, 21/out e 01/nov do GM 7.4–8.0, que foram ligeiramente maiores que a primeira data de semeadura (01/out). Dallacort et al. (2006), utilizando o modelo de simulação do desenvolvimento da cultura da soja Cropgro-soybean em Palotina (24°17'S), Paraná, também constataram que à medida que a semeadura da soja é realizada em datas mais tardias, o ciclo da cultura tende a diminuir.



**Figura 1.** Duração média dos subperíodos de desenvolvimento da cultura soja simulados por meio de variáveis meteorológicas diárias, para a série histórica de 1968 a 2012, em função das datas de semeadura, compreendidos entre a semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), para os grupos de maturação: 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0. Santa Maria, RS, 2013. \*Médias seguidas da mesma letra dentro do mesmo subperíodo, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de Probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo.



**Figura 2.** Duração média do ciclo de desenvolvimento de três grupos de maturação da cultura da soja (GM) 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, em função das diferentes datas de semeadura simuladas durante os anos de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013. \*Médias seguidas da mesma letra dentro do mesmo grupo de maturação (GM), não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de Probabilidade.

Os maiores ciclos ocorreram nas DS 11/out (6.9–7.3 e 7.4–8.) e 21/out (5.9–6.8) com, 140, 137 e 130 dias, respectivamente. As menores durações de ciclo total ocorreram nas DS 21/dez (5.9–6.8 e 6.9–7.3) e 31/dez (7.4–8.0) com, 110, 109 e 103 dias, respectivamente. Esses dados são similares a Dallacort et al. (2006), que obtiveram durações de ciclo das cultivares CD 202 e CD 206 (GM 5.9–6.8) variando em média de 127 dias (1º de outubro) até 113 dias (1º de dezembro). Mercau et al. (2007), relatam valores de duração do período semeadura-início da maturação (S-R7) variando de 94 a 158 dias, para cultivares de soja desde o GM 2.0 até 7.0, em diversas regiões da Argentina de latitudes variando de aproximadamente 30 a 36°S.

## CONCLUSÕES

A duração dos subperíodos e do ciclo de desenvolvimento da soja é variável conforme a data de semeadura.

A duração do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja é maior nas datas de semeadura de outubro decrescendo até últimas datas de semeadura de dezembro.

As distribuições lognormal, Weibull e normal melhor estimaram a duração dos subperíodos de desenvolvimento da soja. A distribuição lognormal estimou melhor quando considerada a duração do ciclo de desenvolvimento da soja.

Ao nível de 90% de probabilidade as épocas de semeadura 21/dez (GM 5.9–6.8 e 6.9–7.3) e 31/dez (GM 7.4–8.0), tem a menor duração do ciclo de desenvolvimento da soja, com duração máxima de 106, 111 e 113 dias, respectivamente.

## LITERATURA CITADA

- BURIOL, G.A. et al. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria – RS. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.42, n.9, p.1563-1567, 2012.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: grãos, primeiro levantamento, outubro 2012 / Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab, 2012.
- DALLACORT, R. et al. Utilização do modelo Cropgro-Soybean na determinação de melhores épocas de semeadura da soja, na região de Palotina, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 28, n. 4, p. 583-589, 2006.
- FARIAS, J.R.B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L. SOJA. In: MONTEIRO, J. E. (Org.). *Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*. Brasília, DF: INMET, 2009, p. 261-278.
- FEHR, W.R.; CAVINES, C.E. *Stages of soybean development*. Ames: Iowa State University, 1977, 21p. (Special Report 80)
- HELDWEIN, A.B.; BURIOL, G.A.; STRECK, N.A. O Clima de Santa Maria. *Revista Ciência Ambiente*, v.38, p.43-58, 2009.
- KIESLING, T.C. Calculation of the length of the day. *Agronomy Journal*, Madison, v.74, p.758-759, 1982.

- MALDANER, I.C. Probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica na cultura do girassol na região central do Rio Grande do Sul. 2012. 141 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2012.
- MARTORANO, L.G.; et al. Decision Strategies for Soil Water Estimations in Soybean Crops Subjected to No-Tillage and Conventional Systems, in Brazil. In: Manish Kumar. (Org.). Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management. Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management. Rijeka: InTech - Open Access Publisher, 2012, p. 439-453.
- MERCAU, J.L. Prediting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. Field Crops Research, Amsterdam, v. 100, p. 200-209, 2007.
- REUNIÃO DE PESQUISA DA SOJA DA REGIÃO SUL, 38., 2010, Cruz Alta. Indicações Técnicas para a Cultura da Soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2010/2011 e 2011/2012. Cruz Alta: FUNDACEP FECOTRIGO, 2010. 168p.
- RODRIGUES, O.; DIDONET, A.D.; LHAMBY, J.C.B.; BERTAGNOLLI, P.F.; LUIZ, J.S. da. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.36, n.3, p.431-7, 2001.
- SAS INSTITUTE. SAS-STAT: user's guide. 8th ed. Cary: SAS Institute, 2001.
- SCHNEIDER, F.M.; BURIOL, G.A.; HELDWEIN, A.B.; MANFRON, P.A.; SACCOL, A.V.; ESTEFANEL, V. Temperatura base e soma térmica do subperíodo semeadura emergência para algumas cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). Revista do Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, v. 17, n.4, p. 299-308, 1987.
- SCOTT, A.J.; KNOTT, M.A. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. Biometrics, Raleigh, v.30, n.3, p.507-512. 1974.
- SETIYONO, T.D. et al. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions. Field Crops Research, Amsterdam, v.100, p.257-271, 2007.
- SILVA, J.C. Parâmetros de irrigação para o feijoeiro em diferentes solos e épocas de semeadura na região central do Rio Grande do Sul. 2008. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- SINCLAIR, T.R. Water and nitrogen limitations in soybean grain productivity. I. Model development. Field Crops Research, Amsterdam, v.15, p.125-141, 1986.
- SINCLAIR, T.R. et al. Soybean flowering date: linear and logistic models based on temperature and photoperiod. Crop Science, Madison, v. 31, p. 786–790, 1991.

- SINCLAIR, T.R. et al. Soybean yields and soil water status in Argentina: Simulation analysis. *Agricultural Systems*, v. 94, p. 471-477, 2007.
- STRECK, N.A. et al. Estimativa do plastocrono em cultivares de soja. *Bragantia*, Campinas, v. 67, n. 1, p. 67-73, 2008.
- STRECK, N.A. et al. Improving node number simulation in soybean. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 44, n. 7, p. 661-668, 2009.
- TRENTIN, G. Parâmetros de irrigação por análise numérica para a cultura do milho na Região Central do Rio Grande do Sul. 2009. 192 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

## **CAPÍTULO II – Necessidade de irrigação para a cultura da soja na região central do Rio Grande do Sul**

**Resumo:** O objetivo deste trabalho foi determinar os valores prováveis de lâmina de irrigação e do número de irrigações necessárias para a cultura da soja semeada em diferentes datas, considerando-se as diferentes capacidades de armazenamento de água disponível (CAD) dos principais solos da região Central do Rio Grande do Sul. Este estudo foi realizado por meio de modelos matemáticos de desenvolvimento da cultura da soja publicados na literatura e dados meteorológicos, coletados na Estação Climatológica Principal de Santa Maria (ECPSM), RS (latitude: 29° 43'23"S, longitude: 53° 43'15"W e altitude: 95 m), desde outubro de 1968 até julho de 2012, totalizando 44 anos de observações. A simulação do desenvolvimento da cultura foi realizada para diferentes datas de semeadura, a cada dez dias, foram considerados três grupos de maturação (GM): 5.9–6.8 (Ciclo precoce/semiprecoce), 6.9–7.3 (Ciclo médio) e 7.8–8.0 (Ciclo semitardio/tardio). Para simular a irrigação, os 13 solos da região de abrangência da ECPSM, foram agrupados em cinco grupos que apresentam características semelhantes de capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) e capacidade de infiltração. O balanço hídrico diário determinou a variação da água disponível e o momento da irrigação. O momento da irrigação foi determinado quando os solos alcançavam a fração mínima de água disponível a ser mantida. Para isso, foram utilizados quatro manejos que representaram a condição de quando a água retirada do solo alcançava a fração 20%, 30%, 40% e 50% da CAD. Verificou-se que as primeiras datas de semeadura avaliadas (outubro) necessitam de maior lâmina de irrigação do que as últimas datas de semeadura (dezembro).

**Palavras-chave:** *Glycine max* (L.) Merrill, irrigação, capacidade de armazenamento de água disponível (CAD).

### **Irrigation requirement for soybean in the central region of Rio Grande do Sul**

**Abstract:** The objective of this study was to determine the probable irrigation depth and number of irrigations needed for soybean sown at different dates, considering the different storage capacities available water (CAD) of the main soil the central region of Rio Grande do Sul This study was conducted by means of mathematical models of development of soybean published literature and meteorological data collected at a climatological station of Santa Maria, RS (latitude: 29°43'23 "S, longitude: 53°43'15" W, altitude: 95 m), from October 1968

until July 2012, totaling 44 years of observations. The simulation of crop development was carried out for different sowing dates every ten days, considering three maturity groups (GM): 5.9-6.8, 6.9-7.3 and 7.8-8.0. To simulate irrigation, the 13 soils of the region covered ECPSM were grouped into five groups that have similar characteristics of water storage capacity available (CAD) and infiltration capacity. The daily water balance determined the variation of water availability and timing of irrigation. The timing of irrigation was determined when the soil reached a minimum fraction of available water to be maintained. For this, we used four handlings representing the condition when the water withdrawn from the soil fraction reached 20%, 30%, 40% and 50% of the CAD. Early evaluated sowing dates (October) require more irrigation than the latest sowing dates (December).

**Key words:** *Glycine max* (L.) Merrill, irrigation, water storage capacity available (CAD)

## INTRODUÇÃO

A soja contribui com parcela significativa das exportações brasileiras. Segundo a CONAB (2012), devido à diminuição da oferta mundial do grão os preços aumentaram e, conseqüentemente, também a área cultivada com soja. Em média, sua produção tem sido crescente nos últimos anos devido à aplicação de tecnologia à cultura, pelo emprego de materiais genéticos de bom potencial produtivo e pela crescente profissionalização dos produtores rurais.

No entanto, o rendimento de grãos dessa cultura apresenta grandes oscilações entre locais e anos, sendo a variabilidade na frequência, intensidade e distribuição de chuvas, especialmente durante o período de primavera-verão, a principal limitação à expressão do potencial de rendimento da cultura no Sul do Brasil (Cunha et al.,1998; Matzenauer et al., 2002). A variabilidade interanual e espacial no rendimento de grãos no Estado do Rio Grande do Sul devem-se principalmente à distribuição aleatória e espacial da precipitação pluvial. A água no solo é o fator que, com maior frequência e intensidade, afeta o rendimento de grãos.

Simulando-se o desenvolvimento das culturas em determinadas condições é possível antever a necessidade hídrica das mesmas àquelas condições e, com isso, determinar a necessidade de irrigação, bem como de outros parâmetros necessários para a elaboração de projetos de irrigação. A utilização de modelos computacionais que integram a simulação do crescimento e da produtividade da cultura associados a aspectos econômicos constitui-se uma poderosa ferramenta de auxílio à tomada de decisão de irrigar ou não (Frizzone et al., 2005).

A cultura da soja no Rio Grande do Sul tem o seu crescimento e desenvolvimento nos meses de outubro a maio. Neste período os danos causados pela deficiência hídrica são frequentes. As perdas do potencial de rendimento relativo da cultura chegou a 55% em 80% dos anos no sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul (Cunha et al., 1998). O manejo da irrigação, a quantidade de água e o número de irrigações dependem da variabilidade espacial e temporal dos elementos meteorológicos, bem como do tipo de solo e das condições de cultivo, sendo assim, também influenciadas pela data de semeadura.

Geralmente são utilizados dados acumulados na escala mensal ou anual para estudo das precipitações pluviométricas, e desta maneira podem ocorrer incoerências. A análise das precipitações pluviais engloba somente o total de precipitação pluvial e não a precipitação efetiva, gerando inconsistência dessas informações (Fontana & Almeida, 2002). Outro problema relacionado aos dados mensais é que eles em geral não demonstram deficiências hídricas quando estas ocorrem em uma parte do período mensal (Nied et al., 2005; Silva, 2005; Leivas et al., 2006).

Aplicando-se a técnica da modelagem de desenvolvimento das culturas e por meio do balanço hídrico sequencial diário aplicado nos diferentes solos da região é possível estimar a provável lâmina de irrigação e número de irrigações com base em um banco de dados de longo período de observações meteorológicas.

O objetivo deste trabalho foi determinar os valores médios de lâmina de irrigação e do número de irrigações necessários para a cultura da soja semeada em diferentes datas de semeadura, considerando-se a capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) dos principais solos da região Central do Rio Grande do Sul.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

A região de estudo é a área de abrangência da Estação Climatológica Principal de Santa Maria (ECPSM), definida por Cardoso (2005), entre as coordenadas 29°23'15"S e 30°22'17"S, 54°32'07" e 53°05'20", correspondendo a aproximadamente 8000 km<sup>2</sup>. Os municípios que compõem a área de abrangência do estudo são: Dilermando de Aguiar, Formigueiro, Itaara, Santa Maria, São João do Polêsine, São Martinho da Serra, São Pedro do Sul, Restinga Seca, Silveira Martins, e parte dos municípios de Cacequi, Faxinal do Soturno, Ivorá, Júlio de Castilhos, Santa Margarida do Sul, São Gabriel, São Sepé e Vila Nova do Sul.

A região é delimitada pelo Planalto Arenito-basáltico, pela Campanha, pela Serra do Sudeste e Planície Litorânea, que apresentam diferentes características quanto ao relevo e

altitude. Nessa região há vários tipos de solos, em virtude da diversidade de materiais de origem e do relevo. Os solos que predominam na região são os Argissolos, das unidades de mapeamento Alto das Canas, Júlio de Castilhos, Oásis, São Pedro e Santa Maria (Brasil, 1973; Streck et al., 2008a), seguido dos Planossolos (Vacacaí e São Gabriel) e demais solos (Neossolo, Chernossolo, Luvisso e Latossolo), ocupando aproximadamente 51%, 34%, e 15% da área, respectivamente.

O cálculo das médias diárias das variáveis meteorológicas temperatura do ar ( $T_m$ ), umidade relativa do ar ( $UR_m$ ), pressão parcial ( $e$ ), pressão de saturação de vapor d'água ( $e_s$ ) e do déficit de saturação do ar ( $d$ ), foi realizado conforme equações descritas na Tabela 1. A pressão de saturação foi calculada pela equação de Tetens (Murray, 1967), com coeficientes ajustados conforme Fischer et al. (1987).

A densidade de fluxo da radiação global incidente ( $R_g$ ) foi estimada através da equação de Ångström-Prescott, utilizando-se coeficientes mensais ajustados para Santa Maria por Buriol et al. (2012). O fotoperíodo diário para Santa Maria, RS, (considerando-se a duração do crepúsculo civil de um ângulo de  $6^\circ$  abaixo do plano do horizonte) foi calculado por meio da metodologia de Kiesling (1982).

Para estimar a evapotranspiração de referência foi utilizado o método de Penman-Monteith, conforme Allen et al. (1998) (Equação 10). Para os poucos períodos com ausência de dados de velocidade do vento foi utilizada a equação de Penman (Varejão Silva, 2000), com um ajuste no termo aerodinâmico, através da evaporação medida no evaporímetro de Piche ( $E_vP$ ,  $mm\ d^{-1}$ ) e do déficit de saturação do ar (kPa), conforme Alberto et al. (2002) (Equação 11).

**Tabela 1.** Variáveis meteorológicas calculadas a partir dos dados meteorológicos e respectivas funções matemáticas.

| Variáveis   | Equação  |
|---|--|
| Temperatura média do ar (°C)  | $T_m = 0,2 \cdot (T_9 + T_{\max} + T_{\min} + 2 \cdot T_{21})$ (1)   |
| Umidade relativa média do ar (%)  | $UR_m = 0,25(UR_9 + UR_{15} + 2 \cdot UR_{21})$ (2)  |
| Pressão de saturação de vapor do ar (kPa)   | $e_s = 0,6107 \cdot \exp\left(\frac{17,2694T_m}{237,3 + T_m}\right)$ (3)   |
| Pressão parcial de vapor do ar (kPa)  | $e = 0,01 \cdot e_s \cdot UR_m$ (4)  |
| Déficit de saturação do ar (kPa)  | $d = e_s - e$ (5)  |
| Tangente à curva de saturação (kPa °C <sup>-1</sup> )                                 | $\Delta = 4098 \cdot e_s \cdot (T_m + 237,3)^{-2}$ (6)   |
| Densidade de fluxo da radiação global incidente (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ) | $R_g = K_o \downarrow (b_o + b_1 \cdot n \cdot N^{-1})$ (7)  |
| Balço de radiação de ondas longas (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )               | $L^* = -\varepsilon \cdot \sigma (T_m + 273)^4 \cdot [0,56 + 0,09(0,75 \cdot e)^{0,5}]$<br>$(0,1 + 0,9 \cdot n \cdot N^{-1})$ (8)        |
| Saldo de radiação (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )                               | $Q^* = R_g \cdot (1 - r) + L^*$ (9)  |
| Evapotranspiração de referência (mm d <sup>-1</sup> )                                 | $ET_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} \frac{Q^*}{L} + \frac{\gamma \cdot 900 \cdot U_2 \cdot d}{(\Delta + \gamma^*)(T_m + 275)}$ (10) |
| Evapotranspiração de referência (mm d <sup>-1</sup> )                                 | $ET_o = \frac{(\Delta \cdot \gamma^{-1}) \cdot (Q^* \cdot L^{-1}) + (a + b \text{ EvP}) \cdot d}{(\Delta \cdot \gamma^{-1}) + 1}$ (11)   |
| Evapotranspiração da cultura (mm d <sup>-1</sup> )                                    | $ETc = ET_o \cdot Kc$ (12)   |
| Constante psicométrica corrigida  | $\gamma^* = \gamma(1 + 0,34 U_2)$ (13)   |

em que:  $\Delta$  é a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água para a temperatura média diária;  $T_m$  (kPa °C<sup>-1</sup>),  $\varepsilon$  a emissividade da superfície vegetada de referência (0,95);  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann ( $4,9861 \cdot 10^{-9}$  MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> K<sup>-4</sup>);  $r$  da superfície vegetada de referência (0,23);  $\gamma$  a constante psicométrica (0,0662 kPa °C<sup>-1</sup>);  $U_2$  a velocidade média diária do vento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>),  $d$  o déficit de saturação de vapor do ar (kPa) e  $L$  o calor latente de evaporação ( $2,46$  MJ kg<sup>-1</sup>);  $a$  e  $b$  são coeficientes ajustados por Alberto et al. (2002) para estimativa do fator aerodinâmico ( $Ea$ ) a partir da evaporação do evaporímetro de Piche ( $EvP$ ), 0,42 e 0,0245, respectivamente.

Para o cálculo do Balanço Hídrico diário (BH) foi utilizada a metodologia proposta por Thornthwaite & Mather (1955), descrita por Pereira et al. (1997). A metodologia empregada e o roteiro de cálculo foram similares aos utilizados por Silva (2008), Trentin (2009) e Silva et al. (2011). Nesta, o cálculo é realizado iterativamente para obtenção da lâmina de irrigação necessária no dia “n”, baseado no conteúdo de água armazenado no solo no dia “n-1”. A lâmina de irrigação, quando existente, foi adicionada à precipitação pluviométrica sendo ambas consideradas entradas de água no cálculo do BH.

Como somente o volume de água que infiltra contribui para o armazenamento de água no solo em um evento de precipitação pluvial, o cálculo do BH foi utilizado o valor da precipitação pluvial efetiva, sendo este valor obtido por meio da metodologia do U.S. Soil Conservation Service, descrita por Frizzone et al. (2005). Nesta metodologia, a precipitação é dividida em perdas por escoamento superficial e em perdas iniciais, que ocorrem devido à interceptação e enchimento das rugosidades superficiais do solo (Frizzone et al., 2005).

Os valores de CAD inicial (CADi) e CAD final (CADx) foram calculados para os diferentes grupos de solos de várias unidades de mapeamento, utilizando-se os valores de Capacidade de campo (CC) e Ponto de Murcha Permanente (PMP) descritos para os diferentes horizontes e solos com base nas informações encontradas em Brasil (1973), Peraza (2003), Cardoso (2005) e Streck et al. (2008a). A CADi foi determinada para a profundidade de 0,15 m, enquanto que a CADx foi determinada até a profundidade de 0,40 m (Fietz & Urchei, 2002). A partir do cálculo das CAD(s), os solos da região foram agrupados em classes, conforme o valor da CADi e CADx (Tabela 2).

A necessidade de irrigação foi determinada pelo quociente entre o conteúdo atual de água no solo e a CAD. Estes foram determinados para o dia n, sendo a irrigação realizada no próximo dia (dia n+1), se necessária. Foram adotados quatro manejos de irrigação, nestes a irrigação realizada de forma teórica sempre que o conteúdo relativo de água no solo foi igual ou inferior aos limites estabelecidos: 0,5; 0,6; 0,7 e 0,8  $\text{mm mm}^{-1}$ , os quais correspondem a retirada de água disponível armazenada no solo de no máximo 50%, 40%, 30% e 20% da CAD, respectivamente.

**Tabela 2.** Capacidade de armazenamento de água disponível no solo mínima (CADi) e máxima (CADx), curva número (CN) da precipitação efetiva, unidades de mapeamento (Brasil, 1973) e classificação dos solos (Streck et al., 2008a) da área de abrangência da estação meteorológica principal de Santa Maria, RS, utilizados no estudo simulado dos parâmetros de irrigação para os anos agrícolas de 1968 a 2012.

| Grupo    | CADi (mm) | CADx (mm) | CN* | Unidades de Mapeamento | Classificação dos solos                       |
|----------|-----------|-----------|-----|------------------------|---|
| Chaci    | 15        | 45        | 91  | Charrua                | Neossolo Litólico Eutrófico típico            |
|          | 15        | 45        | 91  | Ciríaco                | Chernossolo Argilúvico Férrico típico         |
|          | 15        | 45        | 91  | Guassupi               | Neossolo Litólico Distró-úmbrico fragmentário |
|          | 15        | 45        | 91  | Júlio de Castilhos     | Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico úmbrico  |
| Savencal | 15        | 50        | 72  | Alto das Canas         | Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico úmbrico |
|          | 15        | 60        | 72  | São Pedro              | Argissolo Vermelho Distrófico arênico         |
|          | 15        | 60        | 72  | Venda Grande           | Chernossolo Argilúvico Órtico saprolítico     |
|          | 15        | 60        | 72  | Cerrito                | Latossolo Vermelho Distrófico típico          |
| Cambaí   | 15        | 80        | 91  | Cambaí                 | Luvissolo Crômico Pálico saprolítico          |
| Oagabri  | 22        | 80        | 91  | Oásis                  | Argissolo Bruno Acinzentado Alumínico típico  |
|          | 22        | 80        | 91  | São Gabriel            | Planossolo Háptico Eutrófico típico           |
| Smva     | 22        | 85        | 72  | Santa Maria            | Argissolo Amarelo Alítico típico              |
|          | 22        | 85        | 72  | Vacacaí                | Planossolo Háptico Eutrófico arênico          |

\*CN = 72 para os solos com teor de areia maior que 50% e 91 com teor de areia menor que 50%, na camada de 0-40 cm o solo Alto das Canas foi considerado arenoso.

A simulação do desenvolvimento da cultura foi realizada para diferentes datas de semeadura em intervalos de aproximadamente 10 dias. Considerou-se hábito de crescimento determinado e três grupos de maturação (GM) 5.9–6.8 (Ciclo Precoce/semiprecoce), 6.9–7.3 (Ciclo Médio) e 7.4–8.0 (ciclo semitardio/tardio), durante os períodos de semeadura recomendados pelas indicações técnicas (Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul, 2010) (Tabela 3).

Para estimar a data de emergência foi utilizado o cálculo da soma térmica, em graus-dia ( $^{\circ}\text{C d}^{-1}$ ), adotando-se o valor acumulado de 92,5  $^{\circ}\text{C dia}$  a partir temperatura base de 10  $^{\circ}\text{C}$  (Schneider, et al., 1987) e utilizando-se a temperatura média diária ( $T_{ma}$ ), que foi obtida a partir da média aritmética de  $T_{máx}$  e  $T_{mín}$ . A data de ocorrência do estágio V2 foi estimada por meio do modelo Soydev (Setiyono et al., 2007) com coeficientes obtidos por Streck et al. (2009) em Santa Maria, RS. O modelo Soydev utiliza uma função não-linear de resposta à

temperatura para determinar o número de nós da planta de soja, esta simulação iniciou a partir da data de emergência.

**Tabela 3.** Datas de semeadura (DS) utilizadas na simulação do desenvolvimento da cultura da soja, para três grupos de maturação (GM).

| DS     | Grupo de Maturação (GM)                  |                            |   |
|--------|--|----------------------------|---|
|        | GM 5.9 – 6.8 (Ciclo recoce/ Semiprecoce) | GM 6.9 – 7.3 (Ciclo médio) | GM 7.4 – 8.0 (Ciclo Semitardio/ tardio) |
| 01/out | — <sup>I</sup>                           | — <sup>I</sup>             | 1                                       |
| 11/out | — <sup>I</sup>                           | 1                          | 2                                       |
| 21/out | 1  | 2                          | 3                                       |
| 01/nov | 2  | 3                          | 4                                       |
| 11/nov | 3  | 4                          | 5                                       |
| 21/nov | 4  | 5                          | 6                                       |
| 01/dez | 5  | 6                          | 7                                       |
| 11/dez | 6  | 7                          | 8                                       |
| 21/dez | 7  | 8                          | 9                                       |
| 31/dez | — <sup>I</sup>                           | — <sup>I</sup>             | 10                                      |

<sup>I</sup>Datas de semeadura não recomendadas para a região.

A data do início do florescimento (R1) foi simulada com o modelo não linear de resposta do desenvolvimento à temperatura e ao fotoperíodo, proposto por Sinclair et al. (1991), utilizando coeficientes interpolados de acordo com o grupo de maturação. Este modelo iniciou a partir da data de emergência e terminou quando a taxa de desenvolvimento (SD) atingiu o valor 1,0, que corresponde a data de ocorrência do estágio R1.

A data de ocorrência do estágio R5 (início do enchimento de grão) foi simulada pelo modelo de Sinclair et al. (2007), por meio de uma regressão linear baseada no fotoperíodo e coeficientes variáveis conforme o grupo de maturação, iniciando na data de ocorrência de R1 e finalizou quando o somatório da taxa diária de desenvolvimento acumulou o valor de 1,0, que equivale a data de ocorrência do estágio R5. A data do estágio R7 (início da maturação) foi simulada a partir da data de ocorrência do estágio R5 por meio do cálculo da soma térmica ( $ST_{R5-R7}$ ) de maneira similar à simulação da data de emergência adotando a temperatura base de 10 °C e soma térmica acumulada de 554 °C dia conforme Martorano et al. (2012).

Com as datas de início do florescimento (R1) e início de enchimento de grão (R5) já estimadas, a data da maturação fisiológica (R8), foi simulada pelo modelo proposto por Sinclair (1986). Esta simulação foi feita sem restrição hídrica, eliminando-se a função de

resposta ao déficit hídrico do algoritmo. Além dos coeficientes apresentados no trabalho de Sinclair (1986) foram utilizados os valores de plastocrono da soja, publicados por Streck et al. (2008b).

As simulações do desenvolvimento da cultura foram utilizadas para o cálculo da variação do Kc e da CAD, considerando o aprofundamento radicular. Foram utilizados Kc publicados na literatura por Berlato et al. (1986), sendo estes considerados constantes durante os subperíodos S-V2 e R1-R5 (Tabela 4). No subperíodo V2-R1 foi utilizada uma equação que considerou a variação da taxa de desenvolvimento (SD) e no subperíodo R5-R7 uma equação que considerou a soma térmica durante o subperíodo R5-R7.

Para o cálculo da CAD<sub>n</sub> desde a emergência, quando se tem a CAD inicial (CAD<sub>i</sub>) até o estágio R1, utilizou-se a curva de crescimento sigmoideal do sistema radicular (Tabela 4), apresentada por Dourado-Neto et al. (1999), em função da taxa de desenvolvimento (SD) anteriormente calculada, esta varia de 0,0 (emergência) até 1,0 (R1).

**Tabela 4.** Coeficientes de cultura utilizados para determinar a evapotranspiração máxima da cultura da soja e variação da CAD conforme o desenvolvimento da cultura da soja.

| Subperíodo* | Coeficiente de cultura (Kc)              | Varição da CAD  |
|-------------|--|---|
| S-V2        | Kc = 0,56                                | CAD <sub>n</sub> = CAD <sub>i</sub>   |
| V2-R1       | Kc = 1,362 · SD + 0,137                  | CAD <sub>n</sub> = CAD <sub>in</sub> + (CAD <sub>f</sub> - CAD <sub>in</sub> ) <sup>2</sup> · [1 - COS(π · SD)] |
| R1-R5       | Kc = 1,5                                 | CAD <sub>n</sub> = CAD <sub>x</sub>   |
| R5-R7       | Kc = 0,694 · ST <sub>R5-R7</sub> - 0,222 | CAD <sub>n</sub> = CAD <sub>x</sub>   |
| R7-R8       | —  | —   |

\*Subperíodos compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8).

Os cálculos foram realizados a partir do desenvolvimento de algoritmos escritos no software Statistical Analysis System (SAS, 2001). As lâminas de irrigação e o número de irrigações foram submetidos à análise de variância, adotando-se o delineamento inteiramente casualizado, considerando-se cada ano do banco de dados como uma repetição e teste de Scott-Knott (Scott & Knott, 1974), em nível de 5% de significância. Para a lâmina de irrigação e o número de irrigações, as fontes de variação foram os tipos de solo, datas de semeadura, níveis de manejo de irrigação e respectivas interações.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da Análise da variância para as variáveis lâmina e número de irrigações constataram-se diferenças significativas entre: solos, manejos de irrigação, datas de semeadura e interação entre solos e manejos de irrigação.

A lâmina de irrigação variou entre os grupos de solos para os três grupos de maturação da soja estudados (Tabela 5). Não houve diferença significativa para os valores de lâmina de irrigação entre os grupos de solos Cambaí, Oagabri e Smva, variando de 168,8 até 181,0 mm de lâmina de irrigação totalizadas no ciclo, dependendo do grupo de maturação. Por outro lado, os outros dois grupos de solos se diferenciaram entre si e apresentaram valores maiores de necessidade irrigação durante o ciclo de desenvolvimento da soja, variando de 198,7 até 209,3 mm para o grupo Chaci seguido do grupo Savencal variando de 188,1 até 198,0 mm.

Com relação ao número médio de irrigações (Tabela 5), pode-se observar nos três grupos de maturação que o número foi maior para o grupo de solos Chaci, seguido em ordem decrescente pelos grupos: Savencal, Cambaí, Oagabri e Smva. Sendo que este último apresenta somente pouco mais da metade do número de irrigações do grupo Chaci. De modo geral, para os três grupos de maturação, foi observada a tendência que para solos com maior CAD, o número de irrigações durante o ciclo de cultivo foi menor, pois a água disponível às plantas nesses solos é maior. Por outro lado, para a variável lâmina de irrigação a tendência foi diferente da observada para a variável número de irrigações. Em solos com menor CAD a irrigação é mais frequente, contudo o volume de água necessário para reposição da CAD é menor. Nos solos com maior CAD a irrigação é menos frequente, porém a quantidade de água requerida para completar a CAD é maior. Assim, embora o número de irrigações seja diferente, a lâmina de irrigação foi semelhante nestes grupos de solos.

**Tabela 5.** Valores médios de lâmina de irrigação (mm) e de número de irrigações, considerando-se todos os manejos de irrigação totalizados em cada período do cultivo, comparados entre grupos de solos analisados na simulação do ciclo da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, durante o período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.

| Grupo de solo        | GM 5.9 – 6.8             | GM 6.9 – 7.3 | GM 7.4 – 8.0 |
|----------------------|--------------------------|--------------|--------------|
|                      | Lâmina de irrigação (mm) |              |              |
| Cambaí               | 174,3 c*                 | 183,5 c      | 177,5 c      |
| Chaci                | 198,7 a                  | 209,3 a      | 203,2 a      |
| Oagabri              | 171,7 c                  | 181,0 c      | 175,2 c      |
| Savencal             | 188,1 b                  | 198,0 b      | 192,3 b      |
| Smva                 | 168,8 c                  | 178,0 c      | 172,4 c      |
| Número de irrigações |                          |              |              |
| Cambaí               | 9,6 c                    | 10,1 c       | 10,0 c       |
| Chaci                | 15,5 a                   | 16,3 a       | 16,1 a       |
| Oagabri              | 8,5 d                    | 8,9 d        | 8,8 d        |
| Savencal             | 12,3 b                   | 12,9 b       | 12,8 b       |
| Smva                 | 8,0 d                    | 8,4 d        | 8,4 d        |

\* Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade. (Cambaí = Cambaí; Chaci = Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos; Oagabri = Oásis e São Gabriel; Savencal = São Pedro, Venda Grande, Cerrito e Alto das Canas; Smva = Santa Maria e Vacacaí).

As diferentes datas de semeadura proporcionaram condições meteorológicas distintas para as simulações do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja. Comparando-se os valores de lâmina e número de irrigações entre as DS (Tabela 6), observa-se que o comportamento foi similar para as duas variáveis. A lâmina de irrigação e o número de irrigações foram maiores nas primeiras DS. Esses valores foram reduzindo gradativamente até as últimas datas de semeadura, sendo essa tendência observada nos três grupos de maturação.

A maior necessidade de irrigação nas primeiras DS pode ser explicada em parte pela maior duração do ciclo em comparação às últimas DS, assim, há maior necessidade de suplementação hídrica. Outra explicação é atribuída à coincidência do período de maior exigência de água pela planta, do florescimento e início da formação de legumes (Doorenbos & Kassam, 1979), com o período do ano em que a demanda da atmosfera por vapor é mais elevada nos meses de dezembro e janeiro (Heldwein et al., 2009).

**Tabela 6.** Valores médios de lâmina de irrigação (mm), totalizados em cada período de cultivo para cada manejo de irrigação e solo, estudados na simulação do ciclo da soja para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, durante o período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | Lâmina de irrigação (mm) |            |            | Número de irrigações |            |            |
|--------|--------------------------|------------|------------|----------------------|------------|------------|
|        | GM 5.9–6.8               | GM 6.9–7.3 | GM 7.4–8.0 | GM 5.9–6.8           | GM 6.9–7.3 | GM 7.4–8.0 |
| 01/out | —                        | —          | 219,8 a    | —                    | —          | 12,1 a     |
| 11/out | —                        | 228,0 a    | 224,5 a    | —                    | 12,6 a     | 12,6 a     |
| 21/out | 218,4 a*                 | 225,7 a    | 221,8 a    | 12,2 a               | 12,6 a     | 12,6 a     |
| 01/nov | 211,4 b                  | 216,2 b    | 210,3 b    | 12,1 a               | 12,4 a     | 12,5 a     |
| 11/nov | 198,5 c                  | 201,1 c    | 195,5 c    | 11,7 a               | 12,0 a     | 12,1 a     |
| 21/nov | 181,0 d                  | 183,5 d    | 180,1 d    | 10,9 b               | 11,2 b     | 11,4 b     |
| 01/dez | 165,9 e                  | 169,6 e    | 167,0 e    | 10,3 c               | 10,7 c     | 10,9 b     |
| 11/dez | 151,1 f                  | 155,0 f    | 153,3 f    | 9,6 d                | 10,0 d     | 10,1 c     |
| 21/dez | 135,7 g                  | 140,2 g    | 140,7 g    | 8,8 e                | 9,1 e      | 9,3 d      |
| 31/dez | —                        | —          | 126,8 h    | —                    | —          | 8,5 e      |

\*Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Os diferentes manejos de irrigação utilizados no cálculo da lâmina de irrigação resultaram em um total variável de 112,6 a 250,3 mm de irrigação necessária durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja (Tabela 7). A lâmina de irrigação, independentemente do grupo de maturação e solo, foi sempre maior no manejo 0,8, seguida dos manejos 0,7, 0,6 e 0,5. Esta situação é esperada, pois, nos diferentes manejos de irrigação presume-se a aplicação de diferentes lâminas de irrigação. No manejo 0,5 a irrigação é realizada somente quando o conteúdo de água é igual ou inferior a 50% da CAD, no manejo 0,8 a irrigação é realizada quando o conteúdo de água no solo atinge 80% da CAD. Comparando o manejo 0,5 com o manejo 0,8, verifica-se que a lâmina do manejo 0,5 corresponde de 49 a 66% da lâmina de irrigação necessária no manejo 0,8, variando conforme o solo e grupo de maturação.

A lâmina média de irrigação acumulada durante todo o ciclo sempre foi maior nos solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos, não diferindo estatisticamente dos solos São Pedro, Alto das Canas, Venda Grande e Cerrito quando considerado o manejo 0,7. Observa-se também que não houve diferenças significativas entre os solos quando avaliado o manejo 0,8.

**Tabela 7.** Comparações de valores médios de lâmina de irrigação (mm), totalizados em cada período de cultivo para cada manejo de irrigação e solo, estudados na simulação do ciclo da soja para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, durante o período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.

| Grupo de solo                | Manejo de irrigação <sup>1</sup> |         |         |                     |
|------------------------------|----------------------------------|---------|---------|---------------------|
|                              | 0,5                              | 0,6     | 0,7     | 0,8                 |
| Grupo de Maturação 5.9 – 6.8 |                                  |         |         |                     |
| Cambaí                       | 117,5 c*                         | 153,2 c | 194,3 b | 231,8 <sup>ns</sup> |
| Chaci                        | 156,9 a                          | 188,4 a | 210,1 a | 239,5               |
| Oagabri                      | 115,4 c                          | 151,2 c | 192,6 b | 226,9               |
| Savencal                     | 138,9 b                          | 175,2 b | 205,0 a | 233,2               |
| Smva                         | 112,6 c                          | 147,0 c | 189,9 b | 224,3               |
| Grupo de Maturação 6.9 – 7.3 |                                  |         |         |                     |
| Cambaí                       | 124,5 c                          | 160,7 c | 205,3 b | 243,3 <sup>ns</sup> |
| Chaci                        | 166,1 a                          | 199,0 a | 221,9 a | 250,3               |
| Oagabri                      | 122,2 c                          | 158,5 c | 203,5 b | 239,0               |
| Savencal                     | 145,4 b                          | 185,0 b | 216,8 a | 244,8               |
| Smva                         | 118,5 c                          | 154,8 c | 200,4 b | 236,8               |
| Grupo de Maturação 7.4 – 8.0 |                                  |         |         |                     |
| Cambaí                       | 119,3 c                          | 154,5 c | 198,7 b | 236,8 <sup>ns</sup> |
| Chaci                        | 159,8 a                          | 192,5 a | 217,1 a | 243,2               |
| Oagabri                      | 117,8 c                          | 152,9 c | 196,1 b | 232,4               |
| Savencal                     | 140,0 b                          | 178,5 b | 211,2 a | 239,2               |
| Smva                         | 114,3 c                          | 149,3 c | 193,3 b | 231,1               |

<sup>1</sup>Fração da CAD que foi mantida no solo, com a simulação da irrigação \* Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de Probabilidade. (Cambaí = Cambaí; Chaci = Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos; Oagabri = Oásis e São Gabriel; Savencal = São Pedro, Venda Grande, Cerrito e Alto das Canas; Smva = Santa Maria e Vacacaí).

Houve efeito da interação entre solos e o manejo da irrigação. Deste modo, realizou-se a comparação de médias para o número de irrigações (Tabela 8). Os valores variaram entre 3,2 até 27,3 irrigações, dependendo do grupo de maturação, manejo de irrigação e tipo de solo. Similarmente ao observado nos valores de lâmina de irrigação, o número de irrigações diferiu entre os manejos de irrigação. No manejo 0,8 são necessárias aproximadamente quatro vezes o número de irrigação comparando-se ao número de irrigações do manejo 0,5. À medida que se aumenta o número de irrigação de cultivo, aumentam-se os custos operacionais (Bernardo et al., 2008). Assim, para diminuir custos, em projetos de irrigação, uma alternativa é diminuir o número de irrigações e aumentar a lâmina de cada irrigação, levando-se em consideração a taxa de infiltração da água do solo (Frizzone et al., 2005; Bernardo et al., 2008).

**Tabela 8.** Valores médios de número de irrigações, totalizados em cada período de cultivo para cada manejo de irrigação e solo, estudados na simulação do ciclo da soja para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, durante o período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.

| Grupo de solo                | Manejo de irrigação <sup>1</sup> |        |        |        |
|------------------------------|----------------------------------|--------|--------|--------|
|                              | 0,5                              | 0,6    | 0,7    | 0,8    |
| Grupo de Maturação 5.9 – 6.8 |                                  |        |        |        |
| Cambaí                       | 4,0 c*                           | 6,3 c  | 10,3 c | 17,9 c |
| Chaci                        | 7,9 a                            | 11,5 a | 16,4 a | 26,3 a |
| Oagabri                      | 3,4 c                            | 5,6 c  | 9,3 d  | 15,5 d |
| Savencal                     | 5,7 b                            | 8,8 b  | 13,2 b | 21,7 b |
| Smva                         | 3,2 c                            | 5,3 c  | 8,8 d  | 14,8 d |
| Grupo de Maturação 6.9 – 7.3 |                                  |        |        |        |
| Cambaí                       | 4,2 c                            | 6,6 c  | 10,8 c | 18,6 c |
| Chaci                        | 8,3 a                            | 12,2 a | 17,3 a | 27,3 a |
| Oagabri                      | 3,6 c                            | 5,9 d  | 9,8 d  | 16,3 d |
| Savencal                     | 5,9 b                            | 9,2 b  | 13,9 b | 22,6 b |
| Smva                         | 3,4 c                            | 5,5 d  | 9,2 d  | 15,6 d |
| Grupo de Maturação 7.4 – 8.0 |                                  |        |        |        |
| Cambaí                       | 4,1 c                            | 6,5 c  | 10,7 c | 18,5 c |
| Chaci                        | 8,1 a                            | 12,0 a | 17,3 a | 27,0 a |
| Oagabri                      | 3,6 c                            | 5,8 c  | 9,7 d  | 16,2 d |
| Savencal                     | 5,8 b                            | 9,0 b  | 13,8 b | 22,5 b |
| Smva                         | 3,3 c                            | 5,4 c  | 9,1 d  | 15,5 d |

<sup>1</sup> Fração da CAD que foi mantida no solo, com a simulação da irrigação \* Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de Probabilidade. (Cambaí = Cambaí; Chaci = Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos ; Oagabri = Oásis e São Gabriel; Savencal = Alto das Canas, São Pedro, Venda Grande e Cerrito; Smva = Santa Maria e Vacacaí).

Os solos Santa Maria e Vacacaí apresentaram o menor número de irrigações necessárias em todos os manejos (Tabela 8), não diferindo estatisticamente dos solos São Gabriel e Oásis, não diferindo também do solo Cambaí nos manejos 0,5 e 0,6. O número de irrigações foi maior em todos os manejos de irrigação estudados para os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos. Estes são os solos com menor CAD e por isso, há uma necessidade maior de reposição da água evapotranspirada, pois estes solos atingem mais rapidamente o limite mínimo de água disponível a ser mantida pelos manejos de irrigação.

## CONCLUSÕES

Os solos com maior capacidade de armazenamento de água necessitam de menor lâmina de irrigação para suprir as necessidades hídricas da cultura da soja.

Nas primeiras datas de semeadura de outubro há necessidade de maior lâmina de irrigação do que para as datas de semeadura de dezembro.

Considerando-se o grupo de maturação 7.4–8.0 a lâmina de irrigação média acumulada durante todo o ciclo de desenvolvimento variou de 219,8 mm (DS 01/out) até 126,8 mm (DS 31/dez).

O número de irrigações necessárias foi maior nas datas de semeadura de início e meados de outubro e diminui gradativamente até as datas de semeadura do fim de dezembro.

## LITERATURA CITADA

- ALBERTO, C.M. et al. Modelo para estimar o termo aerodinâmico na equação de Penman na ausência de dados de vento. In: JORNADA ACADÊMICA INTEGRADA, 17, Santa Maria, Anais... Santa Maria: UFSM, 2002. 1 CD-ROM.
- ALLEN, R.G. et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 297p. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56.
- BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do tanque “Classe A” e radiação solar. Agronomia Sulriograndense, Porto Alegre, v.22, n.2, p.243-259, 1986.
- BERNARDO, S. et al. Manual de irrigação. 8. ed. Viçosa, UFV, 2008. 625p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul. Recife: DNPEA, 1973. 431 p. (Boletim Técnico, nº 30).
- BURIOL, G.A.; et al. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria – RS. Ciência Rural, Santa Maria, v.42, n.9, p.1563-1567, 2012.
- CARDOSO, C.D.V. Probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica nos solos da região Central do Estado do Rio Grande do Sul. 2005. 162f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: grãos, primeiro levantamento, outubro 2012 / Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab, 2012.
- CUNHA, G.R. et al. Perda de rendimento potencial da soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria. v. 6, n. 1, p. 111-119, 1998.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Yield response to water, FAO irrigation and drainage paper 33, 1979.
- DOURADO NETO, D. et al. Balance hídrico ciclico y secuencial: estimación de almacenamiento de agua en el suelo. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v. 56, n. 3, p. 537-546, 1999.
- FIETZ, C.R.; URCHEI, M.A. Deficiência hídrica da cultura da soja na região de Dourados, MS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.3, p.262-265, 2002.
- FISCHER, G. et al. Thermodynamical and dynamical structures of the global atmosphere. In: HELLWEGE, K. –H., MODELUNG, (Ed.). *Numerical data and functional relationships in Science and Technology / LAMDOLT-BÖRNSTEIN (New Ser.)*, v. 4 . Springer-Verlag, Berlin, 491p., 1987.
- FONTANA, D.C.; ALMEIDA, T. S. Climatologia do número de dias com precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 10, n. 1, p. 135-145, 2002.
- FRIZZONE, J.A. et al. Planejamento de irrigação: Análise de decisão de investimentos. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 626 p.
- HELDWEIN, A.B.; BURIOL, G.A.; STRECK, N.A. O Clima de Santa Maria. *Revista Ciência Ambiente*, v.38, p.43-58, 2009.
- KIESLING, T.C. Calculation of the length of the day. *Agronomy Journal*, Madison, v.74, p.758-759, 1982.
- LEIVAS, J.F. et al. Risco de deficiência hídrica decendial na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, n. 2, p.397-407, 2006.
- MARTORANO, L.G. et al. Decision Strategies for Soil Water Estimations in Soybean Crops Subjected to No-Tillage and Conventional Systems, in Brazil. In: Manish Kumar. (Org.). *Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management. Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management*. Rijeka: InTech - Open Access Publisher, 2012, p. 439-453.

- MATZENAUER, R. et al. Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul. Porto Alegre: FEPAGRO, 2002. 105p. (Boletim FEPAGRO,10).
- MURRAY, F.W. On the computation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology*, Amsterdam, v. 6, n. 1, p. 203-204, 1967.
- NIED, A.H. et al. Épocas de semeadura do milho com menor risco de ocorrência de deficiência hídrica no município de Santa Maria, RS, Brasil. *Ciência Rural*, v. 35, n. 5, p. 995-1002, 2005.
- PERAZA, J.E.S. Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul. 2003. 117f. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- REUNIÃO DE PESQUISA DA SOJA DA REGIÃO SUL, 38., 2010, Cruz Alta. Indicações Técnicas para a Cultura da Soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2010/2011 e 2011/2012. Cruz Alta: FUNDACEP FECOTRIGO, 2010. 168p.
- SAS INSTITUTE. SAS-STAT: user's guide. 8th ed. Cary: SAS Institute, 2001.
- SCHNEIDER, F.M.; BURIOL, G.A.; HELDWEIN, A.B.; MANFRON, P.A.; SACCOL, A.V.; ESTEFANEL, V. Temperatura base e soma térmica do subperíodo semeadura emergência para algumas cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). *Revista do Centro de Ciências Rurais*, Santa Maria, v. 17, n.4, p. 299-308, 1987.
- SCOTT, A.J.; KNOTT, M.A. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, Raleigh, v.30, n.3, p.507-512. 1974.
- SETIYONO, T.D. et al. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.100, p.257-271, 2007.
- SILVA, J.C. Épocas de menor risco de estresse hídrico e térmico para o feijoeiro na região central do Rio Grande do Sul. 2005. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria.
- SILVA, J.C. et al. Necessidade de irrigação para o feijoeiro na região central do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 10, p. 1030-1036, 2011.
- SILVA, J.C. Parâmetros de irrigação para o feijoeiro em diferentes solos e épocas de semeadura na região central do Rio Grande do Sul. 2008. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

- SINCLAIR, T.R. Water and nitrogen limitations in soybean grain productivity. I. Model development. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.15, p.125-141, 1986.
- SINCLAIR, T.R. et al. Soybean flowering date: linear and logistic models based on temperature and photoperiod. *Crop Science*, Madison, v. 31, p. 786–790, 1991.
- SINCLAIR, T.R. et al. Soybean yields and soil water status in Argentina: Simulation analysis. *Agricultural Systems*, v. 94, p. 471-477, 2007.
- STRECK, E.V. et al. Solos do Rio Grande do Sul. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008a. 222 p.
- STRECK, N.A. et al. Estimativa do plastocrono em cultivares de soja. *Bragantia*, Campinas, v. 67, n. 1, p. 67-73, 2008b.
- STRECK, N.A. et al. Improving node number simulation in soybean. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 44, n. 7, p. 661-668, 2009.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. *Publications in Climatology*, [S.L.], v. 3, n. 10, 1955. 104 p.
- TRENTIN, G. Parâmetros de irrigação por análise numérica para a cultura do milho na Região Central do Rio Grande do Sul. 2009. 192 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2009.
- VAREJÃO SILVA, M.A. Meteorologia e Climatologia. Brasília: INMET, Stilo, 2000. 532 p.

## **CAPÍTULO III – Análise de distribuição da lâmina de irrigação para a cultura da soja na região Central do Rio Grande do Sul**

**Resumo:** A falta de conhecimento da probabilidade de necessidade de irrigação representa um problema para o planejamento do cultivo da soja. O objetivo deste trabalho foi determinar as funções de distribuição de probabilidades (Fdp) que melhor caracterizam a distribuição dos valores de lâminas de irrigação no cultivo da soja considerando-se a capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) dos principais solos da região central do RS. O ciclo foi simulado por meio de modelos matemáticos de desenvolvimento da cultura da soja publicados na literatura, considerando-se três grupos de maturação da cultura da soja, em diferentes datas de semeadura em cada ano da série histórica de 44 anos de dados meteorológicos, desde 1968 até 2012. A irrigação foi simulada para os principais solos da região de abrangência da estação meteorológica de Santa Maria, RS. Foram adotados quatro manejos de irrigação: 0,5; 0,6; 0,7 e 0,8 os quais corresponderam a diminuição de 50, 40, 30 e 20% da CAD, respectivamente. Os melhores ajustes para a lâmina de irrigação foram obtidos com as funções de distribuição de probabilidade lognormal, gama, Weibull e normal. A lâmina de irrigação máxima durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja, para a probabilidade de 90% de ocorrência, varia entre 114,5 e 350,4 mm, dependendo da data de semeadura, solo, manejo de irrigação e grupo de maturação.

**Palavras-chave:** *Glycine max* (L.) Merrill, irrigação, função densidade de probabilidade, datas de semeadura.

### **Distribution analysis of irrigation for the soybean crop in the central region of Rio Grande do Sul, Brazil**

**Abstract:** The lack of knowledge of the probability of the irrigation needs is a problem for soybean cultivation planning. The objective of this study was to determine the probability distribution functions (Fdp) that best characterize the distribution of values of irrigation in soybean cultivation considering the storage capacity of available water (CAD) of the main soils of central region of Rio Grande do Sul, Brazil. The soybean development cycle simulation was performed by mathematical models published in the literature, considering three maturity groups at different sowing dates in each year of the time series of 44 years of meteorological data, from 1968 until 2012. Irrigation was simulated for the main soils of the

region covered by the meteorological station of Santa Maria, RS, Brazil. It were used four irrigation management: 0.5, 0.6, 0.7 and 0.8 which represented the decrease of 50, 40, 30 and 20% of CAD, respectively. The best fitting for the irrigation were obtained with probability distribution functions lognormal, gamma, Weibull and normal. The maximum water depth throughout the soybean development cycle, for 90% probability of occurrence, varies between 114.5 and 350.4 mm, depending on sowing date, soil, irrigation management and maturity group.

**Key words:** *Glycine max* (L.) Merrill, irrigation, probability density function, sowing dates.

## INTRODUÇÃO

A cultura da soja no Rio Grande do Sul tem o seu crescimento e desenvolvimento nos meses de outubro a maio. Neste período os danos causados pela deficiência hídrica são frequentes. As perdas do potencial de rendimento relativo da cultura chegaram até 55% em 80% dos anos no sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul (Cunha et al., 1998).

Para o entendimento do déficit hídrico no solo e auxílio na tomada de decisão na agricultura, mais importante que o conhecimento dos valores normais dos elementos meteorológicos é o conhecimento das probabilidades, o que permite estabelecer os riscos e a provável redução do rendimento para cada adversidade. O estudo probabilístico fornece informações úteis sobre a chance de ocorrência de um determinado valor de interesse para o período estudado (Matzenauer et al., 2002). Dessa maneira, o conhecimento das probabilidades de ocorrência da lâmina e número de irrigações é importante para manejo das culturas e planejamento da irrigação (ALFONSI et al., 1997), sendo a contabilização dos fluxos de entrada e saída de água através do balanço hídrico sequencial diário a metodologia mais adequada.

Muitas são as distribuições de probabilidades conhecidas: Bernoulli, Binomial, normal, Log-normal, gama, Weibull, exponencial, beta, dentre outras. A utilização das funções de densidade de probabilidade está diretamente ligada à natureza dos dados a que se relacionam. A utilização de determinada distribuição de probabilidade deve respeitar a representatividade dos dados e as estimativas dos seus parâmetros para uma determinada região, sem prejuízo na estimação da probabilidade (Catalunha et al., 2002).

As Funções de Distribuição de Probabilidades (Fdp) foram usadas para estudar a distribuição de dados envolvendo elementos meteorológicos, como a precipitação pluvial

(Catalunha et al., 2002; Silva et al., 2007), a temperatura do ar (Hoffmann et al., 1994; Assis et al., 2004), a radiação solar (Assis et al., 2004; Buriol et al., 2001) e o granizo (Berlato et al., 2000). Recentemente foram realizados vários trabalhos utilizando as distribuições de probabilidade, para analisar a distribuição de disponibilidade hídrica para as diferentes capacidades de armazenamento de água (CAD) nos diferentes tipos de solos da região central do Rio Grande do Sul, envolvendo condições de superfície de referência (Cardoso, 2005), das culturas do milho (Nied et al., 2005), do feijão (Silva, 2005) e do girassol (Maldaner, 2012). Além desses trabalhos, Silva (2008) e Trentin (2009) avaliaram parâmetros de irrigação e suas probabilidades para culturas do feijão e do milho, respectivamente, para os diferentes tipos de solo na região central do Rio Grande do Sul.

Para a escolher e para comparar as Fdp, são utilizados testes de aderência (Silva, 2005; Trentin, 2009). Os testes de aderência não paramétricos mais utilizados para comparar as probabilidades empíricas de uma variável com as probabilidades teóricas estimadas pela Fdp são os testes Qui-quadrado, Kolmogorov-Smirnov e Lilliefors (Campos, 1983). Catalunha et al. (2002) verificaram que o teste Qui-quadrado é mais eficaz que o Kolmogorov-Smirnov, e esse é melhor que o Lilliefors, que apresenta limitação para verificar a aderência dos dados da distribuição normal.

Simulando-se o desenvolvimento das culturas em determinadas condições é possível antever a necessidade hídrica das mesmas àquelas condições e, com isso, determinar a necessidade de irrigação, bem como de outros parâmetros necessários para a elaboração de projetos de irrigação. A utilização de modelos computacionais que integram a simulação do crescimento e da produtividade da cultura com aspectos econômicos constitui-se uma poderosa ferramenta de auxílio à tomada de decisão de irrigar ou não (Frizzone et al., 2005).

O objetivo deste trabalho foi determinar as Fdp que melhor caracterizam a distribuição dos valores de lâminas de irrigação no cultivo da soja considerando-se a capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) dos principais solos da região central do RS.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

A região de estudo é área de abrangência da Estação Climatológica Principal de Santa Maria (ECPSM), definida por Cardoso (2005), entre as coordenadas 29°23'15"S e 30°22'17"S, 54°32'07" e 53°05'20", correspondendo a aproximadamente 8000 km<sup>2</sup>. Os municípios que compõem a área de abrangência do estudo são: Dilermando de Aguiar,

Formigueiro, Itaara, Santa Maria, São João do Polêsine, São Martinho da Serra, São Pedro do Sul, Restinga Seca, Silveira Martins, e parte dos municípios de Cacequi, Faxinal do Soturno, Ivorá, Júlio de Castilhos, Santa Margarida do Sul, São Gabriel, São Sepé e Vila Nova do Sul.

A região é delimitada pelo Planalto Arenito-basáltico, pela Campanha, pela Serra do Sudeste e Planície Litorânea, que apresentam diferentes características quanto ao relevo e altitude. Nessa região há vários tipos de solos, em virtude da diversidade de materiais de origem e do relevo. Os três tipos de solos que predominam na região são os Argissolos das unidades de mapeamento Alto das Canas, Júlio de Castilhos, Oásis, São Pedro e Santa Maria (Brasil, 1973; Streck et al., 2008a), seguido dos Planossolos (Vacacaí e São Gabriel), e demais solos (Neosolo, Chernossolo, Luvisso e Latossolo), ocupando aproximadamente 51%, 34%, e 15% da área, respectivamente.

Os cálculos foram realizados de forma seriada utilizando-se dados diários de evapotranspiração, precipitação pluviométrica e a variação na capacidade de armazenamento de água disponível do solo (CAD). Esta varia em função do desenvolvimento das plantas de soja e em função do tipo de solo, sendo simulado para as diferentes datas de semeadura.

A densidade de fluxo da radiação global incidente ( $R_g$ ) foi estimada através da equação de Ångström-Prezcott, utilizando-se coeficientes mensais ajustados para Santa Maria por Buriol et al. (2012). O fotoperíodo diário para Santa Maria, RS, (considerando-se a duração do crepúsculo civil de um ângulo de  $6^\circ$  abaixo do plano do horizonte) foi calculado por meio da metodologia de Kiesling (1982).

Para estimar a evapotranspiração de referência foi utilizado o método de Penman-Monteith, conforme Allen et al. (1998) (Equação 1). Para os poucos períodos com ausência de dados de velocidade do vento foi utilizada a equação de Penman (Varejão Silva, 2000), com um ajuste no termo aerodinâmico, através da evaporação medida no evaporímetro de Piche (EvP,  $\text{mm d}^{-1}$ ) e do déficit de saturação do ar (kPa), conforme Alberto et al. (2002) (Equação 2).

$$ET_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} \frac{Q^*}{L} + \frac{\gamma \cdot 900 \cdot U_2 \cdot d}{(\Delta + \gamma^*)(T_m + 275)} \quad (1)$$

$$ET_o = \frac{(\Delta \cdot \gamma^{-1}) \cdot (Q^* \cdot L^{-1}) + (a + b \text{ EvP}) \cdot d}{(\Delta \cdot \gamma^{-1}) + 1} \quad (2)$$

em que:  $\Delta$  é a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água para a temperatura média diária ( $T_m$ ,  $^\circ\text{C}$ );  $Q^*$  é o Saldo de radiação ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $\gamma$  a constante psicrométrica ( $0,0662 \text{ kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$\gamma^*$  a constante psicrométrica corrigida,  $U_2$  a velocidade média diária do vento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $d$  o déficit de saturação do ar (kPa) e  $L$  o calor latente de evaporação ( $2,46 \text{ MJ kg}^{-1}$ );  $a$  e  $b$  são coeficientes ajustados por Alberto et al. (2002) para estimativa do fator aerodinâmico ( $E_a$ ) a partir da evaporação do evaporímetro de Piche (EvP), 0,42 e 0,0245, respectivamente.

Para o cálculo do Balanço Hídrico diário (BH) foi utilizada a metodologia proposta por Thornthwaite & Mather (1955), descrita por Pereira et al. (1997). A metodologia empregada e o roteiro de cálculo foram similares aos utilizados por Silva (2011) e Trentin (2009). Nesta, o cálculo foi realizado iterativamente para obtenção da lâmina de irrigação necessária no dia “n”, embasado no conteúdo de água armazenado no solo no dia “n-1”. A lâmina de irrigação, quando existente, foi adicionada à precipitação pluviométrica sendo ambas consideradas entradas de água no cálculo do BH.

Depois de uma precipitação, somente o volume de água que infiltra contribui para o armazenamento de água no solo. Para o cálculo do BH foi utilizado o valor da precipitação pluvial efetiva obtido por meio da metodologia do U.S. Soil Conservation Service, descrita por Frizzone et al. (2005). No qual a precipitação é dividida em perdas por escoamento superficial e em perdas iniciais, que ocorrem devido à interceptação e enchimento das rugosidades superficiais do solo (Frizzone et al., 2005).

Este estudo foi realizado para as principais unidades de mapeamento de solo na região de abrangência da ECPSM. Os solos das unidades de mapeamento São Pedro, Venda Grande, Cerrito, Alto das Canas, Santa Maria e Vacacaí foram selecionados, pois estes representam a maior área de solos da região. Também foram avaliadas as unidades de mapeamento Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos por representarem o grupo de solos com menor profundidade explorável pelas raízes das plantas e, portanto, menor CAD.

Os valores de CAD inicial (CADi) e CAD final (CADx) foram calculados para os diferentes grupos de solos de várias unidades de mapeamento, utilizando-se os valores de CC e PMP descritos para os diferentes horizontes e solos com base nas informações encontradas em Brasil (1973), Peraza (2003), Cardoso (2005) e Streck et al. (2008a). A CADi foi determinada para a profundidade de 0,15 m, enquanto que a CADx foi determinada até a profundidade de 0,40 m (Fietz & Urchei, 2002). A partir do cálculo das CAD(s), os solos da região foram agrupados em classes, conforme o valor da CADi e CADx (Tabela 1).

A necessidade de irrigação foi determinada pelo quociente entre o conteúdo atual de água no solo e a CAD. Estes foram determinados para o dia n, sendo a irrigação realizada no próximo dia (dia n+1), se necessária. O manejo de irrigação foi realizada de forma

teórica sempre que o conteúdo relativo de água no solo foi igual ou inferior aos limites (i) estabelecidos: 0,5; 0,6; 0,7 e 0,8 mm mm<sup>-1</sup>, os quais correspondem à retirada de água disponível armazenada no solo de no máximo 50%, 40%, 30% e 20% da CAD, respectivamente.

A simulação do desenvolvimento da cultura foi realizada para diferentes datas de semeadura em intervalos de aproximadamente 10 dias. Para três grupos de maturação (GM): 5.9–6.8 (Ciclo precoce/semiprecoce), 6.9–7.3 (Ciclo médio) e 7.8–8.0 (Ciclo semitardio/tardio) durante os períodos de semeadura recomendados pelas recomendações técnicas (Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul, 2010) (Tabela 2).

**Tabela 1.** Capacidade de armazenamento de água disponível no solo inicial (CADi) e final (CADx), curva número (CN) da precipitação efetiva, unidades de mapeamento (Brasil, 1973) e classificação dos solos (Streck et al., 2008a) da área de abrangência da estação meteorológica principal de Santa Maria, RS, utilizados no estudo simulado dos parâmetros de irrigação para os anos agrícolas de 1968 a 2012.

| Grupo    | CADi (mm) | CADx (mm) | CN* | Unidades de Mapeamento | Classificação dos solos                       |
|----------|-----------|-----------|-----|------------------------|---|
| Chaci    | 15        | 45        | 91  | Charrua                | Neossolo Litólico Eutrófico típico            |
|          | 15        | 45        | 91  | Ciríaco                | Chernossolo Argilúvico Férrico típico         |
|          | 15        | 45        | 91  | Guassupi               | Neossolo Litólico Distró-úmbrico fragmentário |
|          | 15        | 45        | 91  | Júlio de Castilhos     | Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico úmbrico  |
| Savencal | 15        | 60        | 72  | Alto das Canas         | Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico úmbrico |
|          | 15        | 60        | 72  | São Pedro              | Argissolo Vermelho Distrófico arênico         |
|          | 15        | 60        | 72  | Venda Grande           | Chernossolo Argilúvico Órtico saprolítico     |
|          | 15        | 60        | 72  | Cerrito                | Latossolo Vermelho Distrófico típico          |
| Smva     | 22        | 85        | 72  | Santa Maria            | Argissolo Amarelo Alítico típico              |
|          | 22        | 85        | 72  | Vacacaí                | Planossolo Háptico Eutrófico arênico          |

\*CN = 72 para os solos com teor de areia maior que 50% e 91 com teor de areia menor que 50%.

**Tabela 2.** Datas de semeadura (DS) utilizadas na simulação do desenvolvimento da cultura da soja, para três grupos de maturação (GM).

| DS     | Grupo de Maturação (GM)                   |                            |   |
|--------|---|----------------------------|---|
|        | GM 5.9 – 6.8 (Ciclo precoce/ Semiprecoce) | GM 6.9 – 7.3 (Ciclo médio) | GM 7.4 – 8.0 (Ciclo Semitardio/ tardio) |
| 01/out | — <sup>1</sup>                            | — <sup>1</sup>             | 1                                       |
| 11/out | — <sup>1</sup>                            | 1                          | 2                                       |
| 21/out | 1   | 2                          | 3                                       |
| 01/nov | 2   | 3                          | 4                                       |
| 11/nov | 3   | 4                          | 5                                       |
| 21/nov | 4   | 5                          | 6                                       |
| 01/dez | 5   | 6                          | 7                                       |
| 11/dez | 6   | 7                          | 8                                       |
| 21/dez | 7   | 8                          | 9                                       |
| 31/dez | — <sup>1</sup>                            | — <sup>1</sup>             | 10                                      |

<sup>1</sup> Datas de semeadura não recomendadas para a região.

Para estimar a data de emergência foi utilizado o cálculo da soma térmica, em graus-dia (°C dia), adotando-se a temperatura base de 10 °C (Schneider, et al., 1987), utilizando-se a temperatura média diária ( $T_{ma}$ ), que foi obtida a partir da média aritmética de  $T_{máx}$  e  $T_{min}$ . A data de ocorrência do estágio V2 foi estimada por meio do modelo Soydev (Setiyono et al., 2007) com coeficientes obtidos por Streck et al. (2009) em Santa Maria, RS. O modelo Soydev utiliza uma função não-linear de resposta à temperatura para determinar o número de nós da planta de soja, esta simulação inicia na data de emergência.

A data do início do florescimento (R1) foi simulada com o modelo não-linear de resposta do desenvolvimento à temperatura e ao fotoperíodo, proposto por Sinclair et al. (1991), utilizando coeficientes interpolados de acordo com o grupo de maturação. Este modelo inicia a partir da data de emergência e termina quando a taxa de desenvolvimento (SD) atinge 1,0, correspondente a data do estágio R1.

A data de ocorrência do estágio R5 (início do enchimento de grão) foi simulada pelo modelo de Sinclair et al. (2007), por meio de uma regressão linear baseada no fotoperíodo e coeficientes variáveis conforme o grupo de maturação, iniciando na data de ocorrência de R1 e finalizou quando a taxa de desenvolvimento atingiu 1,0, equivalente a data do estágio R5. A data do estágio R7 (início da maturação) foi simulada a partir da data de ocorrência do estágio R5 por meio do cálculo da soma térmica ( $ST_{R5-R7}$ ) de maneira similar à simulação da data de

emergência adotando a temperatura base de 10 °C e soma térmica acumulada de 554 °C dia conforme Martorano, et al. (2012).

Com as datas de início do florescimento (R1) e início de enchimento de grão (R5) já estimadas, a data da maturação fisiológica (R8), foi simulada pelo modelo proposto por Sinclair (1986). Esta simulação foi feita sem restrição hídrica, eliminando-se a função de resposta ao déficit hídrico no algoritmo. Além dos coeficientes apresentados no trabalho de Sinclair (1986) foram utilizados os valores de plastocrono da soja, publicados por Streck et al. (2008b).

As simulações do desenvolvimento da cultura foram utilizadas para o cálculo da variação do Kc e da CAD, considerando o aprofundamento radicular. Foram utilizados Kc publicados na literatura por Berlato et al. (1986), sendo estes considerados constantes durante os subperíodos S-E e R1-R5 (Tabela 4). Nos subperíodos E-V2 e V2-R1 foi utilizada uma equação que considerou a variação da taxa de desenvolvimento (SD) e no subperíodo R5-R7 uma equação que considerou a soma térmica durante o subperíodo R5-R7.

Para o cálculo da CAD<sub>n</sub> desde a emergência, quando se tem a CAD inicial (CAD<sub>i</sub>) até o estágio R1, utilizou-se a curva de crescimento sigmoideal do sistema radicular (Tabela 3), apresentada por Dourado-Neto et al. (1999), em função da taxa de desenvolvimento (SD) anteriormente calculada, esta varia de 0,0 (emergência) até 1,0 (R1).

**Tabela 3.** Coeficientes de cultura utilizados para determinar a evapotranspiração máxima da cultura da soja e variação da CAD conforme o desenvolvimento da cultura da soja.

| Subperíodo* | Coeficiente de cultura (Kc)              | Variação da CAD   |
|-------------|--|---|
| S-E         | Kc = 0,56                                | CAD <sub>n</sub> = CAD <sub>i</sub>   |
| E-R1        | Kc = 1,362 · SD + 0,137                  | CAD <sub>n</sub> = CAD <sub>m</sub> + (CAD <sub>f</sub> - CAD <sub>m</sub> ) <sup>2</sup> · [1 - COS(π · SD)] |
| R1-R5       | Kc = 1,5                                 | CAD <sub>n</sub> = CAD <sub>x</sub>   |
| R5-R7       | Kc = 0,694 · ST <sub>R5-R7</sub> - 0,222 | CAD <sub>n</sub> = CAD <sub>x</sub>   |
| R7-R8       | —  | —   |

\*Subperíodos compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8).

Os cálculos foram realizados a partir do desenvolvimento de algoritmos escritos no software Statistical Analysis System (SAS, 2001). Os valores de lâmina de irrigação foram submetidos à análise de distribuição de probabilidade e aos testes para qualidade de ajuste das funções, para verificar qual Fdp melhor representou a distribuição destes dados. O critério

para a escolha das melhores funções para cada situação foi o nível de significância de 10% para pelo menos um dos testes de aderência, Qui-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov, conforme Silva (2008) e Trentin (2009). Quando houve mais de uma função de distribuição ajustada, para cada caso, foi escolhida a Fdp que apresentou o maior nível de significância indicado pelo teste Qui-Quadrado.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

As funções de distribuição de probabilidades (Fdp) analisadas para a variável lâmina de irrigação foram as Fdp normal, exponencial, gama, lognormal e Weibull. Combinando o número de grupos de maturação (3), datas de semeadura (10, 8 e 7, respectivamente, para os três grupos de maturação (GM): 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.8–8.0), grupos de solos (3), manejos de irrigação (4) com as Fdp (5) foram testadas 1500 Fdps. Destas 975 apresentaram ajuste significativo para a lâmina de irrigação.

As distribuições que apresentaram as melhores aderências para a lâmina de irrigação foram a distribuição lognormal (36%), gama (26%), Weibull (21%) e normal (17%). A distribuição exponencial não se ajustou a nenhuma das situações avaliadas.

Na Tabela 4 são apresentadas as Fdp e seus parâmetros para a lâmina de irrigação para três diferentes grupos de maturação da soja nos solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos. Na Tabela 5 para os solos Alto das Canas, São Pedro, Venda Grande e Cerrito. Na Tabela 6 são apresentadas as Fdps e seus parâmetros para lâmina de irrigação nos solos Santa Maria e Vacacaí.

Foram obtidas as estimativas da lâmina de irrigação necessária para a cultura da soja por meio das Fdp selecionadas (Tabelas 4, 5 e 6), são apresentados os valores obtidos relativos ao nível de probabilidade de 90% (Tabela 7). Quando os dados não aderiam a nenhuma das distribuições, sem ajuste (SA), utilizou-se a distribuição empírica para se obter o valor de lâmina de irrigação.

**Tabela 4.** Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) e seus parâmetros, selecionadas para determinar a lâmina de irrigação, para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, para os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | M   | GM 5.9 – 6.8 |                |                | GM 6.9 – 7.3 |                |                | GM 7.4 – 8.0 |                |                |
|--------|-----|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
|        |     | Fdp          | a <sup>l</sup> | b <sup>l</sup> | Fdp          | a <sup>l</sup> | b <sup>l</sup> | Fdp          | a <sup>l</sup> | b <sup>l</sup> |
| 01/out | 0,5 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | G            | 5,2773         | 0,248          |
|        | 0,6 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 231,772        | 51,218         |
|        | 0,7 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 253,441        | 41,7577        |
|        | 0,8 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | N            | 5,6466         | 0,1596         |
| 11/out | 0,5 | —            | —              | —              | LGN          | 5,296          | 0,2479         | LGN          | 5,2698         | 0,2277         |
|        | 0,6 | —            | —              | —              | LGN          | 5,444          | 0,2209         | N            | 5,4075         | 0,2029         |
|        | 0,7 | —            | —              | —              | N            | 256,5314       | 42,7971        | N            | 253,357        | 39,981         |
|        | 0,8 | —            | —              | —              | LGN          | 5,6615         | 0,1542         | LGN          | 5,6302         | 0,1607         |
| 21/out | 0,5 | LGN          | 5,2533         | 0,2301         | LGN          | 5,2912         | 0,2235         | LGN          | 5,1779         | 0,2576         |
|        | 0,6 | G            | 22,6584        | 9,8622         | G            | 25,534         | 9,0244         | LGN          | 218,485        | 42,6156        |
|        | 0,7 | N            | 246,1825       | 42,4388        | G            | 36,6259        | 6,976          | N            | 36,3468        | 6,6967         |
|        | 0,8 | LGN          | 5,6217         | 0,162          | G            | 40,7157        | 7,1258         | LGN          | 5,5886         | 0,1546         |
| 01/nov | 0,5 | LGN          | 5,1967         | 0,233          | LGN          | 5,2098         | 0,2449         | LGN          | 173,292        | 45,3368        |
|        | 0,6 | G            | 27,8284        | 7,7741         | G            | 26,7708        | 8,4192         | N            | 5,3221         | 0,1863         |
|        | 0,7 | LGN          | 5,4646         | 0,1668         | LGN          | 5,4966         | 0,1649         | G            | 28,6941        | 8,0058         |
|        | 0,8 | G            | 37,8492        | 7,1445         | LGN          | 5,6            | 0,1665         | LGN          | 37,7897        | 6,8341         |
| 11/nov | 0,5 | LGN          | 5,1225         | 0,2434         | G            | 16,495         | 10,6982        | N            | 154,936        | 39,1114        |
|        | 0,6 | LGN          | 5,3089         | 0,2105         | LGN          | 5,332          | 0,1947         | LGN          | 5,2387         | 0,2079         |
|        | 0,7 | LGN          | 5,4119         | 0,1637         | G            | 30,6503        | 7,5453         | G            | 5,3566         | 0,1855         |
|        | 0,8 | LGN          | 5,5402         | 0,1745         | G            | 36,2093        | 7,2945         | G            | 5,474          | 0,1605         |
| 21/nov | 0,5 | G            | 12,9195        | 12,2169        | G            | 13,1099        | 12,2462        | N            | 4,9067         | 0,2661         |
|        | 0,6 | W            | 5,6173         | 206,349        | LGN          | 5,2608         | 0,1908         | LGN          | 5,1523         | 194,999        |
|        | 0,7 | LGN          | 5,3332         | 0,1836         | LGN          | 5,3689         | 0,1867         | LGN          | 6,2684         | 219,166        |
|        | 0,8 | LGN          | 5,4769         | 0,1815         | G            | 36,7088        | 6,7219         | LGN          | 5,4106         | 0,1615         |
| 01/dez | 0,5 | N            | 144,7925       | 36,6097        | W            | 4,4281         | 158,0347       | LGN          | 9,1774         | 14,0369        |
|        | 0,6 | LGN          | 5,1549         | 0,1988         | LGN          | 5,1745         | 0,2255         | W            | 19,9008        | 8,1629         |
|        | 0,7 | LGN          | 5,2563         | 0,2021         | G            | 27,2214        | 7,4379         | W            | 6,3774         | 203,420        |
|        | 0,8 | LGN          | 5,4077         | 0,1616         | LGN          | 5,4134         | 0,1662         | LGN          | 5,3338         | 0,164          |
| 11/dez | 0,5 | W            | 3,9986         | 140,5769       | W            | 5,296          | 0,2479         | G            | 4,7255         | 0,3123         |
|        | 0,6 | W            | 4,664          | 174,7427       | N            | 5,444          | 0,2209         | G            | 143,950        | 36,6478        |
|        | 0,7 | N            | 182,7939       | 36,5724        | W            | 256,5314       | 42,7971        | W            | 6,3273         | 186,182        |
|        | 0,8 | LGN          | 5,3123         | 0,1742         | G            | 5,6615         | 0,1542         | LGN          | 7,5835         | 208,679        |
| 21/dez | 0,5 | G            | 8,4807         | 13,4247        | W            | 5,2912         | 0,2235         | LGN          | 3,5002         | 115,617        |
|        | 0,6 | N            | 144,8907       | 34,8307        | W            | 25,534         | 9,0244         | N            | 4,3789         | 143,951        |
|        | 0,7 | N            | 169,3564       | 34,291         | W            | 36,6259        | 6,976          | W            |                |                |
|        | 0,8 | N            | 192,3643       | 34,5767        | W            | 40,7157        | 7,1258         | W            | 5,1753         | 0,172          |
| 31/dez | 0,5 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 5,2773         | 0,248          |
|        | 0,6 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 231,772        | 51,218         |
|        | 0,7 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | SA           | 253,441        | 41,7577        |
|        | 0,8 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | LGN          | 5,6466         | 0,1596         |

<sup>l</sup>Os parâmetros das Fdp lognormal (LGN), gama (G), Weibull (W) são denominados "escalar" e "de forma", ao invés de média e desvio-padrão, como os parâmetros da função normal (N).

**Tabela 5.** Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) e seus parâmetros, selecionadas para determinar a lâmina de irrigação, para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, para os solos Alto das Canas, São Pedro, Venda Grande e Cerrito, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | M   | GM 5.9 – 6.8 |                |                | GM 6.9 – 7.3 |                |                | GM 7.4 – 8.0 |                |                |
|--------|-----|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
|        |     | Fdp          | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> | Fdp          | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> | Fdp          | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> |
| 01/out | 0,5 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 3,4996         | 187,324        |
|        | 0,6 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | G            | 15,2269        | 14,3172        |
|        | 0,7 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 5,4204         | 272,103        |
|        | 0,8 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | LGN          | 5,6018         | 0,1693         |
| 11/out | 0,5 | —            | —              | —              | N            | 174,1923       | 55,2781        | N            | 172,395        | 55,4941        |
|        | 0,6 | —            | —              | —              | LGN          | 5,396          | 0,2535         | LGN          | 5,3786         | 0,2489         |
|        | 0,7 | —            | —              | —              | G            | 24,1331        | 10,7547        | G            | 23,7592        | 10,7149        |
|        | 0,8 | —            | —              | —              | LGN          | 5,6353         | 0,1452         | LGN          | 5,6301         | 0,1397         |
| 21/out | 0,5 | G            | 7,7054         | 22,3775        | LGN          | 5,1349         | 0,3342         | LGN          | 5,1297         | 0,3112         |
|        | 0,6 | LGN          | 5,3382         | 0,2279         | LGN          | 5,3925         | 0,2087         | LGN          | 5,3798         | 0,2045         |
|        | 0,7 | LGN          | 5,4781         | 0,2003         | LGN          | 5,5084         | 0,1916         | LGN          | 5,4875         | 0,2078         |
|        | 0,8 | LGN          | 5,5907         | 0,1444         | LGN          | 5,6356         | 0,1289         | LGN          | 5,619          | 0,1298         |
| 01/nov | 0,5 | LGN          | 5,0807         | 0,3233         | LGN          | 5,1044         | 0,3018         | LGN          | 5,0644         | 0,3142         |
|        | 0,6 | LGN          | 5,3172         | 0,2133         | SA           |                |                | G            | 18,1522        | 11,3815        |
|        | 0,7 | G            | 22,5453        | 10,4114        | G            | 23,7404        | 10,2352        | G            | 23,2783        | 10,3558        |
|        | 0,8 | G            | 55,2844        | 4,7823         | N            | 270,3616       | 40,7577        | LGN          | 5,5628         | 0,1683         |
| 11/nov | 0,5 | G            | 11,2313        | 14,1348        | LGN          | 5,0114         | 0,3019         | LGN          | 4,9525         | 0,3303         |
|        | 0,6 | LGN          | 5,2412         | 0,2328         | LGN          | 5,2527         | 0,2512         | G            | 16,3848        | 11,5807        |
|        | 0,7 | N            | 223,5752       | 48,1077        | LGN          | 5,4094         | 0,1963         | LGN          | 5,3966         | 0,187          |
|        | 0,8 | N            | 251,8993       | 40,4403        | N            | 256,3455       | 38,7846        | G            | 43,1175        | 5,8248         |
| 21/nov | 0,5 | LGN          | 4,8837         | 0,3597         | LGN          | 4,8837         | 0,3554         | G            | 8,4217         | 15,7852        |
|        | 0,6 | LGN          | 5,1337         | 0,2647         | N            | 177,2186       | 43,5734        | W            | 5,0741         | 188,241        |
|        | 0,7 | LGN          | 5,3137         | 0,1986         | N            | 212,3416       | 40,2823        | N            | 212,111        | 39,1293        |
|        | 0,8 | LGN          | 5,4431         | 0,1741         | N            | 238,3759       | 40,4623        | N            | 237,335        | 36,3714        |
| 01/dez | 0,5 | LGN          | 4,7495         | 0,3745         | G            | 7,4097         | 17,0341        | G            | 6,6357         | 18,4036        |
|        | 0,6 | N            | 161,2514       | 39,3896        | G            | 19,2042        | 8,4127         | LGN          | 5,0552         | 0,2403         |
|        | 0,7 | LGN          | 5,2381         | 0,2063         | N            | 199,2377       | 40,1464        | N            | 196,052        | 38,9946        |
|        | 0,8 | LGN          | 5,3699         | 0,1741         | N            | 225,3055       | 36,2437        | N            | 224,173        | 36,1435        |
| 11/dez | 0,5 | W            | 2,5825         | 124,3734       | G            | 5,9689         | 18,7538        | W            | 3,1013         | 125,459        |
|        | 0,6 | W            | 4,3834         | 159,6193       | G            | 15,72          | 9,3648         | G            | 11,2997        | 12,7595        |
|        | 0,7 | W            | 5,5331         | 190,6561       | W            | 5,6184         | 195,803        | N            | 176,355        | 38,9455        |
|        | 0,8 | W            | 6,7304         | 218,6425       | G            | 39,2844        | 5,3482         | W            | 7,6652         | 224,464        |
| 21/dez | 0,5 | W            | 2,8775         | 110,352        | N            | 102,4002       | 35,9526        | N            | 104,336        | 37,7436        |
|        | 0,6 | G            | 10,4168        | 12,3148        | G            | 9,7527         | 13,5516        | W            | 3,5256         | 146,631        |
|        | 0,7 | N            | 157,4791       | 37,5185        | N            | 160,7966       | 39,7567        | W            | 4,794          | 175,772        |
|        | 0,8 | W            | 6,5235         | 202,1575       | W            | 7,0139         | 205,5141       | N            | 191,852        | 31,819         |
| 31/dez | 0,5 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | N            | 94,0735        | 37,0742        |
|        | 0,6 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 3,5507         | 128,808        |
|        | 0,7 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 4,6996         | 162,823        |
|        | 0,8 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | G            | 37,005         | 4,827          |

<sup>I</sup>Os parâmetros das Fdp lognormal (LGN), gama (G), Weibull (W) são denominados "escalar" e "de forma", ao invés de média e desvio-padrão, como os parâmetros da função normal (N). Sem ajuste (AS).

**Tabela 6.** Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) e seus parâmetros, selecionadas para determinar a lâmina de irrigação, para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, para os solos Santa Maria e Vacacaí, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | M   | GM 5.9 – 6.8 |                |                | GM 6.9 – 7.3 |                |                | GM 7.4 – 8.0 |                |                |
|--------|-----|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
|        |     | Fdp          | a <sup>l</sup> | b <sup>l</sup> | Fdp          | a <sup>l</sup> | b <sup>l</sup> | Fdp          | a <sup>l</sup> | b <sup>l</sup> |
| 01/out | 0,5 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | SA           |                |                |
|        | 0,6 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | N            | 179,8041       | 61,996         |
|        | 0,7 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | G            | 14,9067        | 15,7187        |
|        | 0,8 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 5,934          | 293,7053       |
| 11/out | 0,5 | —            | —              | —              | G            | 5,13           | 29,555         | LGN          | 4,902          | 0,4611         |
|        | 0,6 | —            | —              | —              | G            | 7,9339         | 23,8505        | N            | 187,5911       | 61,6027        |
|        | 0,7 | —            | —              | —              | LGN          | 5,4744         | 0,2527         | N            | 241,1152       | 59,1413        |
|        | 0,8 | —            | —              | —              | W            | 6,1744         | 296,7556       | N            | 275,4886       | 47,8199        |
| 21/out | 0,5 | G            | 5,5771         | 26,4305        | G            | 5,0712         | 29,1708        | W            | 2,6017         | 159,2549       |
|        | 0,6 | G            | 7,2912         | 25,1749        | G            | 7,0894         | 26,6481        | G            | 8,3951         | 22,1372        |
|        | 0,7 | LGN          | 5,4214         | 0,2212         | LGN          | 5,4729         | 0,202          | LGN          | 5,4534         | 0,2064         |
|        | 0,8 | LGN          | 5,5725         | 0,1887         | LGN          | 5,6053         | 0,179          | G            | 29,0277        | 9,3753         |
| 01/nov | 0,5 | G            | 5,7516         | 23,7341        | G            | 5,6933         | 24,4266        | G            | 5,3942         | 25,0503        |
|        | 0,6 | LGN          | 5,1467         | 0,3347         | LGN          | 5,1579         | 0,3337         | G            | 9,2153         | 18,8215        |
|        | 0,7 | LGN          | 5,4005         | 0,2139         | LGN          | 5,4168         | 0,2125         | G            | 20,2137        | 11,1549        |
|        | 0,8 | G            | 28,514         | 9,0073         | G            | 28,1776        | 9,3713         | G            | 27,7679        | 9,2733         |
| 11/nov | 0,5 | N            | 122,9932       | 59,1519        | W            | 2,0589         | 138,403        | W            | 2,0722         | 134,3423       |
|        | 0,6 | LGN          | 5,0319         | 0,3757         | LGN          | 5,0554         | 0,341          | LGN          | 5,0062         | 0,3505         |
|        | 0,7 | LGN          | 5,3262         | 0,2289         | LGN          | 5,3295         | 0,2445         | LGN          | 5,3009         | 0,2441         |
|        | 0,8 | LGN          | 5,4713         | 0,1959         | G            | 24,5547        | 10,1001        | G            | 26,3253        | 9,3099         |
| 21/nov | 0,5 | W            | 2,0249         | 121,7577       | W            | 1,9594         | 121,4214       | W            | 2,1588         | 120,8867       |
|        | 0,6 | LGN          | 4,9149         | 0,3789         | LGN          | 4,9236         | 0,3558         | G            | 7,5158         | 18,9497        |
|        | 0,7 | G            | 14,9057        | 12,7942        | G            | 15,6088        | 12,2755        | LGN          | 5,2113         | 0,2219         |
|        | 0,8 | LGN          | 5,3903         | 0,207          | N            | 231,5407       | 45,395         | W            | 5,7304         | 248,4046       |
| 01/dez | 0,5 | G            | 2,6161         | 38,528         | G            | 3,7051         | 27,3069        | W            | 2,2034         | 109,6416       |
|        | 0,6 | LGN          | 4,7928         | 0,3783         | LGN          | 4,825          | 0,403          | LGN          | 4,8212         | 0,4062         |
|        | 0,7 | W            | 4,4623         | 190,2827       | G            | 19,6954        | 8,8729         | LGN          | 5,1309         | 0,2406         |
|        | 0,8 | W            | 5,5867         | 226,9          | N            | 215,468        | 43,0924        | W            | 5,0178         | 233,108        |
| 11/dez | 0,5 | W            | 2,2069         | 104,5286       | G            | 4,2514         | 21,7665        | W            | 2,1373         | 99,2736        |
|        | 0,6 | LGN          | 4,6791         | 0,4322         | N            | 122,4566       | 47,7528        | W            | 3,1608         | 134,4723       |
|        | 0,7 | LGN          | 5,0171         | 0,2629         | G            | 15,5702        | 10,284         | G            | 12,1107        | 12,9777        |
|        | 0,8 | G            | 21,8331        | 8,8339         | W            | 5,3187         | 215,5385       | N            | 198,0411       | 43,6229        |
| 21/dez | 0,5 | W            | 1,8231         | 87,2586        | N            | 81,1549        | 43,9183        | G            | 3,125          | 25,4068        |
|        | 0,6 | W            | 2,7936         | 120,0899       | N            | 107,1848       | 42,0933        | N            | 108,6934       | 43,926         |
|        | 0,7 | LGN          | 4,8874         | 0,3172         | G            | 10,45          | 13,9013        | G            | 9,5905         | 14,8637        |
|        | 0,8 | W            | 4,9214         | 192,9923       | W            | 4,9312         | 200,6237       | W            | 5,0246         | 197,8866       |
| 31/dez | 0,5 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | N            | 73,4697        | 31,9572        |
|        | 0,6 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 2,6352         | 113,8004       |
|        | 0,7 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 3,5396         | 139,9545       |
|        | 0,8 | —            | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 5,207          | 178,5797       |

<sup>l</sup>Os parâmetros das Fdp lognormal (LGN), gama (G), Weibull (W) são denominados "escalar" e "de forma", ao invés de média e desvio-padrão, como os parâmetros da função normal (N). Sem ajuste (SA).

Na Tabela 7 pode ser observada, nos três grupos de maturação e nos três grupos de solos avaliados, uma tendência de variação da lâmina de irrigação (Tabela 7) entre as diferentes DS, sendo a lâmina de irrigação maior nas primeiras DS (outubro) reduzindo gradativamente até as últimas datas de semeadura (dezembro). Esta variação pode ser explicada por dois motivos: primeiro as primeiras DS tem maior duração do ciclo em relação às últimas DS, necessitando maior lâmina de irrigação; segundo a coincidência do período de maior necessidade hídrica da cultura da soja, do florescimento ao início da formação de legumes (Doorenbos & Kassam, 1979), com o período do ano em que a demanda evaporativa da atmosfera é mais alta (Heldwein et al., 2009). Essa constatação confirma as conclusões obtidas por Franke & Dorfman (2000) obtidas em estudo numérico para as necessidades de irrigação suplementar para a cultura da soja nas regiões do Planalto Médio e Missões, RS. Também concordam com os resultados apresentados por Matzenauer et al. (2003), em todos os locais avaliados, em diversas regiões do Rio Grande do Sul, em que as datas de semeadura com maior risco de déficit hídrico são as do mês de outubro, ou seja, são necessárias maiores lâminas de irrigação para suprir a demanda hídrica.

Os valores de lâmina de irrigação variaram entre 340,1 mm e 236,7 mm, considerando-se o manejo de irrigação 0,8, GM 5.9–6.8 e os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos. Assim, pode-se afirmar que em 90% dos casos, isto é, em nove de cada dez anos, que a lâmina de irrigação é igual ou inferior aos valores acima citados. Essa interpretação pode ser utilizada para os demais grupos de solos, grupos de maturação, datas de semeadura e manejos de irrigação. A lâmina de irrigação acumulada durante todo o ciclo, independentemente do grupo de solo e GM, foi sempre maior no manejo de irrigação 0,8, seguida dos manejos de irrigação 0,7, 0,6 e 0,5. Esta tendência era esperada, uma vez que nos diferentes manejos de irrigação há a aplicação de diferentes lâminas de irrigação.

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 7, constata-se que os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos, devido a menor CAD, necessitam de uma lâmina de irrigação acumulada durante todo o ciclo maior que os solos São Pedro, Alto das Canas, Venda Grande, Cerrito, Santa Maria e Vacacaí.

**Tabela 7.** Estimativa da lâmina máxima de irrigação (mm) necessária à cultura da soja para a cultura da soja nos grupos de maturação (5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0), com 90% de probabilidade de ocorrência, para os grupos de solos Chaci, Savencal e Smva, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | M   | Chaci <sup>1</sup> |         |         | Savencal |         |         | Smva    |         |         |
|--------|-----|--------------------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
|        |     | 5.9–6.8            | 6.9–7.3 | 7.4–8.0 | 5.9–6.8  | 6.9–7.3 | 7.4–8.0 | 5.9–6.8 | 6.9–7.3 | 7.4–8.0 |
| 01/out | 0,5 | —                  | —       | 237,7   | —        | —       | 239,3   | —       | —       | 223,9*  |
|        | 0,6 | —                  | —       | 292,0   | —        | —       | 285,7   | —       | —       | 259,3   |
|        | 0,7 | —                  | —       | 317,4   | —        | —       | 317,2   | —       | —       | 314,7   |
|        | 0,8 | —                  | —       | 336,6   | —        | —       | 333,2   | —       | —       | 338,0   |
| 11/out | 0,5 | —                  | 274,1   | 243,5   | —        | 245,0   | 242,5   | —       | 241,2   | 243,0   |
|        | 0,6 | —                  | 307,0   | 298,1   | —        | 305,2   | 284,3   | —       | 278,8   | 266,5   |
|        | 0,7 | —                  | 311,4   | 323,4   | —        | 329,1   | 310,0   | —       | 329,7   | 316,9   |
|        | 0,8 | —                  | 350,4   | 333,3   | —        | 337,5   | 329,6   | —       | 339,7   | 336,8   |
| 21/out | 0,5 | 256,8              | 264,4   | 251,8   | 255,3    | 260,7   | 238,7   | 230,9   | 235,9   | 219,4   |
|        | 0,6 | 285,3              | 290,5   | 282,0   | 278,7    | 287,1   | 266,1   | 274,3   | 283,6   | 271,3   |
|        | 0,7 | 300,6              | 310,9   | 315,4   | 309,4    | 315,5   | 304,3   | 300,3   | 308,5   | 304,3   |
|        | 0,8 | 340,1              | 349,7   | 325,5   | 322,4    | 330,6   | 324,6   | 335,1   | 342,0   | 338,5   |
| 01/nov | 0,5 | 243,6              | 250,6   | 236,8   | 243,5    | 242,5   | 222,1   | 212,6   | 217,0   | 213,0   |
|        | 0,6 | 270,3              | 282,7   | 270,7   | 267,9    | 276,3*  | 249,6   | 263,9   | 266,6   | 249,5   |
|        | 0,7 | 292,5              | 301,2   | 306,9   | 299,9    | 308,7   | 283,6   | 291,4   | 295,6   | 291,7   |
|        | 0,8 | 328,1              | 334,7   | 323,3   | 310,9    | 322,6   | 301,7   | 320,1   | 329,5   | 321,8   |
| 11/nov | 0,5 | 229,2              | 233,9   | 216,1   | 221,7    | 221,0   | 202,0   | 198,8   | 207,5   | 200,9   |
|        | 0,6 | 264,7              | 265,5   | 251,8   | 254,6    | 263,7   | 234,7   | 248,0   | 242,8   | 234,0   |
|        | 0,7 | 276,3              | 286,2   | 280,4   | 285,2    | 287,4   | 270,0   | 275,8   | 282,3   | 274,2   |
|        | 0,8 | 318,6              | 321,7   | 301,2   | 303,7    | 306,0   | 291,3   | 305,6   | 313,9   | 307,9   |
| 21/nov | 0,5 | 216,1              | 219,3   | 194,0   | 209,5    | 208,3   | 187,9   | 183,8   | 185,8   | 177,9   |
|        | 0,6 | 239,4              | 246,0   | 221,9   | 238,2    | 233,1   | 218,4   | 221,5   | 216,9   | 211,7   |
|        | 0,7 | 262,0              | 272,7   | 262,3   | 262,0    | 264,0   | 255,2   | 256,1   | 255,8   | 243,6   |
|        | 0,8 | 301,7              | 300,2   | 283,9   | 288,9    | 290,2   | 284,3   | 285,9   | 289,7   | 287,3   |
| 01/dez | 0,5 | 191,7              | 190,8   | 185,4   | 186,7    | 188,1   | 170,4   | 184,3   | 171,6   | 160,1   |
|        | 0,6 | 223,5              | 235,9   | 213,4   | 211,7    | 210,2   | 208,1   | 195,9   | 208,8   | 208,9   |
|        | 0,7 | 248,5              | 253,5   | 246,0   | 245,3    | 250,7   | 242,4   | 229,4   | 226,7   | 230,3   |
|        | 0,8 | 274,5              | 277,7   | 270,5   | 268,6    | 271,8   | 265,7   | 263,4   | 270,7   | 275,3   |
| 11/dez | 0,5 | 173,2              | 175,0   | 164,2   | 171,8    | 173,2   | 159,7   | 152,5   | 152,7   | 146,7   |
|        | 0,6 | 209,0              | 212,9   | 201,1   | 193,1    | 196,4   | 198,0   | 187,4   | 183,7   | 175,1   |
|        | 0,7 | 229,7              | 232,2   | 226,3   | 221,7    | 227,1   | 218,0   | 211,5   | 213,8   | 217,1   |
|        | 0,8 | 253,5              | 259,3   | 250,3   | 247,5    | 254,0   | 246,6   | 247,3   | 252,1   | 253,9   |
| 21/dez | 0,5 | 165,9              | 171,6   | 152,7   | 147,5    | 148,5   | 155,6   | 137,9   | 137,4   | 139,6   |
|        | 0,6 | 189,5              | 190,7   | 185,8   | 181,1    | 188,5   | 184,6   | 161,9   | 161,1   | 165,0   |
|        | 0,7 | 213,3              | 217,2   | 209,2   | 205,6    | 211,7   | 203,9   | 199,1   | 205,0   | 203,8   |
|        | 0,8 | 236,7              | 237,1   | 232,6   | 229,7    | 231,5   | 230,2   | 228,6   | 237,6   | 233,6   |
| 31/dez | 0,5 | —                  | —       | 141,6   | —        | —       | 137,8   | —       | —       | 114,4   |
|        | 0,6 | —                  | —       | 162,9   | —        | —       | 163,2   | —       | —       | 156,2   |
|        | 0,7 | —                  | —       | 194,4*  | —        | —       | 187,6   | —       | —       | 177,1   |
|        | 0,8 | —                  | —       | 217,1   | —        | —       | 213,9   | —       | —       | 209,6   |

<sup>1</sup>Chaci = Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos; Savencal = Alto das Canas, São Pedro, Venda Grande e Cerrito; Smva = Santa Maria e Vacacaí.

\*A probabilidade para DS e M sem ajuste de Fdp (SA) foram determinadas pela distribuição empírica.

A lâmina de irrigação variou entre os três grupos de maturação da soja. Na maioria das DS e manejos de irrigação, o grupo de maturação 6.9–7.3 apresentou os maiores valores de lâmina de irrigação máxima, seguido do GM 5.9–6.8. Isso pode ser explicado, pois apesar do ciclo dos grupos de maturação 6.9–7.3 e 5.9–6.8 serem menores que o grupo 7.4–8.0, o subperíodo no qual o consumo de água pela cultura da soja (R1-R5) é maior nos GM 5.9–6.8 e 6.9–7.3, aumentando assim necessidade de suplementação hídrica. O GM 7.4–8.0, de modo geral, apresentou os menores valores de lâmina de irrigação, exceção a esse comportamento foram as DS após 01/dez para os solos Santa Maria e Vacacaí.

## CONCLUSÕES

Os melhores ajustes para a lâmina de irrigação foram estimados com as funções de distribuição de probabilidade lognormal, gama, Weibull e normal.

A lâmina de irrigação máxima durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja, para a probabilidade de 90% de ocorrência, varia entre 114,5 e 350,4 mm, dependendo da data de semeadura, solo, manejo de irrigação e grupo de maturação.

Os solos com menor capacidade de armazenamento de água necessitam de maior lâmina de irrigação.

## LITERATURA CITADA

- ALBERTO, C.M. et al. Modelo para estimar o termo aerodinâmico na equação de Penman na ausência de dados de vento. In: JORNADA ACADÊMICA INTEGRADA, 17, Santa Maria, Anais... Santa Maria: UFSM, 2002. 1 CD-ROM.
- ALFONSI, R.R. et al. Épocas de semeadura para a cultura do milho no Estado de São Paulo, baseadas na probabilidade de atendimento hídrico. Revista Brasileira de Agrometeorologia. Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 43-49, 1997.
- ALLEN, R.G. et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 297p. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56.
- ASSIS, J.P. de et al. Ajuste de séries históricas de temperatura e radiação solar global diária às funções densidade de probabilidade normal e log-normal, em Piracicaba, SP. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 113-121, 2004.
- BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do

tanque “Classe A” e radiação solar. *Agronomia Sulriograndense*, Porto Alegre, v.22, n.2, p.243-259, 1986.

BERLATO, M.A.; MELO, R.W. de; FONTANA, D.C. Risco de ocorrência de granizo no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 121-132, 2000.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul. Recife: DNPEA, 1973. 431 p. (Boletim Técnico, nº 30).

BURIOL, G.A.; ESTEFANEL, V., HELDWEIN, A.B.; PRESTES, S.D.; HORN, J.F.C. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria – RS. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.42, n.9, p.1563-1567, 2012.

BURIOL, G.A. et al. Probabilidade de ocorrência de valores de radiação solar prejudiciais ao cultivo do pepineiro na região do baixo vale do Taquari, RS. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v. 7, p. 97-104, 2001.

CAMPOS, H. Estatística experimental não paramétrica. Piracicaba: ESALQ, 1983. 349p.

CARDOSO, C.D.V. Probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica nos solos da região Central do Estado do Rio Grande do Sul. 2005. 162f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

CATALUNHA, M. J. et al. Aplicação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.10, n.1, p.153-162, 2002.

CUNHA, G.R. et al. Perda de rendimento potencial da soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria. v. 6, n. 1, p. 111-119, 1998.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Yield response to water, FAO irrigation and drainage paper 33, 1979.

DOURADO NETO, D. et al. Balance hídrico ciclico y secuencial: estimación de almacenamiento de agua en el suelo. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v. 56, n. 3, p. 537-546, 1999.

FIETZ, C.R.; URCHEI, M.A. Deficiência hídrica da cultura da soja na região de Dourados, MS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.3, p.262-265, 2002.

FRANKE, A.E.; DORFMAN, R. Necessidades de irrigação suplementar em soja nas condições edafoclimáticas do Planalto Médio e Missões, RS. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 35, n. 8, p. 1675-1683, 2000.

- FRIZZONE, J.A. et al. Planejamento de irrigação: Análise de decisão de investimentos. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 626 p.
- HELDWEIN, A.B.; BURIOL, G.A.; STRECK, N.A. O Clima de Santa Maria. Revista Ciência Ambiente, v.38, p.43-58, 2009.
- HOFFMANN, A. et al. Estimativa da primeira data do outono e última data da primavera com temperatura do ar menor ou igual a 0° C em Pelotas, RS. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 65-68, 1994.
- KIESLING, T.C. Calculation of the length of the day. Agronomy Journal, Madison, v.74, p.758-759, 1982.
- MALDANER, I.C. Probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica na cultura do girassol na região central do Rio Grande do Sul. 2012. 141 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2012.
- MARTORANO, L.G.; BERGAMASCHI, H.; FARIA, R.T. de; DALMAGO, G.A. Decision Strategies for Soil Water Estimations in Soybean Crops Subjected to No-Tillage and Conventional Systems, in Brazil. In: Manish Kumar. (Org.). Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management. Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management. Rijeka: InTech - Open Access Publisher, 2012, p. 439-453.
- MATZENAUER, R. et al. Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul. Porto Alegre: FEPAGRO, 2002. 105p. (Boletim FEPAGRO,10).
- MATZENAUER, R; BARNI, N.A.; MALUF, J.R.T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul. Ciência Rural, v. 33, n. 6, 2003.
- NIED, A.H. et al. Épocas de semeadura do milho com menor risco de ocorrência de deficiência hídrica no município de Santa Maria, RS, Brasil. Ciência Rural, v. 35, n. 5, p. 995-1002, 2005.
- PERAZA, J.E.S. Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul. 2003. 117f. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- REUNIÃO DE PESQUISA DA SOJA DA REGIÃO SUL, 38., 2010, Cruz Alta. Indicações Técnicas para a Cultura da Soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2010/2011 e 2011/2012. Cruz Alta: FUNDACEP FECOTRIGO, 2010. 168p.
- SAS INSTITUTE. SAS-STAT: user's guide. 8th ed. Cary: SAS Institute, 2001.

- SCHNEIDER, F.M.; BURIOL, G.A.; HELDWEIN, A.B.; MANFRON, P.A.; SACCOL, A.V.; ESTEFANEL, V. Temperatura base e soma térmica do subperíodo semeadura emergência para algumas cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). *Revista do Centro de Ciências Rurais, Santa Maria*, v. 17, n.4, p. 299-308, 1987.
- SCOTT, A.J.; KNOTT, M.A. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics, Raleigh*, v.30, n.3, p.507-512. 1974.
- SETIYONO, T.D. et al. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research, Amsterdam*, v.100, p.257-271, 2007.
- SILVA, J.C. Épocas de menor risco de estresse hídrico e térmico para o feijoeiro na região central do Rio Grande do Sul. 2005. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria.
- SILVA, J.C. et al. Análise de distribuição de chuva para Santa Maria, RS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande*, v. 11, n. 1, p. 67-72, 2007.
- SILVA, J.C. et al. Necessidade de irrigação para o feijoeiro na região central do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 10, p. 1030-1036, 2011.
- SILVA, J.C. Parâmetros de irrigação para o feijoeiro em diferentes solos e épocas de semeadura na região central do Rio Grande do Sul. 2008. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- SINCLAIR, T.R. Water and nitrogen limitations in soybean grain productivity. I. Model development. *Field Crops Research, Amsterdam*, v.15, p.125-141, 1986.
- SINCLAIR, T.R. et al. Soybean flowering date: linear and logistic models based on temperature and photoperiod. *Crop Science, Madison*, v. 31, p. 786–790, 1991.
- SINCLAIR, T.R. et al. Soybean yields and soil water status in Argentina: Simulation analysis. *Agricultural Systems*, v. 94, p. 471-477, 2007.
- STRECK, E.V. et al. *Solos do Rio Grande do Sul*. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008a. 222 p.
- STRECK, N.A. et al. Estimativa do plastocrono em cultivares de soja. *Bragantia, Campinas*, v. 67, n. 1, p. 67-73, 2008b.
- STRECK, N.A. et al. Improving node number simulation in soybean. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 44, n. 7, p. 661-668, 2009.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. *Publications in Climatology*, [S.L.], v. 3, n. 10, 1955. 104 p.

TRENTIN, G. Parâmetros de irrigação por análise numérica para a cultura do milho na Região Central do Rio Grande do Sul. 2009. 192 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

VAREJÃO SILVA, M.A. *Meteorologia e Climatologia*. Brasília: INMET, Stilo, 2000. 532 p.



## **CAPÍTULO IV – Lâminas de irrigação para a cultura da soja na região central do Rio Grande do Sul associadas ao El Niño Oscilação Sul**

**Resumo:** O objetivo deste trabalho foi determinar os valores médios de lâmina de irrigação necessários para a cultura da soja semeada em diferentes datas de semeadura e sua relação com o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), considerando-se a capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) dos principais solos da região Central do Rio Grande do Sul. Este estudo foi realizado por meio de modelos matemáticos de desenvolvimento da cultura da soja publicados na literatura e dados meteorológicos, coletados na estação climatológica principal de Santa Maria, RS (latitude: 29°43'S, longitude: 53°43'W e altitude: 95 m), desde outubro de 1968 até julho de 2012, totalizando 44 anos de observações. A simulação do desenvolvimento da cultura foi realizada para diferentes datas de semeadura, a cada dez dias, foram considerados três grupos de maturação (GM): 5.9–6.8 (Ciclo precoce/semiprecoce), 6.9–7.3 (Ciclo médio,) e 7.8–8.0 (Ciclo semitardio/tardio). Constatou-se que a maior lâmina de irrigação necessária à cultura da soja está associada a anos Neutros, enquanto que a menor lâmina de irrigação está relacionada a eventos de El Niño.

**Palavras-chave:** *Glycine max* (L.) Merrill, ENOS, La Niña, Balanço Hídrico do solo.

### **Irrigation for soybean in the central region of Rio Grande do Sul associated with the El Niño Southern Oscillation**

**Abstract:** The objective of this study was to determine the average values of the irrigation needed for the soybean crop sowed at different sowing dates and their relationship with the El Niño Southern Oscillation (ENSO), considering the capacity of water storage available (CAD) of the main soils of the central region of Rio Grande do Sul. This study was conducted by mathematical models of development of soybean published in the literature and meteorological data collected at a climatological station of Santa Maria, RS (latitude: 29°43'S, longitude: 53°43'W and altitude: 95 m), from October 1968 until July 2012, a total of 44 years of observations. The simulation of crop development was carried out for different sowing dates every ten days, considering three maturity groups (GM): 5.9-6.8, 6.9-7.3 and 7.8-8.0. It

was found that higher water depth necessary to soybean is associated with neutral years, while the lowest water depth is related to El Niño events.

**Key words:** *Glycine max*, ENSO, La Niña, Soil water budget.

## INTRODUÇÃO

A soja contribui com parcela significativa das exportações brasileiras, segundo CONAB (2012), devido à diminuição da oferta mundial do grão os preços aumentaram e, conseqüentemente, a área cultivada com soja. No Estado do Rio Grande do Sul na safra 2011/2012 foram colhidos cerca de 4,2 milhões de hectares com uma produção de 6,525 milhões de toneladas de grãos (CONAB, 2012).

Apesar desses valores expressivos de produção, no Rio Grande do Sul é comum a ocorrência de deficiência hídrica durante o ciclo de desenvolvimento da soja, sendo esse um dos principais fatores limitantes à obtenção de elevados rendimentos de grãos (Matzenauer et al., 1998). A água no solo é o fator que, com maior frequência e intensidade, afeta o rendimento de grãos. Mota et al. (1996) verificaram que a cultura da soja, em todas as regiões climáticas do Rio Grande do Sul, necessita de irrigação em qualquer data de semeadura recomendada, para todos os grupos de maturação e subperíodos avaliados. A precipitação pluvial representa 80% da variação da produtividade da cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul (Berlato & Fontana, 1999).

Um dos fatores atuantes na variação da precipitação pluviométrica é o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), este caracteriza-se por alterações ou anomalias da temperatura da superfície do mar na região do Pacífico Equatorial, próximo à costa oeste da América do Sul (Grimm et al., 1998). De acordo com a variação da temperatura das águas da superfície na região central da bacia do oceano Pacífico pode-se caracterizar a ocorrência do El Niño, La Niña ou Neutro. Quando ocorre a migração das águas quentes para a região leste da bacia do Pacífico Equatorial, denomina-se El Niño e a anomalia de temperatura da superfície do mar (TSM) é positiva, enquanto a La Niña é caracterizada quando a anomalia de TSM na região é negativa (Grimm et al., 1998; Berlato & Fontana, 2003). Quando a condição de temperatura das águas ficar próximo da normal o ano é classificação como Neutro.

Este fenômeno tem início no começo do segundo semestre de um ano e termina no final do primeiro semestre do ano seguinte (Berlato et al., 2005). O fenômeno ENOS afeta a

precipitação pluvial nas diferentes regiões do Brasil, alterando a frequência e a quantidade das chuvas (Fontana & Berlato, 1997; Grimm et al., 1998). No Rio Grande do Sul, a precipitação pluvial é geralmente elevada em anos de El Niño, enquanto que em anos de La Niña ocorre geralmente em níveis mais baixos que nos anos Neutros, especialmente na primavera e início do verão do ano de início do fenômeno (Berlato & Fontana, 2003). No entanto, a tendência é de que as deficiências hídricas sejam maiores nos anos Neutros, principalmente, na metade Sul do RS (Berlato & Fontana, 2003).

Conforme Buriol et al. (2006), ocorre grande variação da precipitação pluviométrica entre os anos e embora haja flutuação da precipitação em curtos períodos, no longo prazo o regime pluviométrico anual do RS não mudou significativamente. Essa flutuação da precipitação ocorre em parte devido ao fenômeno denominado El Niño Oscilação Sul (Fontana & Almeida, 2002). Fontana et al. (2002) demonstraram que os maiores rendimentos obtidos pela cultura da soja estão associados a anos de El Niño (aumento da precipitação pluvial no RS) e os menores rendimentos ocorreram em anos de La Niña (1995/96, 1998/99, e 1999/2000). De acordo com Berlato & Fontana (2003), em anos de El Niño a produtividade da cultura da soja é maior quando comparada à média histórica de produtividade.

O objetivo deste trabalho foi determinar os valores médios de lâmina de irrigação necessários para a cultura da soja semeada em diferentes datas de semeadura e sua relação com o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), considerando-se a capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) dos principais solos da região Central do Rio Grande do Sul.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Os cálculos foram realizados a partir de dados meteorológicos diários, do período de outubro de 1968 até junho de 2012, de temperatura máxima e mínima do ar, insolação, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação pluvial e evaporação no evaporímetro de piche, coletados na Estação Climatológica Principal de Santa Maria (ECPSM), localizada na Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, em 29°43' S, 53°43' W e altitude de 95 m.

A densidade de fluxo da radiação global incidente ( $R_g$ ) foi estimada através da equação de Ångström-Prescott, utilizando-se coeficientes mensais ajustados para Santa Maria por Buriol et al. (2012). O fotoperíodo diário para Santa Maria, RS, considerando-se a

duração do crepúsculo civil de um ângulo de 6° abaixo do plano do horizonte, foi calculado por meio da metodologia de Kiesling (1982).

Os dados sobre anos de ocorrência dos eventos El Niño (EN), La Niña (LN) e Neutros (N), utilizados neste estudo, foram obtidos na página eletrônica do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2012) (Tabela 1).

**Tabela 1.** Classificação dos anos em função dos fenômenos ENOS ocorridos no período de 1968 a 2012.

| Ano <sup>1</sup> | Classificação <sup>2</sup> | Ano       | Classificação | Ano       | Classificação |
|------------------|----------------------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
| 1968-1969        | EN                         | 1983-1984 | N             | 1998-1999 | LN            |
| 1969-1970        | EN                         | 1984-1985 | LN            | 1999-2000 | LN            |
| 1970-1971        | LN                         | 1985-1986 | N             | 2000-2001 | LN            |
| 1971-1972        | LN                         | 1986-1987 | EN            | 2001-2002 | N             |
| 1972-1973        | EN                         | 1987-1988 | EN            | 2002-2003 | EN            |
| 1973-1974        | LN                         | 1988-1989 | LN            | 2003-2004 | N             |
| 1974-1975        | LN                         | 1989-1990 | N             | 2004-2005 | EN            |
| 1975-1976        | LN                         | 1990-1991 | N             | 2005-2006 | N             |
| 1976-1977        | EN                         | 1991-1992 | EN            | 2006-2007 | EN            |
| 1977-1978        | EN                         | 1992-1993 | N             | 2007-2008 | LN            |
| 1978-1979        | N                          | 1993-1994 | N             | 2008-2009 | N             |
| 1979-1980        | N                          | 1994-1995 | EN            | 2009-2010 | EN            |
| 1980-1981        | N                          | 1995-1996 | LN            | 2010-2011 | LN            |
| 1981-1982        | N                          | 1996-1997 | N             | 2011-2012 | LN            |
| 1982-1983        | EN                         | 1997-1998 | EN            |           |               |

<sup>1</sup>De julho de um ano até junho do ano seguinte; <sup>2</sup>La Niña (LN), El Niño (EN) e Neutro (N). Fonte: NOAA (2012).

Para estimar a evapotranspiração de referência foi utilizado o método de Penman-Monteith, conforme Allen et al. (1998) (Equação 1). Para os poucos períodos com ausência de dados de velocidade do vento foi utilizada a equação de Penman (Varejão Silva, 2000), com um ajuste no termo aerodinâmico, através da evaporação medida no evaporímetro de Piche (EvP, mm d<sup>-1</sup>) e do déficit de saturação do ar (kPa), conforme Alberto et al. (2002) (Equação 2).

Para o cálculo do Balanço Hídrico diário (BH) foi utilizada a metodologia proposta por Thornthwaite & Mather (1955), descrita por Pereira et al. (1997). A metodologia empregada e o roteiro de cálculo foram similares aos utilizados por Silva et al. (2011). Nesta, a lâmina de irrigação necessária no dia “n” foi obtida por meio do cálculo iterativo, considerando-se o conteúdo de água armazenado no solo no dia “n-1”. A lâmina de irrigação, quando existente, juntamente com a variável precipitação efetiva foram consideradas entradas de água no cálculo do BH. Foi considerado nos cálculos do BH o valor da precipitação pluvial efetiva, sendo este valor obtido por meio da metodologia do U.S. Soil Conservation Service, descrita por Frizzone et al. (2005).

$$ET_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} \frac{Q^*}{L} + \frac{\gamma \cdot 900 \cdot U_2 \cdot d}{(\Delta + \gamma^*)(T_m + 275)} \quad (1)$$

$$ET_o = \frac{(\Delta \cdot \gamma^{-1}) \cdot (Q^* \cdot L^{-1}) + (a + b \text{ EvP}) \cdot d}{(\Delta \cdot \gamma^{-1}) + 1} \quad (2)$$

em que:  $\Delta$  é a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água para a temperatura média diária ( $T_m$ , °C);  $Q^*$  é o Saldo de radiação ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $\gamma$  a constante psicrométrica ( $0,0662 \text{ kPa} \cdot \text{C}^{-1}$ );  $\gamma^*$  a constante psicrométrica corrigida,  $U_2$  a velocidade média diária do vento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $d$  o déficit de saturação do ar (kPa) e  $L$  o calor latente de evaporação ( $2,46 \text{ MJ kg}^{-1}$ );  $a$  e  $b$  são coeficientes ajustados por Alberto et al. (2002) para estimativa do fator aerodinâmico ( $E_a$ ) a partir da evaporação do evaporímetro de Piche (EvP), 0,42 e 0,0245, respectivamente.

Este estudo foi realizado para as principais unidades de mapeamento de solo na região de abrangência da ECPSM. Os solos das unidades de mapeamento São Pedro, Venda Grande, Cerrito, Alto das Canas, Santa Maria e Vacacaí foram selecionados, pois estes representam a maior área de solos da região. Também foram avaliadas as unidades de mapeamento Charrua, Ciriaco, Guassupi e Júlio de Castilhos por representarem o grupo de solos com menor profundidade explorável pelas raízes das plantas e, portanto, menor CAD.

Os valores de CAD inicial (CADi) e CAD final (CADx) foram calculados para os diferentes grupos de solos, utilizando-se os valores de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) descritos para os diferentes horizontes e solos com base nas informações encontradas em Brasil (1973), Peraza (2003), Cardoso (2005) e Streck et al. (2008a). A CADi foi determinada para a profundidade de 0,15 m, enquanto que a CADx foi determinada até a profundidade de 0,40 m (Fietz & Urchei, 2002). Os solos da região foram agrupados em classes, conforme o valor da CADi e CADx (Tabela 2).

**Tabela 2.** Capacidade inicial de armazenamento de água disponível no solo (CADi) e final (CADx), curva número (CN) da precipitação efetiva, unidades de mapeamento (Brasil, 1973) e classificação dos solos (Streck et al., 2008a) da área de abrangência da estação meteorológica principal de Santa Maria, RS, utilizados no estudo simulado dos parâmetros de irrigação para os anos agrícolas de 1968 a 2012.

| Grupo    | CADi (mm) | CADx (mm) | CN* | Unidades de Mapeamento | Classificação dos solos                       |
|----------|-----------|-----------|-----|------------------------|---|
| Chaci    | 15        | 45        | 91  | Charrua                | Neossolo Litólico Eutrófico típico            |
|          | 15        | 45        | 91  | Ciríaco                | Chernossolo Argilúvico Férrico típico         |
|          | 15        | 45        | 91  | Guassupi               | Neossolo Litólico Distró-úmbrico fragmentário |
|          | 15        | 45        | 91  | Júlio de Castilhos     | Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico úmbrico  |
| Savencal | 15        | 60        | 72  | Alto das Canas         | Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico úmbrico |
|          | 15        | 60        | 72  | São Pedro              | Argissolo Vermelho Distrófico arênico         |
|          | 15        | 60        | 72  | Venda Grande           | Chernossolo Argilúvico Órtico saporlítico     |
|          | 15        | 60        | 72  | Cerrito                | Latossolo Vermelho Distrófico típico          |
| Smva     | 22        | 85        | 72  | Santa Maria            | Argissolo Amarelo Alítico típico              |
|          | 22        | 85        | 72  | Vacacaí                | Planossolo Háplico Eutrófico arênico          |

\*CN = 72 para os solos com teor de areia maior que 50% e 91 com teor de areia menor que 50%, considerou-se o solo Alto das Canas como arenoso na camada 0-40 cm.

A necessidade de irrigação foi determinada pelo quociente entre o conteúdo atual de água no solo e a CAD. Estes foram determinados para o dia n, sendo a irrigação realizada no próximo dia (dia n+1), quando necessária. A irrigação foi realizada de forma teórica sempre que o conteúdo relativo de água no solo foi igual ou inferior aos limites estabelecidos: 0,5; 0,6; 0,7 e 0,8 mm mm<sup>-1</sup>, os quais correspondem, respectivamente, a retirada de água disponível armazenada no solo de no máximo 50, 40, 30 e 20% da CAD.

A simulação do desenvolvimento da cultura foi realizada para as diferentes datas de semeadura para os três grupos de maturação (GM): 5.9–6.8 (Ciclo precoce/semiprecoce), 6.9–7.3 (Ciclo médio,) e 7.8–8.0 (Ciclo semitardio/tardio) em intervalos de aproximadamente 10 dias durante os períodos de semeadura recomendados pelas indicações técnicas (Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul, 2010) (Tabela 3).

**Tabela 3.** Datas de semeadura (DS) utilizadas na simulação do desenvolvimento da cultura da soja, para três grupos de maturação (GM).

| DS     | Grupo de Maturação (GM)                         |                               |   |
|--------|---|-------------------------------|---|
|        | GM 5.9 – 6.8<br>(Ciclo precoce/<br>semiprecoce) | GM 6.9 – 7.3<br>(Ciclo médio) | GM 7.4 – 8.0 (Ciclo<br>Semitardio/<br>tardio) |
| 01/out | — <sup>1</sup>                                  | — <sup>1</sup>                | 1   |
| 11/out | — <sup>1</sup>                                  | 1                             | 2   |
| 21/out | 1   | 2                             | 3   |
| 01/nov | 2   | 3                             | 4   |
| 11/nov | 3   | 4                             | 5   |
| 21/nov | 4   | 5                             | 6   |
| 01/dez | 5   | 6                             | 7   |
| 11/dez | 6   | 7                             | 8   |
| 21/dez | 7   | 8                             | 9   |
| 31/dez | — <sup>1</sup>                                  | — <sup>1</sup>                | 10  |

<sup>1</sup> Datas de semeadura não recomendadas para a região.

A data de emergência foi estimada por meio do cálculo da soma térmica, em graus-dia ( $^{\circ}\text{C d}^{-1}$ ), adotando-se o valor acumulado de  $92,5^{\circ}\text{C}$  a partir temperatura base de  $10^{\circ}\text{C}$  (Schneider, et al., 1987). A data de ocorrência do estágio V2 foi estimada por meio do modelo Soydev (Setiyono et al., 2007) com coeficientes obtidos por Streck et al. (2009) em Santa Maria, RS, esta simulação iniciou a partir da data de emergência.

A data do início do florescimento (R1) foi simulada por meio do o modelo não-linear de resposta do desenvolvimento à temperatura e ao fotoperíodo, proposto por Sinclair et al. (1991), utilizando coeficientes interpolados conforme o grupo de maturação. O cálculo com este modelo iniciou a partir da data de emergência e terminou quando a taxa de desenvolvimento (SD) atingiu 1,0.

A data de ocorrência do estágio R5 (início do enchimento de grão) foi simulada pelo modelo de Sinclair et al. (2007), iniciando a integração dos valores na data de ocorrência de R1 e finalizando quando a taxa de desenvolvimento atingiu 1,0. A data do estágio R7 (início da maturação) foi simulada a partir da data de ocorrência do estágio R5 por meio do cálculo da soma térmica ( $ST_{R5-R7}$ ) de maneira similar à simulação da data de emergência adotando a temperatura base de  $10^{\circ}\text{C}$  e soma térmica acumulada de  $554^{\circ}\text{C dia}$  conforme Martorano et al. (2012).

Com as datas de início do florescimento (R1) e início de enchimento de grão (R5) já estimadas, a data da maturação fisiológica (R8), foi simulada pelo modelo proposto por

Sinclair (1986). Esta simulação foi feita sem restrição hídrica, eliminando-se a função de resposta ao déficit hídrico no algoritmo. Além dos coeficientes apresentados no trabalho de Sinclair (1986) foram utilizados os valores do plastocrono da soja, publicados por Streck et al. (2008b).

As simulações do desenvolvimento da cultura foram utilizadas para o cálculo da variação do Kc e da CAD, considerando o gradativo aprofundamento radicular. Foram utilizados Kc publicados na literatura por Berlatto et al. (1986), sendo estes considerados os valores constantes durante os subperíodos S-V2 e R1-R5 (Tabela 4). No subperíodo V2-R1 foi utilizada uma equação que considerou a variação da taxa de desenvolvimento (SD) e no subperíodo R5-R7 uma equação que considerou a soma térmica durante o subperíodo R5-R7.

Para o cálculo da CAD<sub>n</sub> desde a emergência, quando se tem a CAD inicial (CAD<sub>i</sub>) até o estágio R1, utilizou-se a curva de crescimento sigmoideal do sistema radicular (Tabela 4), apresentada por Dourado-Neto et al. (1999), em função da taxa de desenvolvimento (SD) anteriormente calculada. Esta varia de 0,0 (emergência) até 1,0 (estágio R1).

**Tabela 4.** Coeficientes de cultura utilizados para determinar a evapotranspiração máxima da cultura da soja e variação da CAD conforme o desenvolvimento da cultura da soja.

| Subperíodo* | Coeficiente de cultura (Kc)              | Variação da CAD   |
|-------------|--|---|
| S-V2        | Kc = 0,56                                | CAD <sub>n</sub> = CAD <sub>i</sub>   |
| V2-R1       | Kc = 1,362 · SD + 0,137                  | CAD <sub>n</sub> = CAD <sub>in</sub> + (CAD <sub>f</sub> - CAD <sub>in</sub> ) <sup>2</sup> · [1 - COS(π · SD)] |
| R1-R5       | Kc = 1,5                                 | CAD <sub>n</sub> = CAD <sub>x</sub>   |
| R5-R7       | Kc = 0,694 · ST <sub>R5-R7</sub> - 0,222 | CAD <sub>n</sub> = CAD <sub>x</sub>   |
| R7-R8       | —  | —   |

\*Subperíodos compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8).

Os cálculos foram realizados a partir do desenvolvimento de algoritmos escritos no software Statistical Analysis System (SAS, 2001). Para relacionar os valores de lâmina de irrigação com o fenômeno ENOS, os valores de lâmina de irrigação, durante o ciclo de desenvolvimento foram agrupados em anos de El Niño (EN), La Niña (LN) e Neutros (N). Os valores foram submetidos à análise de variância, adotando-se o delineamento inteiramente casualizado, e teste de Scott-Knott (Scott & Knott, 1974), em nível de 5% de significância. As fontes de variação foram os grupos de maturação, evento ENOS, tipos de solo, datas de semeadura, níveis de manejo de irrigação e respectivas interações.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme pode ser observado na Tabela 5, nos três grupos de maturação avaliados, a maior lâmina média de irrigação necessária para a cultura da soja na região Central do Rio Grande do Sul está associada aos anos Neutros, seguida dos anos classificados como anos de La Niña e a menor está associada a anos de El Niño. Considerando-se o grupo de maturação, a menor lâmina de irrigação necessária é do grupo 5.9–6.8 nos três agrupamentos de anos conforme a classificação do fenômeno ENOS.

**Tabela 5.** Comparação dos valores médios de lâmina de irrigação (mm), classificando os dados com base nos anos com eventos de El Niño (EN), La Niña (LN) e Neutros (N), para três grupos de maturação (GM) da cultura da soja, por simulação numérica em cada um dos anos do período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.

| GM        | EN                       | LN       | N        |
|-----------|--------------------------|----------|----------|
|           | Lâmina de irrigação (mm) |          |          |
| 5.9 – 6.8 | 171,2 bC*                | 175,2 bB | 194,3 bA |
| 6.9 – 7.3 | 180,9 aC                 | 187,2 aB | 204,2 aA |
| 7.4 – 8.0 | 176,4 aC                 | 183,6 aB | 198,0 bA |

\*Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Para o grupo de solos Chaci, que engloba as unidades de mapeamento dos solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos tem-se a maior necessidade de lâmina de irrigação para suprir as necessidades hídricas do cultivo da soja (Tabela 6). Isto, já era esperado, pois este grupo tem a menor capacidade armazenamento de água dentre os solos avaliados neste estudo, portanto, a necessidade de reposição de água na forma de irrigação é maior. Por outro, os solos Santa Maria e Vacacaí, por sua vez necessitam uma menor lâmina de irrigação para suprir necessidades hídricas do cultivo da soja.

Considerando-se o efeito do fenômeno ENOS sobre a lâmina de irrigação necessária (Tabela 6), observa-se que o volume de água necessário é maior em anos Neutros, seguido de anos de La Niña, que não diferiram estatisticamente dos anos classificados como El Niño. Exceção a esses resultados são os solos Santa Maria e Vacacaí com o cultivo de soja de maturação tardia. Neste caso, o volume de irrigação diferiu entre anos de La Niña e El Niño. Vale ressaltar também, que em anos de El Niño e La Niña, os três grupos de solos avaliados em cada grupo de maturação diferem estatisticamente entre si. Este padrão não ocorre quando

observado os valores médios de anos Neutros. Nestes os grupos de solos Chaci e Savencal não diferem estatisticamente entre si, diferindo dos solos Santa Maria e Vacacaí.

**Tabela 6.** Comparação dos valores médios de lâmina de irrigação (mm), classificando os dados com base nos anos com eventos de El Niño (EN), La Niña (LN) e Neutros (N), totalizados em cada período de cultivo para cada grupo de solos, estudados na simulação do ciclo da soja para os grupos de maturação (GM) 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, durante o período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.

| GM        | Grupo de solo | EN                       | LN       | N        |
|-----------|---------------|--------------------------|----------|----------|
|           |               | Lâmina de irrigação (mm) |          |          |
| 5.9 – 6.8 | Chaci         | 187,3 aB*                | 190,8 aB | 205,2 aA |
|           | Savencal      | 174,5 bB                 | 178,7 bB | 197,5 aA |
|           | Smva          | 151,6 cB                 | 156,2 cB | 180,3 bA |
| 6.9 – 7.3 | Chaci         | 197,5 aB                 | 203,0 aA | 215,5 aA |
|           | Savencal      | 185,1 bB                 | 190,7 bB | 208,0 aA |
|           | Smva          | 160,2 cB                 | 167,9 cB | 189,1 bA |
| 7.4 – 8.0 | Chaci         | 192,4 aB                 | 198,3 aB | 209,2 aA |
|           | Savencal      | 180,4 bB                 | 187,1 bB | 201,9 aA |
|           | Smva          | 156,2 cC                 | 165,2 cB | 183,0 bA |

\*Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de Probabilidade. (Chaci = Charrua, Ciríaco, Guassupi, e Júlio de Castilhos; Savencal = Alto das Canas, São Pedro, Venda Grande e Cerrito; Smva = Santa Maria e Vacacaí).

Na Tabela 7 são apresentados os valores médios de lâmina de irrigação classificados de acordo com o fenômeno ENOS em diferentes datas de semeadura e grupos de maturação. Nos três grupos de maturação os maiores valores de lâmina de irrigação ocorrem nas primeiras datas de semeadura 21/out (5.9–6.8), 11/out (6.9-7.3) e 01/out (7.4-8.0) diminuindo gradativamente até as últimas datas de semeadura 21/dez (5.9–6.8 e 6.9-7.3) e 31/dez (7.4-8.0). Essa tendência foi observada nos três agrupamentos de anos (EN, LN e N).

**Tabela 7.** Comparação dos valores médios de lâmina de irrigação (mm), classificando os dados com base nos anos com eventos de El Niño (EN), La Niña (LN) e Neutros (N), nas diferentes datas de semeadura (DS) estudadas na simulação do ciclo da soja, para os grupos de maturação (GM) 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, durante o período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.

| GM        | DS     | Lâmina de irrigação (mm) |          |          |
|-----------|--------|--------------------------|----------|----------|
|           |        | EN                       | LN       | N        |
| 5.9 – 6.8 | 01/out | —                        | —        | —        |
|           | 11/out | —                        | —        | —        |
|           | 21/out | 207,2 aB*                | 220,6 aB | 235,1 aA |
|           | 01/nov | 194,7 bB                 | 206,1 bB | 226,9 aA |
|           | 11/nov | 185,0 bB                 | 188,7 cB | 214,0 bA |
|           | 21/nov | 170,8 cB                 | 173,5 dB | 194,4 cA |
|           | 01/dez | 160,4 cB                 | 159,3 dB | 177,1 dA |
|           | 11/dez | 145,4 dB                 | 146,0 eB | 162,3 eA |
|           | 21/dez | 134,6 dB                 | 132,5 eB | 150,7 eA |
|           | 31/dez | —                        | —        | —        |
| 6.9 – 7.3 | 01/out | —                        | —        | —        |
|           | 11/out | 219,1 aB                 | 235,8 aA | 246,0 aA |
|           | 21/out | 212,2 aC                 | 228,2 aB | 242,6 aA |
|           | 01/nov | 199,1 bB                 | 209,0 bB | 230,3 bA |
|           | 11/nov | 189,3 bB                 | 195,6 bB | 213,9 cA |
|           | 21/nov | 176,8 cB                 | 178,9 cB | 196,1 dA |
|           | 01/dez | 163,4 cB                 | 164,6 cB | 182,7 dA |
|           | 11/dez | 149,5 dB                 | 150,3 dB | 168,7 eA |
|           | 21/dez | 138,0 dB                 | 135,0 eB | 153,5 fA |
|           | 31/dez | —                        | —        | —        |
| 7.4 – 8.0 | 01/out | 213,5 aB                 | 233,9 aA | 239,3 aA |
|           | 11/out | 214,3 aB                 | 233,7 aA | 241,9 aA |
|           | 21/out | 206,6 aC                 | 221,2 aB | 237,8 aA |
|           | 01/nov | 192,3 bB                 | 205,3 bB | 223,2 bA |
|           | 11/nov | 187,8 bB                 | 192,4 bB | 207,0 cA |
|           | 21/nov | 174,5 cB                 | 176,8 cB | 193,5 dA |
|           | 01/dez | 161,2 dB                 | 163,5 cB | 181,6 dA |
|           | 11/dez | 149,2 dB                 | 149,1 dB | 166,6 eA |
|           | 21/dez | 138,3 eB                 | 134,7 eB | 152,6 fA |
|           | 31/dez | 125,7 eA                 | 124,1 eA | 136,4 gA |

\*Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Em praticamente todas as datas de semeadura a lâmina de irrigação necessária foi maior em anos Neutros, seguido de anos de La Niña e El Niño, os quais não diferiram estatisticamente entre si (Tabela 7). As exceções foram as datas de semeadura 21/out dos grupos de maturação 6.9–7.3 e 7.4–8.0 e 31/dez do grupo de maturação 7.4–8.0, na qual não houve diferença significativa entre lâmina de irrigação nos anos Neutros, de El Niño e La Niña. Indiretamente, pode-se então inferir que nas semeaduras tardias, fim de dezembro, tem-se menor déficit hídrico para a cultura da soja mesmo em anos Neutros e de La Niña. Diante destes resultados pode-se considerar que a escolha das datas de semeadura que envolvem menor risco de redução da produção da soja deve estar associada às previsões de ocorrência do fenômeno ENOS.

A interação foi significativa para a combinação solo x Manejo de irrigação x ENOS para a variável lâmina de irrigação, assim a análise estatística para a comparação de médias foi desdobrada dentro da cada fator (Tabela 8). Observando-se os valores médios do Manejo de irrigação 0,5, no qual a irrigação foi realizada teoricamente sempre que o conteúdo de água no solo atingiu 50% da CAD, verifica-se um padrão, no qual indiferente ao grupo de maturação da cultura da soja ou grupo de solos, a maior lâmina de irrigação necessária ocorre nos anos Neutros, seguidas das lâminas de irrigação dos anos de La Niña e El Niño, que não diferem estatisticamente entre si. Esse padrão, também pode ser observado nos manejos de irrigação 0,6 e 0,7, para os solos Alto das Canas, São Pedro, Venda Grande, Cerrito, Santa Maria e Vacacaí.

No manejo de irrigação 0,8 a irrigação é prevista para quando forem consumidos 20% da CAD ou quando o conteúdo atual de água no solo esteja a 80% da CAD, calculada para aquele dia. Neste manejo não houve diferenças significativas entre as lâminas de irrigação nos anos Neutros, de El Niño e La Niña, com exceção dos solos Santa Maria e Vacacaí no grupo de maturação 5.9–6.8. Também não houve diferenças significativas na lâmina de irrigação nos manejos de irrigação 0,6, 0,7 e 0,8 para os solos Ciríaco, Charrua, Guassupi, Júlio de Castilhos.

**Tabela 8.** Comparação dos valores médios de lâmina de irrigação (mm), classificando os dados com base nos anos com eventos de El Niño (EN), La Niña (LN) e Neutros (N), totalizados em cada período de cultivo, para cada manejo de irrigação e solo estudados na simulação do ciclo da soja, para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, durante o período de 1968 a 2012. Santa Maria, RS, 2013.

| Grupo de solo                | ENOS | Manejo de irrigação <sup>1</sup> |                     |                     |                     |
|------------------------------|------|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                              |      | 0,5                              | 0,6                 | 0,7                 | 0,8                 |
| Grupo de Maturação 5.9 – 6.8 |      |                                  |                     |                     |                     |
| Chaci                        | EN   | 144,1 b*                         | 176,0 <sup>ns</sup> | 202,1 <sup>ns</sup> | 227,1 <sup>ns</sup> |
|                              | LN   | 147,0 b                          | 177,9               | 204,6               | 233,7               |
|                              | N    | 167,1 a                          | 194,6               | 215,6               | 243,4               |
| Savencal                     | EN   | 121,0 b                          | 162,9 b             | 190,7 b             | 223,4 <sup>ns</sup> |
|                              | LN   | 129,2 b                          | 162,7 b             | 195,4 b             | 227,5               |
|                              | N    | 150,8 a                          | 186,6 a             | 213,7 a             | 238,9               |
| Smva                         | EN   | 90,9 b                           | 128,1 b             | 176,8 b             | 210,7 b             |
|                              | LN   | 93,2 b                           | 138,3 b             | 176,3 b             | 217,2 b             |
|                              | N    | 125,3 a                          | 162,3 a             | 201,3 a             | 232,5 a             |
| Grupo de Maturação 6.9 – 7.3 |      |                                  |                     |                     |                     |
| Chaci                        | EN   | 153,8 b                          | 186,0 <sup>ns</sup> | 212,0 <sup>ns</sup> | 238,2 <sup>ns</sup> |
|                              | LN   | 157,6 b                          | 190,5               | 217,5               | 246,3               |
|                              | N    | 175,5 a                          | 205,1               | 228,2               | 253,2               |
| Savencal                     | EN   | 128,3 b                          | 173,0 b             | 203,2 b             | 235,7 <sup>ns</sup> |
|                              | LN   | 139,0 b                          | 174,2 b             | 208,3 b             | 241,3               |
|                              | N    | 161,2 a                          | 195,2 a             | 225,1 a             | 250,7               |
| Smva                         | EN   | 95,0 b                           | 135,9 b             | 187,7 b             | 222,2 <sup>ns</sup> |
|                              | LN   | 105,3 b                          | 145,8 b             | 189,1 b             | 230,9               |
|                              | N    | 129,0 a                          | 171,4 a             | 210,9 a             | 245,3               |
| Grupo de Maturação 7.4 – 8.0 |      |                                  |                     |                     |                     |
| Chaci                        | EN   | 148,7 b                          | 179,6 <sup>ns</sup> | 208,3 <sup>ns</sup> | 233,2 <sup>ns</sup> |
|                              | LN   | 153,9 b                          | 186,4               | 212,1               | 240,8               |
|                              | N    | 169,2 a                          | 198,3               | 223,8               | 245,5               |
| Savencal                     | EN   | 123,0 b                          | 168,8 b             | 198,8 b             | 231,0 <sup>ns</sup> |
|                              | LN   | 135,8 b                          | 171,6 b             | 204,2 b             | 236,7               |
|                              | N    | 153,4 a                          | 189,1 a             | 218,7 a             | 246,2               |
| Smva                         | EN   | 92,6 b                           | 130,0 b             | 183,3 b             | 218,6 <sup>ns</sup> |
|                              | LN   | 103,6 b                          | 143,0 b             | 187,1 b             | 225,9               |
|                              | N    | 126,5 a                          | 162,9 a             | 203,6 a             | 238,6               |

\*Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. (Chaci = Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos; Savencal = Alto das Canas, São Pedro, Venda Grande e Cerrito; Smva = Santa Maria e Vacacaí).

A partir dos dados apresentados nas Tabelas 5, 6, 7 e 8 é possível constatar que a lâmina de irrigação necessária à cultura da soja para a região central do Rio Grande do Sul é maior em anos classificados como Neutros. Anos de El Niño necessitam de uma menor

lâmina de irrigação. Estes resultados concordam com Alberto et al. (2006), que afirmou que em anos de El Niño são mais favoráveis para a produção de soja, em Santa Maria, RS. Também concordam com os resultados apresentados por Maldaner (2012), que relata menores valores de deficiência hídrica para a cultura do girassol em anos de El Niño e maiores valores em anos Neutros. Conforme Maldaner (2012), a explicação para as maiores probabilidades de deficiências hídricas verificadas em anos Neutros é a tendência de maior irregularidade na distribuição da precipitação pluvial no Rio Grande do Sul nestes anos.

## CONCLUSÕES

Em anos de El Niño, independente do grupo de maturação, a lâmina de irrigação necessária é menor que em anos de La Niña e Neutros.

Independente do solo e da data de semeadura, a lâmina de irrigação requerida é maior em anos Neutros em comparação a anos de El Niño e La Niña.

## LITERATURA CITADA

- ALBERTO, C.M. et al. Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 7, p. 1067-1075, 2006.
- ALBERTO, C.M. et al. Modelo para estimar o termo aerodinâmico na equação de Penman na ausência de dados de vento. In: *JORNADA ACADÊMICA INTEGRADA*, 17, Santa Maria, Anais... Santa Maria: UFSM, 2002. 1 CD-ROM.
- ALLEN, R.G. et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 297p. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56.
- BERLATO, M.A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D. C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no Estado do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 40, n. 5, p.423-432, 2005.
- BERLATO, M.A.; FONTANA, D. C. El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2003. 110p.
- BERLATO, M.A.; FONTANA, D. C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.7, n. 1, p.119-125, 1999.

- BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do tanque “Classe A” e radiação solar. *Agronomia Sulriograndense*, Porto Alegre, v.22, n.2, p.243-259, 1986.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul. Recife: DNPEA, 1973. 431 p. (Boletim Técnico, nº 30).
- BURIOL, G.A. et al. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria – RS. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.42, n.9, p.1563-1567, 2012.
- BURIOL, G.A. et al. Homogeneidade e estatísticas descritivas dos totais mensais e anuais de chuva de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.11, p.89-97, 2006.
- CARDOSO, C.D.V. Probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica nos solos da região Central do Estado do Rio Grande do Sul. 2005. 162f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: grãos, primeiro levantamento, outubro 2012 / Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab, 2012.
- DOURADO NETO, D. et al. Balance hídrico ciclico y secuencial: estimación de almacenamiento de agua en el suelo. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v. 56, n. 3, p. 537-546, 1999.
- FIETZ, C.R.; URCHEI, M.A. Deficiência hídrica da cultura da soja na região de Dourados, MS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.3, p.262-265, 2002.
- FONTANA, D.C. et al. Monitoramento da cultura da soja no centro-sul do Brasil durante La Niña 1998/2000. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 343-351, 2002.
- FONTANA, D.C.; ALMEIDA, T.S. Climatologia do número de dias com precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 135-145, 2002.
- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.5, n.1, p.127-132, 1997.
- FRIZZONE, J.A. et al. Planejamento de irrigação: Análise de decisão de investimentos. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 626 p.

- GRIMM, A. et al. Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, v. 11, p. 2863-2880, 1998.
- KIESLING, T.C. Calculation of the length of the day. *Agronomy Journal*, Madison, v.74, p.758-759, 1982.
- MALDANER, I.C. Probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica na cultura do girassol na região central do Rio Grande do Sul. 2012. 141 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2012.
- MARTORANO, L.G. et al. Decision Strategies for Soil Water Estimations in Soybean Crops Subjected to No-Tillage and Conventional Systems, in Brazil. In: Manish Kumar. (Org.). *Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management. Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management*. Rijeka: InTech - Open Access Publisher, 2012, p. 439-453.
- MATZENAUER, R. et al. Análise agroclimática das disponibilidades hídricas para a cultura da soja na região do planalto Médio do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria. v. 6, n. 2, p. 263-275, 1998.
- MOTA, F.S. et al. Análise agroclimatológica da necessidade de irrigação da soja no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 4, n.1, p.133-138, 1996.
- NOAA. ENSO: Cold and warm episodes by season. On-line. Disponível na Internet: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)  
Capturado em 05 de dezembro de 2012.
- PERAZA, J.E.S. Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul. 2003. 117f. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- REUNIÃO DE PESQUISA DA SOJA DA REGIÃO SUL, 38., 2010, Cruz Alta. *Indicações Técnicas para a Cultura da Soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2010/2011 e 2011/2012*. Cruz Alta: FUNDACEP FECOTRIGO, 2010. 168p.
- SAS INSTITUTE. *SAS-STAT: user's guide*. 8th ed. Cary: SAS Institute, 2001.
- SCHNEIDER, F.M.; BURIOL, G.A.; HELDWEIN, A.B.; MANFRON, P.A.; SACCOL, A.V.; ESTEFANEL, V. Temperatura base e soma térmica do subperíodo semeadura emergência para algumas cultivares de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). *Revista do Centro de Ciências Rurais*, Santa Maria, v. 17, n.4, p. 299-308, 1987.

- SCOTT, A.J.; KNOTT, M.A. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, Raleigh, v.30, n.3, p.507-512. 1974.
- SETIYONO, T.D. et al. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.100, p.257-271, 2007.
- SILVA, J.C. et al. Necessidade de irrigação para o feijoeiro na região central do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 10, p. 1030-1036, 2011.
- SINCLAIR, T.R. Water and nitrogen limitations in soybean grain productivity. I. Model development. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.15, p.125-141, 1986.
- SINCLAIR, T.R. et al. Soybean flowering date: linear and logistic models based on temperature and photoperiod. *Crop Science*, Madison, v. 31, p. 786-790, 1991.
- SINCLAIR, T.R. et al. Soybean yields and soil water status in Argentina: Simulation analysis. *Agricultural Systems*, v. 94, p. 471-477, 2007.
- STRECK, E. V. et al. Solos do Rio Grande do Sul. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008a. 222 p.
- STRECK, N.A. et al. Estimativa do plastocrono em cultivares de soja. *Bragantia*, Campinas, v. 67, n. 1, p. 67-73, 2008b.
- STRECK, N.A. et al. Improving node number simulation in soybean. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 44, n. 7, p. 661-668, 2009.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. *Publications in Climatology*, [S.L.], v. 3, n. 10, 1955. 104 p.
- VAREJÃO SILVA, M.A. *Meteorologia e Climatologia*. Brasília: INMET, Stilo, 2000. 532 p.



## **CAPÍTULO V – Discussão Geral**

A disponibilidade hídrica é o fator que, com maior frequência e intensidade, afeta a produção de grãos. Estudos com a determinação dos valores de lâmina de irrigação e número de irrigações para a cultura da soja, fundamentais na elaboração de projetos de irrigação, são escassos e incompletos para a região central do Rio Grande do Sul. Adicionalmente, também são escassas as informações sobre a duração do ciclo e subperíodos de desenvolvimento da cultura da soja na região central do Rio Grande do Sul, bem como o efeito do fenômeno El Niño Oscilação Sul sobre a lâmina de irrigação. A busca por estas informações constituiu o incentivo para a realização deste trabalho.

O texto deste trabalho foi segmentado em quatro capítulos, sendo que no Capítulo I foi abordada a modelagem do desenvolvimento da cultura da soja. Os modelos de desenvolvimento da cultura da soja utilizados no presente estudo foram testados em diversos ambientes como descrito por Sinclair (1986), Sinclair et al. (1991), Sinclair et al. (2007) e Setiyono et al. (2007) e para as condições de Santa Maria, RS, nos trabalhos de Alberto et al. (2006) e Streck et al. (2009). O desenvolvimento da cultura em cada um dos modelos foi calculado, na escala diária, em função da temperatura média do ar e fotoperíodo.

A análise da duração dos subperíodos e do ciclo da cultura da soja é importante para o planejamento e manejo. Estes estudos podem auxiliar na tomada de decisões relacionados à escolha de datas de semeadura e dimensionamento de projetos de irrigação. A data de semeadura influencia diretamente a duração dos subperíodos, pois, há uma grande variabilidade temporal dos elementos meteorológicos entre os anos, e por isso a análise de probabilidade de ocorrência é uma ferramenta importante a ser considerada no planejamento de ações de cultivo.

Neste estudo os valores de duração dos subperíodos obtidos por meio da simulação do desenvolvimento da cultura da soja foram imprescindíveis para a utilização adequada dos coeficientes de cultura e simulação do aprofundamento radicular e, desta maneira, foi possível realizar um balanço hídrico sequencial diário plausível para cada data de semeadura de cada ano da série histórica de dados nos demais capítulos (II, III e IV).

Por meio da análise de variância foi possível verificar que, em todas as datas de semeadura, a duração dos ciclos e dos subperíodos de desenvolvimento da cultura da soja foram estatisticamente significativas em nível de 1% de probabilidade do erro, portanto, há diferenças entre as datas de semeadura e para as variáveis de duração do ciclo e dos

subperíodos dos grupos de maturação 5.9–6.8 (Apêndice A), 6.9–7.3 (Apêndice B) e 7.4–8.0 (Apêndice C).

No capítulo II foi utilizado a modelagem de desenvolvimento das culturas e o balanço hídrico sequencial diário aplicado nos diferentes solos da região. Foram apresentados valores médios de lâmina e número de irrigações baseados em 44 anos de dados de observações meteorológicas. O solo no Balanço Hídrico diário foi considerado como um reservatório de água, a qual é removida pela evapotranspiração e adicionada pela precipitação pluvial e irrigação. As características dos solos da região de estudo foram descritas por Cardoso (2005) e apresentados no Anexo A.

A análise de variância da variável lâmina de irrigação revelou que foram estatisticamente significativos os efeitos solo, manejo de irrigação e data de semeadura (DS) e as interações solo x manejo x DS, em nível de 1% de probabilidade de erro para todos os três grupos de maturação, o do grupo de maturação 7.4–8.0 também apresentou significância na interação manejo x DS (Apêndice D).

Quando avaliada a variável número de irrigações, a análise de variância revelou que foram estatisticamente significativos os efeitos solo, manejo e DS e as interações solo x manejo x DS, manejo x DS em nível de 1% de probabilidade de erro para todos os grupos de maturação (Apêndice E). Não houve interação significativa a 5% de probabilidade de erro na interação solo x manejo x DS.

No Capítulo III foi abordada a análise de distribuição da lâmina de irrigação para a cultura da soja na região Central do Rio Grande do Sul. No capítulo II, constatou-se a semelhança na comparação de médias de lâmina de irrigação para os solos Cambaí, Oásis, São Gabriel, Santa Maria e Vacacaí. Assim, nos capítulos III e IV, por restrições de tamanho aceito para submissão de artigos em periódicos científicos, foram somente apresentados os resultados para os solos São Pedro, Venda Grande, Cerrito, Alto das Canas, Santa Maria e Vacacaí, pois estes representam a maior área de abrangência na região. Também foram avaliadas as unidades de mapeamento Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos por representarem o grupo de solos com menor profundidade explorável pelas raízes das plantas e, portanto, menor CAD. Por similaridade, os resultados referentes aos solos Santa Maria e Vacacaí, podem ser estendidos aos solos Cambaí, Oásis e São Gabriel,

Foram analisadas funções de distribuição de probabilidades (Fdp) normal, exponencial, gama, lognormal e Weibull para as variáveis duração de subperíodos e duração do ciclo de desenvolvimento (Capítulo I), lâmina de irrigação (Capítulo III) e número de irrigações (Apêndices I, J e K). Contudo, em nenhum dos casos avaliados a Fdp exponencial

ajustou-se aos dados. Uma descrição mais detalhada das características das principais Fdp e suas funções acumuladas pode ser encontrada em Silva (2008) e no Anexo B.

Diversos trabalhos utilizaram a metodologia do balanço hídrico sequencial diário e distribuições de probabilidade, para analisar a distribuição de disponibilidade hídrica para as diferentes capacidades de armazenamento de água (CAD) nos diferentes tipos de solos da região central do Rio Grande do Sul, envolvendo condições de superfície de referência (Cardoso, 2005), feijoeiro (Silva, 2005) e girassol (Maldaner, 2012). Silva (2008) e Trentin (2009), respectivamente, avaliaram parâmetros de irrigação e suas probabilidades para o feijoeiro e cultura do milho.

No capítulo III foi apresentada a análise de distribuição da irrigação por meio de funções de distribuição de probabilidades (Tabelas 4, 5 e 6), mas somente foi apresentada a estimativa de lâmina máxima necessária cultura da soja considerando-se a probabilidade de 90% de ocorrência (Tabela 7). Deste modo, as lâminas máximas necessárias a cultura da soja para as probabilidades de 95, 90, 75 e 50% são apresentadas para as unidades de mapeamento dos solos: Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos (Apêndice F); São Pedro, Venda Grande, Alto das Canas e Cerrito (Apêndice G) e Santa Maria e Vacacaí (Apêndice H).

A mesma tendência de variação da lâmina de irrigação é observada entre as diferentes DS, sendo a lâmina de irrigação maior nas primeiras DS (outubro) reduzindo gradativamente até as últimas datas de semeadura (dezembro). Com redução do nível de probabilidade, observa-se que valores estimados diminuem. Isto ocorre uma vez que as estimativas são baseadas em probabilidades de não excedência, isto é, considerando-se um determinado valor de probabilidade a lâmina de irrigação não é maior que o valor estimado, pode-se também inferir que em um determinado nível de probabilidade a lâmina de irrigação é menor ou igual ao valor estimado (FRIZZONE et al., 2005; SILVA, 2008). A determinação dos valores máximos de lâmina de irrigação é condizente com os projetos de irrigação, que sempre são dimensionados para valores máximos (FRANKE e DORFMAN, 1997).

A mesma tendência de diminuição com a redução do nível de probabilidade foi observada no capítulo I (Tabelas 4, 5 e 7) quando avaliadas as variáveis duração dos subperíodos e do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja, variação esperada, pois o valor é referente ao máximo de ocorrência em cada nível de probabilidade.

No capítulo III também não foi abordada a variável número de irrigações. As funções de distribuição de probabilidades selecionadas e seus parâmetros para estimar o número de irrigações são apresentadas para os solos: Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos (Apêndice I); São Pedro, Venda Grande, Alto das Canas e Cerrito (Apêndice J) e Santa Maria

e Vacacaí (Apêndice K). Foram obtidas as estimativas da lâmina de irrigação necessária para a cultura da soja por meio das Fdp selecionadas (Apêndices I, J e K), quando os dados não aderiam a nenhuma das distribuições, sem ajuste (SA), utilizou-se a distribuição empírica para obter-se o valor de lâmina de irrigação, para os solos: Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos (Apêndice L); São Pedro, Venda Grande, Alto das Canas e Cerrito (Apêndice M); Santa Maria e Vacacaí (Apêndice N).

No capítulo IV foram determinados os valores médios de lâmina de irrigação necessários para a cultura da soja semeada em diferentes datas e a sua associação com o fenômeno El Niño Oscilação Sul, considerando-se a capacidade de armazenamento de água disponível dos principais solos da região Central do Rio Grande do Sul.

Em anos classificados como El Niño, a análise de variância da variável lâmina de irrigação revelou que foram estatisticamente significativos os efeitos solo, manejo de irrigação e data de semeadura (DS) e a interação solo x manejo, em nível de 1% de probabilidade de erro para todos os três grupos de maturação (Apêndice O). Não houve interação significativa a 5% de probabilidade de erro nas interações solo x DS, manejo x DS e solo x manejo x DS. A mesma tendência observada na análise da variância para anos de El Niño foi observada para anos classificados como La Niña (Apêndice P) e Neutros (Apêndice Q). A análise de variância do fenômeno ENOS é apresentada no Apêndice R.

A variável lâmina de irrigação foi abordada de diferentes maneiras: valores médios (Capítulo II), probabilidade de ocorrência por meio de funções de distribuição de probabilidades (Capítulo III) e valores médios associados ao fenômeno ENOS (Capítulo IV). Nestes três capítulos, foi observada uma ampla variação em função das datas de semeadura e do manejo de irrigação. Os maiores valores de lâmina de irrigação nas primeiras datas de semeadura são atribuídos à coincidência entre o período de maior exigência hídrica da planta, período com maior índice de área foliar, com a maior demanda atmosférica por vapor d'água, que é maior com a proximidade do solstício de verão. Resultando, dessa forma, em maiores necessidades de irrigação.

O manejo da irrigação também influi sobre a lâmina de irrigação necessária, pois, quanto maior a fração da CAD a ser mantida, maior a necessidade de reposição hídrica. Assim, considerando-se que as semeaduras de outubro apresentam maior risco à produção de grãos, uma vez que esta é dependente da disponibilidade hídrica. Para minimizar esses efeitos pode-se realizar a semeadura de genótipos de grupo de maturação 7.4–8.0, para minimizar os riscos da perda de produtividade, para o período de maior exigência hídrica da planta não coincidir com o período de maior demanda evaporativa da atmosfera.

Conforme Heldwein et al. (2009) períodos de seca são comuns em Santa Maria, o que exige medidas para o armazenamento de água e práticas de manejo do solo que minimizem tais efeitos negativos. Neste estudo as estimativas de lâmina de irrigação e número de irrigação são aproximações das necessidades de irrigação nas condições edafoclimáticas avaliadas. Entretanto, a decisão da adoção da prática de irrigação e do nível de manejo, deve levar em consideração o nível de tecnologia adotado na propriedade, tipo solo, manejo do solo, presença de camadas compactadas no solo, poder de investimento, estudo de viabilidade técnica e econômica, entre outros fatores (OLIVEIRA, 1990; FRANKE; DORFMAN, 1997; SILVA, 2008).



## CONCLUSÕES GERAIS

Tanto a duração dos subperíodos como do ciclo de desenvolvimento da soja é variável dependente da data de semeadura. A duração do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja é maior nas primeiras datas de semeadura (outubro) decrescendo até últimas datas de semeadura (dezembro).

A distribuição lognormal obteve melhor ajuste aos dados de duração do ciclo de desenvolvimento da soja. Para estimar os subperíodos as distribuições lognormal, Weibull e normal representam melhor o desenvolvimento da soja.

Ao nível de 95% de probabilidade as épocas de semeadura 21/dez (GM 5.9–6.8 e 6.9–7.3) 31/dez (GM 7.4–8.0), tem a menor duração do ciclo de desenvolvimento da soja, com duração máxima de 107, 112 e 114 dias, respectivamente.

Dentre os solos estudados, aqueles com menor capacidade de armazenamento de água necessitam de maior lâmina de irrigação acumulada em todo o ciclo para suprir as necessidades hídricas da cultura da soja.

As primeiras datas de semeadura (outubro) necessitam de maior lâmina de irrigação do que as últimas datas de semeadura (dezembro).

As funções de distribuição de probabilidade lognormal, gama, Weibull e normal, em ordem decrescente, obtiveram os melhores ajustes para a variável lâmina de irrigação.

A lâmina de irrigação máxima durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura da soja, para a probabilidade de 90% de ocorrência, varia entre 114,5 e 350,4 mm, dependendo da data de semeadura, solo, manejo de irrigação e grupo de maturação.

A lâmina de irrigação estimada diminui à medida que o nível da probabilidade de risco diminui.

Em anos de El Niño a lâmina de irrigação necessária para a cultura da soja é menor do que em anos Neutros e de La Niña.

Sugere-se que sejam feitos novos estudos desta natureza para a cultura da soja envolvendo o estudo do excesso e déficit hídrico, para servir de suporte ao planejamento de cultivos de soja não irrigados.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTO, C. M. et al. Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 7, p. 1067-1075, 2006.

ALFONSI, R. R. et al. Épocas de semeadura para a cultura do milho no Estado de São Paulo, baseadas na probabilidade de atendimento hídrico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria. v. 5, n.1, p. 43-49, 1997.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife: DNPEA, 1973. 431 p. (Boletim Técnico, nº 30).

BURIOL, G.A. et al. Homogeneidade e estatísticas descritivas dos totais mensais e anuais de chuva de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.11, p.89-97, 2006.

CARDOSO, C. D. V. **Probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica nos solos da região Central do Estado do Rio Grande do Sul**. 2005. 162f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, primeiro levantamento, outubro 2012** / Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab, 2012.

FARIAS, J. R. B. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.3, (Nº Especial: Zoneamento Agrícola), p. 415-421, 2001.

FONTANA, D. C.; ALMEIDA, T. S. Climatologia do número de dias com precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 1, p. 135-145, 2002.

FRANKE, A. E.; DORFMAN, R. Análise probabilística das necessidades de irrigação suplementar no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 109-121, 1997.

FRIZZONE, J. A. et al. **Planejamento de irrigação: Análise de decisão de investimentos**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 626 p.

HASTINGS, N. A. J.; PEACOCK, J. B. Statistical distributions: A handbook for students and practitioners. **Longon Butterworths**, 1975. 129 p.

HELDWEIN, A.B.; BURIOL, G.A.; STRECK, N. A. O Clima de Santa Maria. **Revista Ciência Ambiente**, v.38, p. 43-58, 2009.

KITE, G.W. Frequency and risk analysis in hydrology. **Water Resources Publications**, Fort Collins, v. 3, p. 395, 1978.

LEIVAS, J. F. et al. Risco de deficiência hídrica decenal na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 397-407, 2006.

MALDANER, I.C. **Probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica na cultura do girassol na região central do Rio Grande do Sul**. 2012. 141 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

MATZENAUER, R. et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO, 2002. 105p. (Boletim FEPAGRO,10).

MATZENAUER, R. et al. Análise agroclimática das disponibilidades hídricas para a cultura da soja na região do planalto Médio do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria. v. 6, n. 2, p. 263-275, 1998.

MIRSHAWKA, V. **Estatística**, vol. II. São Paulo: Nobel, 1971. 367 p.

NIED, A. H. et al. Épocas de semeadura do milho com menor risco de ocorrência de deficiência hídrica no município de Santa Maria, RS, Brasil. **Ciência Rural**, v. 35, n. 5, p. 995-1002, 2005.

OLIVEIRA, D. **Evapotranspiração máxima e necessidade de água para irrigação de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.) determinados por balanço hídrico para seis locais do Paraná**. 1990. 155f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

RIBEIRO JÚNIOR, J. A. **Análises estatísticas no Excel**: guia prático. Viçosa: UFV, 2004.

SETIYONO, T. D. et al. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.100, p.257-271, 2007.

SILVA, J. C. **Épocas de menor risco de estresse hídrico e térmico para o feijoeiro na região central do Rio Grande do Sul**. 2005. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria.

SILVA, J. C. et al. Análise de distribuição de chuva para Santa Maria, RS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 67-72, 2007.

SILVA, J. C. **Parâmetros de irrigação para o feijoeiro em diferentes solos e épocas de semeadura na região central do Rio Grande do Sul**. 2008. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SINCLAIR, T. R. Water and nitrogen limitations in soybean grain productivity. I. Model development. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.15, p.125-141, 1986.

SINCLAIR, T. R. et al. Soybean flowering date: linear and logistic models based on temperature and photoperiod. **Crop Science**, Madison, v. 31, p. 786–790, 1991.

SINCLAIR, T. R. et al. Soybean yields and soil water status in Argentina: Simulation analysis. **Agricultural Systems**, v. 94, p. 471-477, 2007.

STRECK, N. A. et al. Improving node number simulation in soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 7, p. 661-668, 2009.

THOM, H. C. S. A note on the gamma distribution. **Monthly Weather Review**, Washington, v. 86, p. 117-122, 1958.

TRENTIN, G. **Parâmetros de irrigação por análise numérica para a cultura do milho na Região Central do Rio Grande do Sul**. 2009. 192 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2009.



APÊNDICE A – Análise de variância da duração do ciclo total e dos subperíodos de desenvolvimento compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), em função das datas de semeadura (DS) para a soja grupo de maturação 5.9–6.8, para os municípios da região central do RS. Santa Maria, RS, 2013.

| Fontes de Variação                 | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F        |
|------------------------------------|--------------------|-------------------|----------------|----------|
| ----- Semeadura – Emergência ----- |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 6                  | 239,70            | 39,95          | 32,34*   |
| Erro                               | 301                | 371,82            | 1,24           |          |
| Total                              | 307                | 611,52            |                |          |
| ----- Emergência – V2 -----        |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 6                  | 657,11            | 109,52         | 45,48*   |
| Erro                               | 301                | 724,77            | 2,41           |          |
| Total                              | 307                | 1381,88           |                |          |
| ----- V2 – R1 -----                |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 6                  | 1041,71           | 173,62         | 43,30*   |
| Erro                               | 301                | 1206,84           | 4,01           |          |
| Total                              | 307                | 2248,55           |                |          |
| ----- R1 – R5 -----                |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 6                  | 6140,44           | 1023,41        | 1536,56* |
| Erro                               | 301                | 200,48            | 0,66           |          |
| Total                              | 307                | 6340,92           |                |          |
| ----- R5 – R7 -----                |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 6                  | 334,20            | 55,70          | 8,76*    |
| Erro                               | 301                | 1914,97           | 6,36           |          |
| Total                              | 307                | 2249,18           |                |          |
| ----- R7 – R8 -----                |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 6                  | 379,75            | 63,29          | 9,57*    |
| Erro                               | 301                | 1878,98           | 6,61           |          |
| Total                              | 307                | 2258,73           |                |          |
| ----- Ciclo Total -----            |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 6                  | 25031,86          | 4171,097       | 485,60*  |
| Erro                               | 301                | 2586,00           | 8,59           |          |
| Total                              | 307                | 27617,86          |                |          |

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro.

APÊNDICE B – Análise de variância da duração do ciclo total e dos subperíodos de desenvolvimento compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), em função das datas de semeadura (DS) para a soja grupo de maturação 6.9–7.3, para os municípios da região central do RS. Santa Maria, RS, 2013.

| Fontes de Variação                 | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F        |
|------------------------------------|--------------------|-------------------|----------------|----------|
| ----- Semeadura – Emergência ----- |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 7                  | 476,59            | 68,08          | 45,98*   |
| Erro                               | 344                | 509,37            | 1,48           |          |
| Total                              | 351                | 985,95            |                |          |
| ----- Emergência – V2 -----        |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 7                  | 1011,41           | 144,49         | 51,75*   |
| Erro                               | 344                | 960,41            | 2,79           |          |
| Total                              | 351                | 1971,82           |                |          |
| ----- V2 – R1 -----                |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 7                  | 1832,93           | 261,85         | 56,64*   |
| Erro                               | 344                | 1590,25           | 4,62           |          |
| Total                              | 351                | 3423,18           |                |          |
| ----- R1 – R5 -----                |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 7                  | 7731,91           | 1104,56        | 1876,81* |
| Erro                               | 344                | 202,45            | 0,59           |          |
| Total                              | 351                | 7934,36           |                |          |
| ----- R5 – R7 -----                |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 7                  | 736,36            | 105,19         | 15,09*   |
| Erro                               | 344                | 2397,65           | 6,97           |          |
| Total                              | 351                | 3134,02           |                |          |
| ----- R7 – R8 -----                |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 7                  | 836,92            | 119,56         | 15,70*   |
| Erro                               | 344                | 2474,64           | 7,61           |          |
| Total                              | 351                | 3311,75           |                |          |
| ----- Ciclo Total -----            |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 7                  | 32720,08          | 4674,29        | 396,54*  |
| Erro                               | 344                | 4055,00           | 11,79          |          |
| Total                              | 351                | 36775,08          |                |          |

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro.

APÊNDICE C – Análise de variância da duração do ciclo total e dos subperíodos de desenvolvimento compreendidos entre as datas de semeadura (S), emergência (E), primeira folha trifoliada (V2), início da floração (R1), início do enchimento do grão (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8), em função das datas de semeadura (DS) para a soja grupo de maturação 7.4–8.0, para os municípios da região central do RS. Santa Maria, RS, 2013.

| Fontes de Variação                 | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F        |
|------------------------------------|--------------------|-------------------|----------------|----------|
| ----- Semeadura – Emergência ----- |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 9                  | 996,24            | 110,69         | 61,96*   |
| Erro                               | 430                | 768,16            | 1,78           |          |
| Total                              | 439                | 1764,40           |                |          |
| ----- Emergência – V2 -----        |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 9                  | 2244,19           | 249,36         | 79,20*   |
| Erro                               | 430                | 1353,77           | 3,15           |          |
| Total                              | 439                | 3597,96           |                |          |
| ----- V2 – R1 -----                |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 9                  | 7373,37           | 819,26         | 153,12*  |
| Erro                               | 430                | 2300,73           | 5,35           |          |
| Total                              | 439                | 9674,10           |                |          |
| ----- R1 – R5 -----                |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 9                  | 6615,53           | 735,07         | 2186,72* |
| Erro                               | 430                | 144,55            | 0,34           |          |
| Total                              | 439                | 6760,17           |                |          |
| ----- R5 – R7 -----                |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 9                  | 2572,55           | 285,84         | 34,79*   |
| Erro                               | 430                | 3532,86           | 8,22           |          |
| Total                              | 439                | 6105,42           |                |          |
| ----- R7 – R8 -----                |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 9                  | 4051,18           | 450,13         | 42,31*   |
| Erro                               | 430                | 4330,49           | 10,64          |          |
| Total                              | 439                | 8381,67           |                |          |
| ----- Ciclo Total -----            |                    |                   |                |          |
| DS                                 | 9                  | 56389,55          | 6265,50        | 299,23*  |
| Erro                               | 430                | 9003,79           | 20,94          |          |
| Total                              | 439                | 65393,34          |                |          |

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro.

APÊNDICE D – Análise de variância da lâmina de irrigação por ciclo de desenvolvimento para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0 da cultura da soja em função do tipo de solo, do manejo de irrigação, das épocas de semeadura (DS) e suas interações, para os municípios da região central do RS. Santa Maria, RS, 2013.

| Fontes de Variação     | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F                  |
|------------------------|--------------------|-------------------|----------------|--------------------|
| ----- GM 5.9–6.8 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 4                  | 894303,12         | 223575,78      | 121,96*            |
| Manejo                 | 3                  | 9583365,11        | 3194455,04     | 1742,55*           |
| DS                     | 6                  | 4797518,25        | 799586,37      | 436,17*            |
| Solo x Manejo          | 12                 | 202863,26         | 16905,27       | 9,22*              |
| Solo x DS              | 24                 | 4402,982          | 183,46         | 0,10 <sup>ns</sup> |
| Manejo x DS            | 18                 | 40190,99          | 2232,83        | 1,22 <sup>ns</sup> |
| Solo x Manejo x DS     | 72                 | 25069,31          | 348,18         | 0,19 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 6020               | 11035881,11       | 1833,20        |                    |
| Total                  | 6159               | 26583594,13       |                |                    |
| ----- GM 6.9–7.3 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 4                  | 1118042,48        | 279510,62      | 144,77*            |
| Manejo                 | 3                  | 12016057,98       | 4005352,66     | 2074,56*           |
| DS                     | 7                  | 6707168,59        | 958166,94      | 496,28*            |
| Solo x Manejo          | 12                 | 291677,08         | 24306,42       | 12,59*             |
| Solo x DS              | 28                 | 7868,28           | 281,01         | 0,15 <sup>ns</sup> |
| Manejo x DS            | 21                 | 68958,89          | 3283,76        | 1,70 <sup>ns</sup> |
| Solo x Manejo x DS     | 84                 | 33698,12          | 401,17         | 0,21 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 6879               | 13281268,01       | 1930,70        |                    |
| Total                  | 7038               | 33524739,43       |                |                    |
| ----- GM 7.4–8.0 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 4                  | 1317813,23        | 329453,31      | 173,91*            |
| Manejo                 | 3                  | 14668194,55       | 4889398,18     | 2580,94*           |
| DS                     | 9                  | 10455593,40       | 1161732,60     | 613,24*            |
| Solo x Manejo          | 12                 | 339101,06         | 28258,42       | 14,92*             |
| Solo x DS              | 36                 | 7705,72           | 214,05         | 0,11 <sup>ns</sup> |
| Manejo x DS            | 27                 | 164884,94         | 6106,85        | 3,23*              |
| Solo x Manejo x DS     | 108                | 55344,74          | 512,45         | 0,27 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 8592               | 16276931,80       | 1894,43        |                    |
| Total                  | 8791               | 43285569,45       |                |                    |

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup>Não significativo.

APÊNDICE E – Análise de variância do número de irrigações por ciclo de desenvolvimento para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0 da cultura da soja em função do tipo de solo, do manejo de irrigação, das épocas de semeadura (DS) e suas interações, para os municípios da região central do RS. Santa Maria, RS, 2013.

| Fontes de Variação     | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F                  |
|------------------------|--------------------|-------------------|----------------|--------------------|
| ----- GM 5.9–6.8 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 4                  | 50090,84          | 12522,71       | 2166,88*           |
| Manejo                 | 3                  | 200184,24         | 66728,08       | 11546,4*           |
| DS                     | 6                  | 8826,23           | 1471,04        | 254,54*            |
| Solo x Manejo          | 12                 | 5538,96           | 461,58         | 79,87*             |
| Solo x DS              | 24                 | 365,70            | 15,24          | 2,64*              |
| Manejo x DS            | 18                 | 933,24            | 51,85          | 8,97*              |
| Solo x Manejo x DS     | 72                 | 84,37             | 1,17           | 0,20 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 6020               | 34790,41          | 5,78           |                    |
| Total                  | 6159               | 300813,99         |                |                    |
| ----- GM 6.9–7.3 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 4                  | 62721,74          | 15680,43       | 2585,7*            |
| Manejo                 | 3                  | 248479,99         | 82826,66       | 13658,1*           |
| DS                     | 7                  | 11445,58          | 1635,08        | 269,62*            |
| Solo x Manejo          | 12                 | 6097,47           | 508,12         | 83,79*             |
| Solo x DS              | 28                 | 574,43            | 20,51          | 3,38*              |
| Manejo x DS            | 21                 | 1319,25           | 62,82          | 10,36*             |
| Solo x Manejo x DS     | 84                 | 94,68             | 1,13           | 0,19 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 6879               | 41716,27          | 6,07           |                    |
| Total                  | 7038               | 372449,42         |                |                    |
| ----- GM 7.4–8.0 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 4                  | 76428,41          | 19107,10       | 3044,44*           |
| Manejo                 | 3                  | 309770,68         | 103256,89      | 16452,5*           |
| DS                     | 9                  | 20349,26          | 2261,03        | 360,26*            |
| Solo x Manejo          | 12                 | 7510,02           | 625,83         | 99,72*             |
| Solo x DS              | 36                 | 999,69            | 27,77          | 4,42*              |
| Manejo x DS            | 27                 | 2834,76           | 104,99         | 16,73*             |
| Solo x Manejo x DS     | 108                | 140,43            | 1,30           | 0,21 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 8592               | 53923,96          | 6,28           |                    |
| Total                  | 8791               | 471957,22         |                |                    |

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup>Não significativo.

APÊNDICE F – Estimativa da lâmina máxima de irrigação (mm) necessária à cultura da soja para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | M   | GM 5.9 – 6.8   |       |       |       | GM 6.9 – 7.3 |       |       |       | GM 7.4 – 8.0 |        |        |        |
|--------|-----|----------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|--------------|--------|--------|--------|
|        |     | 95%            | 90%   | 75%   | 50%   | 95%          | 90%   | 75%   | 50%   | 95%          | 90%    | 75%    | 50%    |
| 01/out | 0,5 | — <sup>1</sup> | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 256,3        | 237,7  | 205,7  | 168,7  |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 317,3        | 292,0  | 252,7  | 213,3  |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 333,2        | 317,4  | 289,0  | 254,3  |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 357,9        | 336,6  | 303,7  | 270,9  |
| 11/out | 0,5 | —              | —     | —     | —     | 300,0        | 274,1 | 235,8 | 199,5 | 263,7        | 243,5  | 209,8  | 172,4  |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | 332,7        | 307,0 | 268,5 | 231,4 | 326,4        | 298,1  | 256,3  | 216,7  |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | 326,9        | 311,4 | 285,4 | 256,5 | 346,1        | 323,4  | 287,6  | 251,0  |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | 370,6        | 350,4 | 319,1 | 287,6 | 350,7        | 333,3  | 306,2  | 278,7  |
| 21/out | 0,5 | 279,1          | 256,8 | 223,3 | 191,2 | 286,8        | 264,4 | 230,9 | 198,6 | 281,9        | 251,8  | 208,4  | 169,0  |
|        | 0,6 | 305,9          | 285,3 | 253,1 | 220,2 | 310,2        | 290,5 | 259,3 | 227,4 | 303,7        | 282,0  | 249,1  | 217,0  |
|        | 0,7 | 316,0          | 300,6 | 274,8 | 246,2 | 328,7        | 310,9 | 282,6 | 253,2 | 340,2        | 315,4  | 278,0  | 241,7  |
|        | 0,8 | 360,7          | 340,1 | 308,3 | 276,3 | 368,8        | 349,7 | 319,4 | 287,8 | 341,3        | 325,5  | 300,9  | 275,6  |
| 01/nov | 0,5 | 265,1          | 243,6 | 211,4 | 180,7 | 273,9        | 250,6 | 215,9 | 183,1 | 265,4        | 236,8  | 195,6  | 158,3  |
|        | 0,6 | 287,9          | 270,3 | 242,4 | 213,8 | 301,5        | 282,7 | 253,0 | 222,6 | 292,3        | 270,7  | 236,9  | 202,8  |
|        | 0,7 | 310,8          | 292,5 | 264,3 | 236,2 | 319,8        | 301,2 | 272,5 | 243,9 | 328,7        | 306,9  | 272,6  | 237,6  |
|        | 0,8 | 346,5          | 328,1 | 298,6 | 268,0 | 355,6        | 334,7 | 302,6 | 270,4 | 343,6        | 323,3  | 291,9  | 260,5  |
| 11/nov | 0,5 | 250,3          | 229,2 | 197,7 | 167,8 | 253,5        | 233,9 | 203,5 | 172,9 | 243,7        | 216,1  | 176,8  | 141,5  |
|        | 0,6 | 285,7          | 264,7 | 233,0 | 202,1 | 284,9        | 265,5 | 235,9 | 206,8 | 272,9        | 251,8  | 218,9  | 185,9  |
|        | 0,7 | 293,3          | 276,3 | 250,2 | 224,1 | 304,0        | 286,2 | 257,9 | 228,8 | 300,1        | 280,4  | 250,3  | 220,6  |
|        | 0,8 | 339,4          | 318,6 | 286,6 | 254,7 | 340,2        | 321,7 | 292,3 | 261,7 | 317,2        | 301,2  | 275,8  | 249,2  |
| 21/nov | 0,5 | 236,3          | 216,1 | 184,8 | 153,8 | 239,8        | 219,3 | 187,8 | 156,5 | 216,1        | 194,0  | 160,3  | 127,7  |
|        | 0,6 | 250,9          | 239,4 | 218,7 | 193,3 | 263,7        | 246,0 | 219,1 | 192,6 | 233,7        | 221,9  | 200,8  | 175,1  |
|        | 0,7 | 280,1          | 262,0 | 234,4 | 207,1 | 291,8        | 272,7 | 243,4 | 214,6 | 276,5        | 262,3  | 238,5  | 212,1  |
|        | 0,8 | 322,3          | 301,7 | 270,2 | 239,1 | 317,3        | 300,2 | 272,9 | 244,5 | 297,2        | 283,9  | 261,9  | 237,3  |
| 01/dez | 0,5 | 205,0          | 191,7 | 169,5 | 144,8 | 202,5        | 190,8 | 170,1 | 145,5 | 209,1        | 185,4  | 149,9  | 116,0  |
|        | 0,6 | 240,3          | 223,5 | 198,1 | 173,3 | 256,1        | 235,9 | 205,7 | 176,7 | 232,9        | 213,4  | 184,4  | 156,8  |
|        | 0,7 | 267,4          | 248,5 | 219,8 | 191,8 | 270,2        | 253,5 | 227,1 | 200,0 | 260,2        | 246,0  | 222,4  | 196,1  |
|        | 0,8 | 291,1          | 274,5 | 248,8 | 223,1 | 294,9        | 277,7 | 251,0 | 224,4 | 283,6        | 270,5  | 248,6  | 224,2  |
| 11/dez | 0,5 | 185,0          | 173,2 | 152,5 | 128,3 | 186,4        | 175,0 | 155,0 | 131,2 | 178,7        | 164,2  | 139,4  | 111,5  |
|        | 0,6 | 221,1          | 209,0 | 187,4 | 161,5 | 226,2        | 212,9 | 190,7 | 166,1 | 221,2        | 201,1  | 170,3  | 139,9  |
|        | 0,7 | 243,0          | 229,7 | 207,5 | 182,8 | 242,1        | 232,2 | 214,3 | 192,0 | 240,4        | 226,3  | 202,6  | 176,4  |
|        | 0,8 | 270,1          | 253,5 | 228,1 | 202,8 | 274,3        | 259,3 | 235,4 | 210,7 | 259,0        | 250,3  | 234,2  | 214,0  |
| 21/dez | 0,5 | 184,8          | 165,9 | 137,2 | 109,4 | 185,6        | 171,6 | 147,5 | 120,0 | 166,4        | 152,7  | 129,8  | 104,3  |
|        | 0,6 | 202,2          | 189,5 | 168,4 | 144,9 | 202,0        | 190,7 | 170,6 | 146,6 | 200,2        | 185,8  | 160,9  | 132,2  |
|        | 0,7 | 225,8          | 213,3 | 192,5 | 169,4 | 227,0        | 217,2 | 199,5 | 177,7 | 221,0        | 209,2  | 188,2  | 162,8  |
|        | 0,8 | 249,2          | 236,7 | 215,7 | 192,4 | 246,6        | 237,1 | 219,9 | 198,4 | 244,2        | 232,6  | 213,3  | 191,9  |
| 31/dez | 0,5 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 155,1        | 141,6  | 119,1  | 94,1   |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 175,4        | 162,9  | 141,2  | 116,2  |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 205,6*       | 194,4* | 174,5* | 150,6* |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 229,5        | 217,1  | 197,5  | 177,0  |

<sup>1</sup>Datas de semeadura não recomendadas pelas Indicações técnicas para a cultura da soja no RS e SC.

APÊNDICE G – Estimativa da lâmina máxima de irrigação (mm) necessária à cultura da soja para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos São Pedro, Venda Grande, Alto das canas e Cerrito, sob quatro manejos de irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | M   | GM 5.9 – 6.8   |       |       |       | GM 6.9 – 7.3 |        |        |        | GM 7.4 – 8.0 |       |       |       |
|--------|-----|----------------|-------|-------|-------|--------------|--------|--------|--------|--------------|-------|-------|-------|
|        |     | 95%            | 90%   | 75%   | 50%   | 95%          | 90%    | 75%    | 50%    | 95%          | 90%   | 75%   | 50%   |
| 01/out | 0,5 | — <sup>1</sup> | —     | —     | —     | —            | —      | —      | —      | 258,5        | 239,3 | 207,2 | 171,6 |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | —            | —      | —      | —      | 300,4        | 285,7 | 259,5 | 227,5 |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | —            | —      | —      | —      | 339,0        | 317,2 | 282,9 | 247,8 |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | —            | —      | —      | —      | 350,9        | 333,2 | 305,6 | 277,7 |
| 11/out | 0,5 | —              | —     | —     | —     | 265,1        | 245,0  | 211,5  | 174,2  | 259,9        | 242,5 | 212,2 | 176,8 |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | 334,6        | 305,2  | 261,7  | 220,5  | 305,9        | 284,3 | 251,6 | 219,6 |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | 352,1        | 329,1  | 293,0  | 256,0  | 326,5        | 310,0 | 282,5 | 251,8 |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | 355,7        | 337,5  | 309,0  | 280,2  | 343,1        | 329,6 | 307,1 | 282,1 |
| 21/out | 0,5 | 285,7          | 255,3 | 209,3 | 165,0 | 294,3        | 260,7  | 212,8  | 169,9  | 262,2        | 238,7 | 202,5 | 166,8 |
|        | 0,6 | 302,8          | 278,7 | 242,7 | 208,1 | 309,8        | 287,1  | 253,0  | 219,8  | 284,8        | 266,1 | 237,5 | 209,3 |
|        | 0,7 | 332,8          | 309,4 | 274,0 | 239,4 | 338,2        | 315,5  | 280,8  | 246,8  | 320,8        | 304,3 | 276,9 | 246,4 |
|        | 0,8 | 339,8          | 322,4 | 295,3 | 267,9 | 346,4        | 330,6  | 305,7  | 280,2  | 338,7        | 324,6 | 301,0 | 274,8 |
| 01/nov | 0,5 | 273,8          | 243,5 | 200,1 | 160,9 | 270,6        | 242,5  | 201,9  | 164,7  | 245,7        | 222,1 | 186,1 | 150,8 |
|        | 0,6 | 289,5          | 267,9 | 235,4 | 203,8 | 299,5*       | 276,3* | 241,4* | 207,7* | 264,2        | 249,6 | 225,2 | 198,1 |
|        | 0,7 | 321,5          | 299,9 | 265,9 | 231,3 | 330,4        | 308,7  | 274,5  | 239,6  | 298,0        | 283,6 | 259,4 | 232,6 |
|        | 0,8 | 325,5          | 310,9 | 287,4 | 262,8 | 337,4        | 322,6  | 297,9  | 270,4  | 311,2        | 301,7 | 284,3 | 262,1 |
| 11/nov | 0,5 | 243,8          | 221,7 | 187,6 | 154,1 | 246,6        | 221,0  | 184,0  | 150,1  | 225,5        | 202,0 | 168,1 | 137,0 |
|        | 0,6 | 277,0          | 254,6 | 221,0 | 188,9 | 288,9        | 263,7  | 226,4  | 191,1  | 248,3        | 234,7 | 212,0 | 186,8 |
|        | 0,7 | 302,7          | 285,2 | 256,0 | 223,6 | 308,7        | 287,4  | 255,1  | 223,5  | 281,3        | 270,0 | 249,5 | 224,0 |
|        | 0,8 | 318,4          | 303,7 | 279,2 | 251,9 | 320,1        | 306,0  | 282,5  | 256,3  | 303,7        | 291,3 | 270,5 | 247,5 |
| 21/nov | 0,5 | 238,7          | 209,5 | 168,4 | 132,1 | 237,0        | 208,3  | 167,9  | 132,1  | 209,2        | 187,9 | 155,6 | 124,1 |
|        | 0,6 | 262,2          | 238,2 | 202,8 | 169,7 | 248,9        | 233,1  | 206,6  | 177,2  | 235,6        | 218,4 | 192,4 | 167,2 |
|        | 0,7 | 281,6          | 262,0 | 232,2 | 203,1 | 278,6        | 264,0  | 239,5  | 212,3  | 270,8        | 255,2 | 230,5 | 205,0 |
|        | 0,8 | 307,8          | 288,9 | 260,0 | 231,1 | 304,9        | 290,2  | 265,7  | 238,4  | 299,0        | 284,3 | 260,7 | 236,1 |
| 01/dez | 0,5 | 213,9          | 186,7 | 148,7 | 115,5 | 210,9        | 188,1  | 153,7  | 120,6  | 184,3        | 170,4 | 146,5 | 119,2 |
|        | 0,6 | 226,0          | 211,7 | 187,8 | 161,3 | 226,6        | 210,2  | 184,7  | 158,8  | 225,0        | 208,1 | 181,7 | 155,1 |
|        | 0,7 | 264,4          | 245,3 | 216,4 | 188,3 | 265,3        | 250,7  | 226,3  | 199,2  | 261,5        | 242,4 | 213,5 | 185,4 |
|        | 0,8 | 286,1          | 268,6 | 241,6 | 214,8 | 284,9        | 271,8  | 249,8  | 225,3  | 274,8        | 265,7 | 248,9 | 227,7 |
| 11/dez | 0,5 | 190,2          | 171,8 | 141,1 | 107,9 | 196,4        | 173,2  | 138,5  | 105,8  | 173,2        | 159,7 | 137,3 | 112,4 |
|        | 0,6 | 205,0          | 193,1 | 172,0 | 146,8 | 213,1        | 196,4  | 170,3  | 144,1  | 217,0        | 198,0 | 168,6 | 139,4 |
|        | 0,7 | 232,5          | 221,7 | 202,2 | 178,4 | 238,0        | 227,1  | 207,5  | 183,4  | 229,2        | 218,0 | 198,0 | 173,7 |
|        | 0,8 | 257,4          | 247,5 | 229,5 | 207,1 | 268,1        | 254,0  | 231,6  | 208,3  | 258,1        | 246,6 | 227,5 | 206,3 |
| 21/dez | 0,5 | 161,6          | 147,5 | 123,6 | 97,2  | 161,5        | 148,5  | 126,6  | 102,4  | 169,9        | 155,6 | 131,6 | 105,1 |
|        | 0,6 | 199,9          | 181,1 | 152,4 | 124,2 | 208,6        | 188,5  | 157,7  | 127,7  | 204,2        | 184,6 | 154,8 | 125,5 |
|        | 0,7 | 219,2          | 205,6 | 182,8 | 157,5 | 226,2        | 211,7  | 187,6  | 160,8  | 215,4        | 203,9 | 183,4 | 158,7 |
|        | 0,8 | 239,2          | 229,7 | 212,5 | 191,1 | 240,3        | 231,5  | 215,3  | 195,1  | 240,8        | 230,2 | 212,4 | 192,6 |
| 31/dez | 0,5 | —              | —     | —     | —     | —            | —      | —      | —      | 151,3        | 137,8 | 115,2 | 90,2  |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | —            | —      | —      | —      | 175,1        | 163,2 | 142,6 | 118,5 |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | —            | —      | —      | —      | 197,8        | 187,6 | 169,3 | 147,2 |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | —            | —      | —      | —      | 227,4        | 213,9 | 193,2 | 172,5 |

<sup>1</sup>Datas de semeadura não recomendadas pelas Indicações técnicas para a cultura da soja no RS e SC.

APÊNDICE H – Estimativa da lâmina máxima de irrigação (mm) necessária a cultura da soja para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos Santa Maria e Vacacaí, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | M   | GM 5.9 – 6.8   |       |       |       | GM 6.9 – 7.3 |       |       |       | GM 7.4 – 8.0 |        |        |        |
|--------|-----|----------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|--------------|--------|--------|--------|
|        |     | 95%            | 90%   | 75%   | 50%   | 95%          | 90%   | 75%   | 50%   | 95%          | 90%    | 75%    | 50%    |
| 01/out | 0,5 | — <sup>1</sup> | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 253,1*       | 223,9* | 180,1* | 138,4* |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 281,8        | 259,3  | 221,6  | 179,8  |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 342,2        | 314,7  | 271,9  | 229,1  |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 353,4        | 338,0  | 310,3  | 276,1  |
| 11/out | 0,5 | —              | —     | —     | —     | 275,8        | 241,2 | 189,9 | 141,9 | 287,3        | 243,0  | 183,6  | 134,6  |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | 311,5        | 278,8 | 229,2 | 181,3 | 288,9        | 266,5  | 229,1  | 187,6  |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | 361,5        | 329,7 | 282,8 | 238,5 | 338,4        | 316,9  | 281,0  | 241,1  |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | 354,5        | 339,7 | 312,9 | 279,7 | 354,1        | 336,8  | 307,7  | 275,5  |
| 21/out | 0,5 | 262,8          | 230,9 | 183,4 | 138,7 | 269,9        | 235,9 | 185,4 | 138,3 | 242,8        | 219,4  | 180,6  | 138,3  |
|        | 0,6 | 307,8          | 274,3 | 223,7 | 175,2 | 318,7        | 283,6 | 230,8 | 180,1 | 302,4        | 271,3  | 224,2  | 178,5  |
|        | 0,7 | 325,4          | 300,3 | 262,6 | 226,2 | 332,0        | 308,5 | 272,9 | 238,1 | 328,0        | 304,3  | 268,4  | 233,5  |
|        | 0,8 | 358,9          | 335,1 | 298,8 | 263,1 | 364,9        | 342,0 | 306,8 | 271,9 | 360,2        | 338,5  | 304,3  | 269,0  |
| 01/nov | 0,5 | 241,6          | 212,6 | 169,4 | 128,7 | 246,7        | 217,0 | 172,7 | 131,0 | 242,8        | 213,0  | 168,6  | 126,9  |
|        | 0,6 | 298,0          | 263,9 | 215,4 | 171,9 | 300,9        | 266,6 | 217,7 | 173,8 | 276,9        | 249,5  | 207,8  | 167,2  |
|        | 0,7 | 314,9          | 291,4 | 255,9 | 221,5 | 319,4        | 295,6 | 259,9 | 225,2 | 313,8        | 291,7  | 257,0  | 221,8  |
|        | 0,8 | 340,7          | 320,1 | 287,4 | 253,8 | 350,9        | 329,5 | 295,7 | 260,9 | 342,8        | 321,8  | 288,6  | 254,4  |
| 11/nov | 0,5 | 220,3          | 198,8 | 162,9 | 123,0 | 235,8        | 207,5 | 162,2 | 115,8 | 228,1        | 200,9  | 157,3  | 112,6  |
|        | 0,6 | 284,2          | 248,0 | 197,4 | 153,2 | 274,9        | 242,8 | 197,4 | 156,9 | 265,8        | 234,0  | 189,2  | 149,3  |
|        | 0,7 | 299,7          | 275,8 | 240,0 | 205,7 | 308,5        | 282,3 | 243,3 | 206,3 | 299,6        | 274,2  | 236,4  | 200,5  |
|        | 0,8 | 328,2          | 305,6 | 271,4 | 237,8 | 335,7        | 313,9 | 279,7 | 244,6 | 328,6        | 307,9  | 275,4  | 242,0  |
| 21/nov | 0,5 | 209,3          | 183,8 | 143,1 | 101,6 | 212,6        | 185,8 | 143,4 | 100,7 | 201,0        | 177,9  | 140,6  | 102,0  |
|        | 0,6 | 254,2          | 221,5 | 176,0 | 136,3 | 246,9        | 216,9 | 174,8 | 137,5 | 237,2        | 211,7  | 173,2  | 136,2  |
|        | 0,7 | 278,6          | 256,1 | 221,3 | 186,5 | 277,7        | 255,8 | 221,7 | 187,5 | 264,1        | 243,6  | 212,9  | 183,3  |
|        | 0,8 | 308,2          | 285,9 | 252,1 | 219,3 | 306,2        | 289,7 | 262,2 | 231,5 | 300,8        | 287,3  | 263,0  | 233,0  |
| 01/dez | 0,5 | 220,2          | 184,3 | 133,1 | 88,3  | 200,2        | 171,6 | 130,0 | 92,2  | 180,4        | 160,1  | 127,2  | 92,8   |
|        | 0,6 | 224,8          | 195,9 | 155,7 | 120,6 | 241,8        | 208,8 | 163,5 | 124,6 | 242,1        | 208,9  | 163,2  | 124,1  |
|        | 0,7 | 243,3          | 229,4 | 204,7 | 175,3 | 244,2        | 226,7 | 199,5 | 171,8 | 251,3        | 230,3  | 199,0  | 169,2  |
|        | 0,8 | 276,1          | 263,4 | 240,6 | 212,5 | 286,3        | 270,7 | 244,5 | 215,5 | 290,1        | 275,3  | 248,8  | 216,7  |
| 11/dez | 0,5 | 171,9          | 152,5 | 121,2 | 88,5  | 176,5        | 152,7 | 117,6 | 85,4  | 165,9        | 146,7  | 115,7  | 83,6   |
|        | 0,6 | 219,2          | 187,4 | 144,1 | 107,7 | 201,0        | 183,7 | 154,7 | 122,5 | 190,3        | 175,1  | 149,1  | 119,7  |
|        | 0,7 | 232,7          | 211,5 | 180,3 | 151,0 | 232,2        | 213,8 | 185,3 | 156,7 | 238,1        | 217,1  | 184,8  | 152,9  |
|        | 0,8 | 265,4          | 247,3 | 218,9 | 189,9 | 264,9        | 252,1 | 229,2 | 201,2 | 269,8        | 253,9  | 227,5  | 198,0  |
| 21/dez | 0,5 | 159,3          | 137,9 | 104,4 | 71,4  | 153,4        | 137,4 | 110,8 | 81,2  | 164,7        | 139,6  | 103,4  | 71,1   |
|        | 0,6 | 177,9          | 161,9 | 135,0 | 105,3 | 176,4        | 161,1 | 135,6 | 107,2 | 180,9        | 165,0  | 138,3  | 108,7  |
|        | 0,7 | 223,4          | 199,1 | 164,2 | 132,6 | 226,2        | 205,0 | 172,5 | 140,7 | 225,7        | 203,8  | 170,3  | 137,6  |
|        | 0,8 | 241,2          | 228,6 | 206,2 | 179,1 | 250,6        | 237,6 | 214,4 | 186,3 | 246,2        | 233,6  | 211,2  | 184,0  |
| 31/dez | 0,5 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 126,0        | 114,4  | 95,0   | 73,5   |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 172,6        | 156,2  | 128,8  | 99,0   |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 190,8        | 177,1  | 153,5  | 126,2  |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 220,5        | 209,6  | 190,1  | 166,4  |

<sup>1</sup>Datas de semeadura não recomendadas pelas Indicações técnicas para a cultura da soja no RS e SC.

APÊNDICE I – Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) e seus parâmetros, selecionadas para determinar o número de irrigações, para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, para os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | M   | GM 5.9 – 6.8    |                |                | GM 6.9 – 7.3 |                |                | GM 7.4 – 8.0 |                |                |
|--------|-----|-----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
|        |     | Fdp             | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> | Fdp          | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> | Fdp          | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> |
| 01/out | 0,5 | — <sup>II</sup> | —              | —              | —            | —              | —              | N            | 9,1591         | 2,449          |
|        | 0,6 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 4,8843         | 14,5077        |
|        | 0,7 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | SA           |                |                |
|        | 0,8 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | N            | 29,000         | 5,0945         |
| 11/out | 0,5 | —               | —              | —              | N            | 9,6136         | 2,4798         | G            | 15,4158        | 0,6221         |
|        | 0,6 | —               | —              | —              | W            | 4,9234         | 15,0856        | W            | 4,8008         | 14,9734        |
|        | 0,7 | —               | —              | —              | N            | 19,2045        | 3,1147         | W            | 7,2921         | 20,5701        |
|        | 0,8 | —               | —              | —              | LGN          | 3,3819         | 0,1549         | LGN          | 3,3865         | 0,1600         |
| 21/out | 0,5 | LGN             | 2,2171         | 0,223          | SA           |                |                | LGN          | 2,2568         | 0,2241         |
|        | 0,6 | N               | 13,0682        | 2,782          | N            | 13,500         | 2,7661         | LGN          | 2,5861         | 0,2122         |
|        | 0,7 | W               | 6,9464         | 19,7809        | W            | 6,9526         | 20,5773        | W            | 7,2669         | 20,7949        |
|        | 0,8 | LGN             | 3,3530         | 0,1555         | LGN          | 3,3902         | 0,1493         | LGN          | 3,3826         | 0,1495         |
| 01/nov | 0,5 | LGN             | 0,2331         | 2,1825         | LGN          | 2,1984         | 0,2546         | N            | 9,2273         | 2,3214         |
|        | 0,6 | N               | 13,000         | 2,3918         | W            | 6,0528         | 14,5553        | W            | 6,0152         | 14,4683        |
|        | 0,7 | W               | 7,2806         | 19,5978        | W            | 7,2339         | 20,288         | N            | 19,1136        | 3,0744         |
|        | 0,8 | SA              |                |                | LGN          | 3,3553         | 0,1609         | SA           |                |                |
| 11/nov | 0,5 | SA              |                |                | N            | 8,9545         | 2,0455         | N            | 9,02273        | 2,17265        |
|        | 0,6 | N               | 12,5682        | 2,5095         | N            | 13,000         | 2,4965         | W            | 6,1753         | 14,1319        |
|        | 0,7 | N               | 17,7273        | 2,7817         | N            | 18,1818        | 3,0899         | N            | 18,4545        | 3,1583         |
|        | 0,8 | LGN             | 3,3181         | 0,1684         | SA           |                |                | SA           |                |                |
| 21/nov | 0,5 | N               | 7,9773         | 2,1726         | N            | 8,2273         | 2,1444         | W            | 4,5339         | 8,9903         |
|        | 0,6 | N               | 11,7273        | 2,182          | LGN          | 2,4790         | 0,1883         | G            | 28,1121        | 0,4358         |
|        | 0,7 | G               | 35,910         | 0,4607         | N            | 17,2500        | 2,9737         | LGN          | 2,8418         | 0,1693         |
|        | 0,8 | LGN             | 3,2678         | 0,194          | G            | 32,7633        | 0,8338         | SA           |                |                |
| 01/dez | 0,5 | SA              |                |                | SA           |                |                | G            | 15,2033        | 0,4948         |
|        | 0,6 | LGN             | 2,3848         | 0,1881         | G            | 23,8336        | 0,4797         | W            | 5,5918         | 12,5887        |
|        | 0,7 | SA              |                |                | W            | 6,4008         | 17,4154        | W            | 6,8286         | 17,8789        |
|        | 0,8 | LGN             | 3,2227         | 0,1741         | LGN          | 3,2429         | 0,1701         | LGN          | 3,2658         | 0,1627         |
| 11/dez | 0,5 | SA              |                |                | N            | 6,8409         | 1,867          | N            | 6,9318         | 2,1717         |
|        | 0,6 | W               | 4,9474         | 10,9954        | W            | 5,2905         | 11,4998        | N            | 10,6818        | 2,2801         |
|        | 0,7 | N               | 14,5682        | 2,7987         | N            | 15,2045        | 2,8085         | W            | 6,5453         | 16,7151        |
|        | 0,8 | LGN             | 3,1471         | 0,1852         | G            | 33,7246        | 0,7278         | W            | 6,9033         | 26,2995        |
| 21/dez | 0,5 | LGN             | 1,7412         | 0,3377         | LGN          | 1,8013         | 0,3221         | LGN          | 1,8169         | 0,3045         |
|        | 0,6 | SA              |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | 0,7 | SA              |                |                | W            | 5,9728         | 15,220         | W            | 6,3374         | 15,4296        |
|        | 0,8 | N               | 22,4091        | 4,3419         | G            | 32,5434        | 0,7047         | N            | 23,3409        | 3,7723         |
| 31/dez | 0,5 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | N            | 5,5227         | 1,7319         |
|        | 0,6 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 4,675          | 9,4081         |
|        | 0,7 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | G            | 27,6856        | 0,4745         |
|        | 0,8 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | LGN          | 3,0553         | 0,1797         |

<sup>I</sup>Os parâmetros das Fdp lognormal (LGN), gama (G), Weibull (W) são denominados "escalar" e "de forma", ao invés de média e desvio-padrão, como os parâmetros da função normal (N), Sem ajuste (SA).

<sup>II</sup>Datas de semeadura não recomendadas pelas Indicações técnicas para a cultura da soja no RS e SC.

APÊNDICE J – Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) e seus parâmetros, selecionadas para determinar o número de irrigações, para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, para os solos Alto das Canas, São Pedro, Venda Grande e Cerrito, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | M   | GM 5.9 – 6.8    |                |                | GM 6.9 – 7.3 |                |                | GM 7.4 – 8.0 |                |                |
|--------|-----|-----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
|        |     | Fdp             | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> | Fdp          | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> | Fdp          | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> |
| 01/out | 0,5 | — <sup>II</sup> | —              | —              | —            | —              | —              | N            | 6,2955         | 2,1736         |
|        | 0,6 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 4,0748         | 10,9563        |
|        | 0,7 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 5,2636         | 16,5967        |
|        | 0,8 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | G            | 33,1098        | 0,7173         |
| 11/out | 0,5 | —               | —              | —              | N            | 6,4545         | 2,1616         | N            | 6,4773         | 2,1619         |
|        | 0,6 | —               | —              | —              | N            | 10,5455        | 2,7573         | W            | 4,3789         | 11,5342        |
|        | 0,7 | —               | —              | —              | W            | 5,7035         | 16,9443        | W            | 5,8485         | 16,8741        |
|        | 0,8 | —               | —              | —              | N            | 24,3409        | 3,6020         | N            | 24,5909        | 3,6044         |
| 21/out | 0,5 | G               | 8,7250         | 0,7554         | G            | 9,7238         | 0,7035         | N            | 6,8864         | 2,0710         |
|        | 0,6 | SA              |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | 0,7 | G               | 28,9428        | 0,5136         | G            | 29,6604        | 0,5142         | N            | 15,2500        | 2,9264         |
|        | 0,8 | LGN             | 3,1524         | 0,1384         | N            | 24,5455        | 3,1803         | N            | 24,6364        | 3,1995         |
| 01/nov | 0,5 | G               | 11,2262        | 0,5932         | LGN          | 1,8766         | 0,2886         | SA           |                |                |
|        | 0,6 | SA              |                |                | SA           |                |                | W            | 5,3901         | 11,1812        |
|        | 0,7 | G               | 22,8783        | 0,6407         | N            | 15,2273        | 3,0641         | W            | 5,6804         | 16,6975        |
|        | 0,8 | SA              |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
| 11/nov | 0,5 | SA              |                |                | LGN          | 1,8374         | 0,2672         | LGN          | 1,8214         | 0,2875         |
|        | 0,6 | SA              |                |                | N            | 9,8864         | 2,2331         | SA           |                |                |
|        | 0,7 | N               | 14,2273        | 2,8924         | SA           |                |                | G            | 33,4205        | 0,4461         |
|        | 0,8 | LGN             | 0,1637         | 3,1244         | LGN          | 3,1569         | 0,1487         | N            | 24,0455        | 3,5500         |
| 21/nov | 0,5 | LGN             | 1,7118         | 0,3287         | SA           |                |                | LGN          | 1,7113         | 0,3301         |
|        | 0,6 | SA              |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | 0,7 | N               | 13,3182        | 2,3701         | G            | 33,2424        | 0,4170         | N            | 14,2045        | 2,4644         |
|        | 0,8 | LGN             | 3,0754         | 0,1789         | G            | 33,0623        | 0,6840         | N            | 23,1364        | 3,7016         |
| 01/dez | 0,5 | SA              |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | 0,6 | W               | 4,9246         | 9,0033         | W            | 5,2715         | 9,1950         | N            | 8,7045         | 1,9239         |
|        | 0,7 | SA              |                |                | W            | 6,4670         | 14,2290        | W            | 6,7991         | 14,4405        |
|        | 0,8 | N               | 21,0455        | 3,5696         | W            | 6,8713         | 23,5041        | N            | 22,3864        | 3,7678         |
| 11/dez | 0,5 | W               | 2,7985         | 5,3484         | W            | 2,9846         | 5,4575         | SA           |                |                |
|        | 0,6 | N               | 7,7045         | 1,8625         | W            | 4,6740         | 8,5556         | SA           |                |                |
|        | 0,7 | W               | 5,9133         | 12,6308        | W            | 6,1125         | 13,1201        | N            | 12,2955        | 2,5019         |
|        | 0,8 | W               | 6,8443         | 21,5298        | N            | 20,7727        | 3,4766         | W            | 7,1940         | 22,5830        |
| 21/dez | 0,5 | SA              |                |                | G            | 7,1521         | 0,6292         | SA           |                |                |
|        | 0,6 | SA              |                |                | G            | 10,6475        | 0,6681         | G            | 10,2011        | 0,7107         |
|        | 0,7 | N               | 10,6818        | 2,4663         | N            | 10,9545        | 2,6233         | N            | 11,2045        | 2,6288         |
|        | 0,8 | N               | 18,7045        | 3,7141         | W            | 6,1318         | 20,3693        | W            | 6,2557         | 20,7544        |
| 31/dez | 0,5 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | SA           |                |                |
|        | 0,6 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | SA           |                |                |
|        | 0,7 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | N            | 10,3636        | 2,5251         |
|        | 0,8 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | LGN          | 2,8734         | 0,1783         |

<sup>I</sup>Os parâmetros das Fdp lognormal (LN), gama (G), Weibull (W) são denominados "escalar" e "de forma", ao invés de média e desvio-padrão, como os parâmetros da função normal (N), sem ajuste (SA). <sup>II</sup>Datas de semeadura não recomendadas pelas Indicações técnicas para a cultura da soja no RS e SC.

APÊNDICE K – Funções de distribuição de probabilidades (Fdp) e seus parâmetros, selecionadas para determinar o número de irrigações, para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, para os solos Santa Maria e Vacacaí, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | M   | GM 5.9 – 6.8    |                |                | GM 6.9 – 7.3 |                |                | GM 7.4 – 8.0 |                |                |
|--------|-----|-----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
|        |     | Fdp             | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> | Fdp          | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> | Fdp          | a <sup>I</sup> | b <sup>I</sup> |
| 01/out | 0,5 | — <sup>II</sup> | —              | —              | —            | —              | —              | G            | 5,1063         | 0,7196         |
|        | 0,6 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | N            | 5,8864         | 2,1482         |
|        | 0,7 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 3,9316         | 10,9285        |
|        | 0,8 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 6,0962         | 18,2048        |
| 11/out | 0,5 | —               | —              | —              | G            | 4,5561         | 0,8580         | W            | 2,3378         | 4,3714         |
|        | 0,6 | —               | —              | —              | N            | 6,1136         | 2,1590         | SA           |                |                |
|        | 0,7 | —               | —              | —              | G            | 14,4403        | 0,7334         | N            | 10,5455        | 2,7233         |
|        | 0,8 | —               | —              | —              | W            | 6,7777         | 18,2500        | W            | 6,8580         | 18,4619        |
| 21/out | 0,5 | SA              |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | 0,6 | SA              |                |                | W            | 3,0503         | 7,0233         | SA           |                |                |
|        | 0,7 | SA              |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | 0,8 | SA              |                |                | N            | 17,3182        | 2,9474         | N            | 17,4318        | 3,0606         |
| 01/nov | 0,5 | SA              |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | 0,6 | SA              |                |                | SA           |                |                | LGN          | 1,7665         | 0,3236         |
|        | 0,7 | SA              |                |                | SA           |                |                | W            | 5,5482         | 11,2663        |
|        | 0,8 | N               | 16,4318        | 3,0070         | W            | 6,4688         | 18,1570        | SA           |                |                |
| 11/nov | 0,5 | SA              |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | 0,6 | W               | 3,4833         | 6,5204         | G            | 10,3386        | 0,5825         | SA           |                |                |
|        | 0,7 | W               | 5,1365         | 10,5023        | N            | 9,8636         | 2,1844         | N            | 9,8864         | 2,1804         |
|        | 0,8 | G               | 33,4385        | 0,4751         | N            | 16,4318        | 2,9206         | N            | 16,6818        | 2,8511         |
| 21/nov | 0,5 | SA              |                |                | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | 0,6 | LGN             | 1,5968         | 0,3543         | SA           |                |                | LGN          | 1,6280         | 0,3500         |
|        | 0,7 | N               | 8,8636         | 2,2056         | N            | 9,0000         | 2,1458         | SA           |                |                |
|        | 0,8 | G               | 33,3903        | 0,4458         | SA           |                |                | SA           |                |                |
| 01/dez | 0,5 | SA              |                |                | SA           |                |                | G            | 5,5517         | 0,5613         |
|        | 0,6 | W               | 3,3450         | 5,3667         | W            | 3,2712         | 5,6564         | SA           |                |                |
|        | 0,7 | W               | 4,9539         | 9,0263         | W            | 5,3372         | 9,2116         | N            | 8,7045         | 1,9239         |
|        | 0,8 | W               | 6,4798         | 15,2092        | W            | 6,1596         | 15,9896        | N            | 15,2955        | 3,0238         |
| 11/dez | 0,5 | G               | 5,0258         | 0,5581         | LGN          | 0,9494         | 0,4873         | W            | 2,3992         | 3,2299         |
|        | 0,6 | W               | 2,9036         | 4,9308         | SA           |                |                | SA           |                |                |
|        | 0,7 | N               | 7,6591         | 1,9040         | W            | 4,7500         | 8,6235         | SA           |                |                |
|        | 0,8 | W               | 5,8858         | 14,3281        | SA           |                |                | W            | 5,6652         | 15,2681        |
| 21/dez | 0,5 | W               | 2,0699         | 2,7544         | G            | 3,9921         | 0,6415         | SA           |                |                |
|        | 0,6 | G               | 5,8336         | 0,7013         | N            | 4,1364         | 1,6367         | SA           |                |                |
|        | 0,7 | G               | 11,3105        | 0,6068         | N            | 7,1818         | 2,0717         | G            | 10,4781        | 0,6919         |
|        | 0,8 | W               | 5,1939         | 13,4018        | N            | 12,7727        | 2,9795         | W            | 5,1772         | 14,0720        |
| 31/dez | 0,5 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | SA           |                |                |
|        | 0,6 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | SA           |                |                |
|        | 0,7 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | SA           |                |                |
|        | 0,8 | —               | —              | —              | —            | —              | —              | W            | 5,1532         | 12,6329        |

<sup>I</sup>Os parâmetros das Fdp lognormal (LGN), gama (G), Weibull (W) são denominados "escalar" e "de forma", ao invés de média e desvio-padrão, como os parâmetros da função normal (N).

<sup>II</sup>Datas de semeadura não recomendadas pelas Indicações técnicas para a cultura da soja no RS e SC.

APÊNDICE L – Estimativa do número de irrigações à cultura da soja para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos Charrua, Ciriaco, Guassupi, Júlio de Castilhos e Alto das canas, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | M   | GM 5.9 – 6.8   |       |       |       | GM 6.9 – 7.3 |       |       |       | GM 7.4 – 8.0 |       |       |       |
|--------|-----|----------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
|        |     | 95%            | 90%   | 75%   | 50%   | 95%          | 90%   | 75%   | 50%   | 95%          | 90%   | 75%   | 50%   |
| 01/out | 0,5 | — <sup>I</sup> | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 9,9          | 9,1   | 7,8   | 6,3   |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 14,3         | 13,4  | 11,9  | 10,0  |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 20,4         | 19,4  | 17,7  | 15,5  |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 30,9         | 29,2  | 26,4  | 23,5  |
| 11/out | 0,5 | —              | —     | —     | —     | 10,0         | 9,2   | 7,9   | 6,5   | 10,0         | 9,2   | 7,9   | 6,5   |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | 15,1         | 14,1  | 12,4  | 10,5  | 14,8         | 14,0  | 12,4  | 10,6  |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | 20,5         | 19,6  | 17,9  | 15,9  | 20,4         | 19,5  | 17,8  | 15,8  |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | 30,3         | 29,0  | 26,8  | 24,3  | 30,5         | 29,2  | 27,0  | 24,6  |
| 21/out | 0,5 | 10,6           | 9,6   | 7,9   | 6,3   | 10,8         | 9,8   | 8,2   | 6,6   | 10,3         | 9,5   | 8,3   | 6,9   |
|        | 0,6 | 13,9*          | 12,8* | 11,2* | 9,7*  | 14,3*        | 13,3* | 11,7* | 10,2* | 14,4*        | 13,4* | 11,8* | 10,4* |
|        | 0,7 | 19,7           | 18,5  | 16,6  | 14,7  | 20,1         | 18,9  | 17,0  | 15,1  | 20,1         | 19,0  | 17,2  | 15,3  |
|        | 0,8 | 29,4           | 27,9  | 25,7  | 23,4  | 29,8         | 28,6  | 26,7  | 24,5  | 29,9         | 28,7  | 26,8  | 24,6  |
| 01/nov | 0,5 | 10,2           | 9,3   | 7,9   | 6,5   | 10,5         | 9,5   | 7,9   | 6,5   | 10,4*        | 9,4*  | 8,0*  | 6,6*  |
|        | 0,6 | 13,9*          | 12,9* | 11,4* | 9,9*  | 14,2*        | 13,2* | 11,7* | 10,2* | 13,7         | 13,1  | 11,9  | 10,4  |
|        | 0,7 | 20,0           | 18,7  | 16,6  | 14,4  | 20,3         | 19,2  | 17,3  | 15,2  | 20,3         | 19,3  | 17,7  | 15,7  |
|        | 0,8 | 29,1*          | 27,*  | 25,9* | 23,6* | 29,7*        | 28,7* | 26,8* | 24,4* | 30,1*        | 29,0* | 27,0* | 24,4* |
| 11/nov | 0,5 | 9,7*           | 8,8*  | 7,5*  | 6,3*  | 9,7          | 8,8   | 7,5   | 6,3   | 9,9          | 8,9   | 7,5   | 6,2   |
|        | 0,6 | 12,9*          | 12,3* | 11,1* | 9,7*  | 13,6         | 12,7  | 11,4  | 9,9   | 13,9         | 12,8  | 11,3  | 9,6   |
|        | 0,7 | 19,0           | 17,9  | 16,2  | 14,2  | 19,1*        | 18,1* | 16,5* | 14,7* | 19,4         | 18,3  | 16,6  | 14,8  |
|        | 0,8 | 29,8           | 28,1  | 25,4  | 22,7  | 30,0         | 28,4  | 26,0  | 23,5  | 29,9         | 28,6  | 26,4  | 24,0  |
| 21/nov | 0,5 | 9,5            | 8,5   | 6,9   | 5,5   | 9,5*         | 8,5*  | 7,0*  | 5,6*  | 9,5          | 8,5   | 6,9   | 5,5   |
|        | 0,6 | 12,4*          | 11,6* | 10,3* | 8,8*  | 12,3*        | 11,6* | 10,5* | 9,1*  | 12,3*        | 11,6* | 10,4* | 9,1*  |
|        | 0,7 | 17,2           | 16,4  | 14,9  | 13,3  | 18,0         | 17,0  | 15,4  | 13,7  | 18,3         | 17,4  | 15,9  | 14,2  |
|        | 0,8 | 29,1           | 27,2  | 24,4  | 21,7  | 29,4         | 27,8  | 25,1  | 22,4  | 29,2         | 27,9  | 25,6  | 23,1  |
| 01/dez | 0,5 | 8,1*           | 7,5*  | 6,5*  | 5,3*  | 8,8*         | 7,9*  | 6,6*  | 5,2*  | 8,6*         | 8,0*  | 6,8*  | 5,5*  |
|        | 0,6 | 11,3           | 10,7  | 9,6   | 8,4   | 11,3         | 10,8  | 9,8   | 8,6   | 11,9         | 11,2  | 10,0  | 8,7   |
|        | 0,7 | 16,7*          | 15,7* | 14,1* | 12,5* | 16,9         | 16,2  | 15,0  | 13,4  | 17,0         | 16,3  | 15,2  | 13,7  |
|        | 0,8 | 26,9           | 25,6  | 23,5  | 21,0  | 27,6         | 26,5  | 24,6  | 22,3  | 28,6         | 27,2  | 24,9  | 22,4  |
| 11/dez | 0,5 | 7,9            | 7,2   | 6,0   | 4,7   | 7,9          | 7,2   | 6,1   | 4,8   | 7,9*         | 7,3*  | 6,2*  | 5,0*  |
|        | 0,6 | 10,8           | 10,1  | 9,0   | 7,7   | 10,8         | 10,2  | 9,2   | 7,9   | 11,4*        | 10,7* | 9,3*  | 7,9*  |
|        | 0,7 | 15,2           | 14,5  | 13,3  | 11,9  | 15,7         | 15,0  | 13,8  | 12,4  | 16,4         | 15,5  | 14,0  | 12,3  |
|        | 0,8 | 25,3           | 24,3  | 22,6  | 20,4  | 26,5         | 25,2  | 23,1  | 20,8  | 26,3         | 25,4  | 23,6  | 21,5  |
| 21/dez | 0,5 | 7,5*           | 6,6*  | 5,3*  | 4,1*  | 7,6          | 6,7   | 5,5   | 4,3   | 8,7          | 7,4   | 5,8   | 4,3   |
|        | 0,6 | 11,0*          | 9,8*  | 8,1*  | 6,6*  | 11,0         | 10,0  | 8,4   | 6,9   | 11,3         | 10,3  | 8,6   | 7,0   |
|        | 0,7 | 14,7           | 13,8  | 12,3  | 10,7  | 15,3         | 14,3  | 12,7  | 11,0  | 15,5         | 14,6  | 13,0  | 11,2  |
|        | 0,8 | 24,8           | 23,5  | 21,2  | 18,7  | 24,4         | 23,3  | 21,5  | 19,2  | 24,7         | 23,7  | 21,9  | 19,6  |
| 31/dez | 0,5 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 7,2*         | 6,3*  | 5,1*  | 3,9*  |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 9,4*         | 8,8*  | 7,6*  | 6,3*  |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 14,5         | 13,6  | 12,1  | 10,4  |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 23,7         | 22,2  | 20,0  | 17,7  |

\*A probabilidade para DS sem ajuste de Fdp (SA) foram determinadas pela distribuição empírica.

<sup>II</sup>Datas de semeadura não recomendadas pelas Indicações técnicas para a cultura da soja no RS e SC.

APÊNDICE M – Estimativa do número de irrigações à cultura da soja para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos São Pedro, Venda Grande, Alto das canas e Cerrito, sob quatro manejos de irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | M   | GM 5.9 – 6.8   |       |       |       | GM 6.9 – 7.3 |       |       |       | GM 7.4 – 8.0 |       |       |       |
|--------|-----|----------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
|        |     | 95%            | 90%   | 75%   | 50%   | 95%          | 90%   | 75%   | 50%   | 95%          | 90%   | 75%   | 50%   |
| 01/out | 0,5 | — <sup>1</sup> | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 9,9          | 9,1   | 7,8   | 6,3   |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 14,3         | 13,4  | 11,9  | 10,0  |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 20,4         | 19,4  | 17,7  | 15,5  |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 30,9         | 29,2  | 26,4  | 23,5  |
| 11/out | 0,5 | —              | —     | —     | —     | 10,0         | 9,2   | 7,9   | 6,5   | 10,0         | 9,2   | 7,9   | 6,5   |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | 15,1         | 14,1  | 12,4  | 10,5  | 14,8         | 14,0  | 12,4  | 10,6  |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | 20,5         | 19,6  | 17,9  | 15,9  | 20,4         | 19,5  | 17,8  | 15,8  |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | 30,3         | 29,0  | 26,8  | 24,3  | 30,5         | 29,2  | 27,0  | 24,6  |
| 21/out | 0,5 | 10,6           | 9,6   | 7,9   | 6,3   | 10,8         | 9,8   | 8,2   | 6,6   | 10,3         | 9,5   | 8,3   | 6,9   |
|        | 0,6 | 13,9*          | 12,8* | 11,2* | 9,7*  | 14,3*        | 13,3* | 11,7* | 10,2* | 14,4*        | 13,4* | 11,8* | 10,4* |
|        | 0,7 | 19,7           | 18,5  | 16,6  | 14,7  | 20,1         | 18,9  | 17,0  | 15,1  | 20,1         | 19,0  | 17,2  | 15,3  |
|        | 0,8 | 29,4           | 27,9  | 25,7  | 23,4  | 29,8         | 28,6  | 26,7  | 24,5  | 29,9         | 28,7  | 26,8  | 24,6  |
| 01/nov | 0,5 | 10,2           | 9,3   | 7,9   | 6,5   | 10,5         | 9,5   | 7,9   | 6,5   | 10,4*        | 9,4*  | 8,0*  | 6,6*  |
|        | 0,6 | 13,9*          | 12,9* | 11,4* | 9,9*  | 14,2*        | 13,2* | 11,7* | 10,2* | 13,7         | 13,1  | 11,9  | 10,4  |
|        | 0,7 | 20,0           | 18,7  | 16,6  | 14,4  | 20,3         | 19,2  | 17,3  | 15,2  | 20,3         | 19,3  | 17,7  | 15,7  |
|        | 0,8 | 29,1*          | 27,*  | 25,9* | 23,6* | 29,7*        | 28,7* | 26,8* | 24,4* | 30,1*        | 29,0* | 27,0* | 24,4* |
| 11/nov | 0,5 | 9,7*           | 8,8*  | 7,5*  | 6,3*  | 9,7          | 8,8   | 7,5   | 6,3   | 9,9          | 8,9   | 7,5   | 6,2   |
|        | 0,6 | 12,9*          | 12,3* | 11,1* | 9,7*  | 13,6         | 12,7  | 11,4  | 9,9   | 13,9         | 12,8  | 11,3  | 9,6   |
|        | 0,7 | 19,0           | 17,9  | 16,2  | 14,2  | 19,1*        | 18,1* | 16,5* | 14,7* | 19,4         | 18,3  | 16,6  | 14,8  |
|        | 0,8 | 29,8           | 28,1  | 25,4  | 22,7  | 30,0         | 28,4  | 26,0  | 23,5  | 29,9         | 28,6  | 26,4  | 24,0  |
| 21/nov | 0,5 | 9,5            | 8,5   | 6,9   | 5,5   | 9,5*         | 8,5*  | 7,0*  | 5,6*  | 9,5          | 8,5   | 6,9   | 5,5   |
|        | 0,6 | 12,4*          | 11,6* | 10,3* | 8,8*  | 12,3*        | 11,6* | 10,5* | 9,1*  | 12,3*        | 11,6* | 10,4* | 9,1*  |
|        | 0,7 | 17,2           | 16,4  | 14,9  | 13,3  | 18,0         | 17,0  | 15,4  | 13,7  | 18,3         | 17,4  | 15,9  | 14,2  |
|        | 0,8 | 29,1           | 27,2  | 24,4  | 21,7  | 29,4         | 27,8  | 25,1  | 22,4  | 29,2         | 27,9  | 25,6  | 23,1  |
| 01/dez | 0,5 | 8,1*           | 7,5*  | 6,5*  | 5,3*  | 8,8*         | 7,9*  | 6,6*  | 5,2*  | 8,6*         | 8,0*  | 6,8*  | 5,5*  |
|        | 0,6 | 11,3           | 10,7  | 9,6   | 8,4   | 11,3         | 10,8  | 9,8   | 8,6   | 11,9         | 11,2  | 10,0  | 8,7   |
|        | 0,7 | 16,7*          | 15,7* | 14,1* | 12,5* | 16,9         | 16,2  | 15,0  | 13,4  | 17,0         | 16,3  | 15,2  | 13,7  |
|        | 0,8 | 26,9           | 25,6  | 23,5  | 21,0  | 27,6         | 26,5  | 24,6  | 22,3  | 28,6         | 27,2  | 24,9  | 22,4  |
| 11/dez | 0,5 | 7,9            | 7,2   | 6,0   | 4,7   | 7,9          | 7,2   | 6,1   | 4,8   | 7,9*         | 7,3*  | 6,2*  | 5,0*  |
|        | 0,6 | 10,8           | 10,1  | 9,0   | 7,7   | 10,8         | 10,2  | 9,2   | 7,9   | 11,4*        | 10,7* | 9,3*  | 7,9*  |
|        | 0,7 | 15,2           | 14,5  | 13,3  | 11,9  | 15,7         | 15,0  | 13,8  | 12,4  | 16,4         | 15,5  | 14,0  | 12,3  |
|        | 0,8 | 25,3           | 24,3  | 22,6  | 20,4  | 26,5         | 25,2  | 23,1  | 20,8  | 26,3         | 25,4  | 23,6  | 21,5  |
| 21/dez | 0,5 | 7,5*           | 6,6*  | 5,3*  | 4,1*  | 7,6          | 6,7   | 5,5   | 4,3   | 8,7          | 7,4   | 5,8   | 4,3   |
|        | 0,6 | 11,0*          | 9,8*  | 8,1*  | 6,6*  | 11,0         | 10,0  | 8,4   | 6,9   | 11,3         | 10,3  | 8,6   | 7,0   |
|        | 0,7 | 14,7           | 13,8  | 12,3  | 10,7  | 15,3         | 14,3  | 12,7  | 11,0  | 15,5         | 14,6  | 13,0  | 11,2  |
|        | 0,8 | 24,8           | 23,5  | 21,2  | 18,7  | 24,4         | 23,3  | 21,5  | 19,2  | 24,7         | 23,7  | 21,9  | 19,6  |
| 31/dez | 0,5 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 7,2*         | 6,3*  | 5,1*  | 3,9*  |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 9,4*         | 8,8*  | 7,6*  | 6,3*  |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 14,5         | 13,6  | 12,1  | 10,4  |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 23,7         | 22,2  | 20,0  | 17,7  |

\*A probabilidade para DS sem ajuste de Fdp (SA) foram determinadas pela distribuição empírica. <sup>1</sup>Datas de semeadura não recomendadas pelas Indicações técnicas para a cultura da soja no RS e SC.

APÊNDICE N – Estimativa do número de irrigações a cultura da soja para a cultura da soja nos grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos Santa Maria e Vacacaí, sob quatro manejos irrigação (M), em diferentes datas de semeadura (DS), simuladas em cada ano do período de 1968-2012. Santa Maria, RS, 2013.

| DS     | M   | GM 5.9 – 6.8   |       |       |       | GM 6.9 – 7.3 |       |       |       | GM 7.4 – 8.0 |       |       |       |
|--------|-----|----------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
|        |     | 95%            | 90%   | 75%   | 50%   | 95%          | 90%   | 75%   | 50%   | 95%          | 90%   | 75%   | 50%   |
| 01/out | 0,5 | — <sup>1</sup> | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 6,7          | 5,9   | 4,6   | 3,4   |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 9,4          | 8,6   | 7,3   | 5,9   |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 14,4         | 13,5  | 11,9  | 10,0  |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 21,8         | 20,9  | 19,2  | 17,1  |
| 11/out | 0,5 | —              | —     | —     | —     | 7,3          | 6,4   | 4,9   | 3,6   | 7,0          | 6,2   | 5,0   | 3,7   |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | 9,7          | 8,9   | 7,6   | 6,1   | 9,6*         | 8,9*  | 7,6*  | 6,1*  |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | 15,6         | 14,3  | 12,3  | 10,3  | 15,0         | 14,0  | 12,4  | 10,5  |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | 21,5         | 20,6  | 19,2  | 17,3  | 21,7         | 20,8  | 19,4  | 17,5  |
| 21/out | 0,5 | 6,6*           | 6,0*  | 4,8*  | 3,6*  | 6,7*         | 6,0*  | 4,9*  | 3,7*  | 6,8*         | 5,9   | 4,6*  | 3,4*  |
|        | 0,6 | 10,3*          | 9,2*  | 7,5*  | 5,8*  | 10,1         | 9,2   | 7,8   | 6,2   | 9,9*         | 9,1*  | 7,8*  | 6,3*  |
|        | 0,7 | 13,9*          | 12,9* | 11,3* | 9,8*  | 14,3*        | 13,3* | 11,8* | 10,3* | 14,5*        | 13,4* | 11,5* | 10,3* |
|        | 0,8 | 21,7*          | 20,6  | 18,8* | 16,8* | 22,2         | 21,1  | 19,3  | 17,3  | 22,5         | 21,4  | 19,5  | 17,4  |
| 01/nov | 0,5 | 6,6*           | 5,8*  | 4,6*  | 3,5*  | 6,7*         | 5,9*  | 4,7*  | 3,6*  | 6,6*         | 5,8*  | 4,7*  | 4,0*  |
|        | 0,6 | 10,0*          | 8,9*  | 7,3*  | 5,9*  | 10,1*        | 9,0*  | 7,4*  | 6,0*  | 10,0         | 8,9   | 7,3   | 5,9   |
|        | 0,7 | 13,9*          | 12,9* | 11,4* | 10,0* | 14,1*        | 13,2* | 11,7* | 10,3* | 13,7         | 13,1  | 11,9  | 10,5  |
|        | 0,8 | 21,4           | 20,3  | 18,5  | 16,4  | 21,5         | 20,7  | 19,1  | 17,2  | 21,9         | 20,8  | 19,0  | 17,0  |
| 11/nov | 0,5 | 6,4            | 5,6   | 4,4   | 3,3   | 6,6          | 5,7   | 4,5   | 3,3   | 6,1*         | 5,5*  | 4,6*  | 3,6*  |
|        | 0,6 | 8,9            | 8,3   | 7,2   | 5,9   | 9,4          | 8,5   | 7,2   | 5,8   | 9,9*         | 8,7*  | 7,1*  | 5,6*  |
|        | 0,7 | 13,0           | 12,4  | 11,2  | 9,8   | 13,5         | 12,7  | 11,3  | 9,9   | 13,5         | 12,7  | 11,4  | 9,9   |
|        | 0,8 | 20,7           | 19,5  | 17,6  | 15,7  | 21,2         | 20,2  | 18,4  | 16,4  | 21,4         | 20,3  | 18,6  | 16,7  |
| 21/nov | 0,5 | 5,3*           | 4,8*  | 4,0*  | 3,1*  | 5,5*         | 5,0*  | 4,1*  | 3,2*  | 5,4*         | 4,9*  | 4,1*  | 3,3*  |
|        | 0,6 | 8,8            | 7,8   | 6,3   | 4,9   | 8,7*         | 7,7*  | 6,3*  | 5,1*  | 9,1          | 8,0   | 6,5   | 5,1   |
|        | 0,7 | 12,5           | 11,7  | 10,4  | 8,9   | 12,5         | 11,8  | 10,4  | 9,0   | 12,2*        | 11,5* | 10,4* | 9,1*  |
|        | 0,8 | 19,4           | 18,3  | 16,5  | 14,7  | 20,2*        | 19,1* | 17,3* | 15,4* | 21,0*        | 19,7* | 17,8* | 15,8* |
| 01/dez | 0,5 | 5,5*           | 4,9*  | 3,9*  | 2,9*  | 5,5*         | 4,9*  | 3,9*  | 2,9*  | 5,6          | 4,9   | 3,9   | 2,9   |
|        | 0,6 | 7,5            | 6,9   | 5,9   | 4,8   | 7,9          | 7,3   | 6,3   | 5,1   | 8,0*         | 7,4*  | 6,4*  | 5,2*  |
|        | 0,7 | 11,3           | 10,7  | 9,6   | 8,4   | 11,3         | 10,8  | 9,8   | 8,6   | 11,9         | 11,2  | 10,0  | 8,7   |
|        | 0,8 | 18,0           | 17,3  | 16,0  | 14,4  | 19,1         | 18,3  | 16,9  | 15,1  | 20,3         | 19,2  | 17,3  | 15,3  |
| 11/dez | 0,5 | 5,1            | 4,5   | 3,5   | 2,6   | 5,8          | 4,8   | 3,6   | 2,6   | 5,1          | 4,6   | 3,7   | 2,8   |
|        | 0,6 | 7,2            | 6,6   | 5,5   | 4,3   | 7,5*         | 6,9*  | 5,8*  | 4,6*  | 7,4*         | 6,8*  | 5,8*  | 4,7*  |
|        | 0,7 | 10,8           | 10,1  | 8,9   | 7,7   | 10,9         | 10,3  | 9,2   | 8,0   | 11,4*        | 10,7* | 9,4*  | 8,0*  |
|        | 0,8 | 17,3           | 16,5  | 15,1  | 13,5  | 18,3*        | 17,4* | 15,9* | 14,0* | 18,5         | 17,7  | 16,2  | 14,3  |
| 21/dez | 0,5 | 4,7            | 4,1   | 3,2   | 2,3   | 5,0          | 4,3   | 3,3   | 2,4   | 4,9*         | 4,2*  | 3,3*  | 2,4*  |
|        | 0,6 | 7,2            | 6,4   | 5,1   | 3,9   | 6,8          | 6,2   | 5,2   | 4,1   | 7,1*         | 6,5*  | 5,4*  | 4,2*  |
|        | 0,7 | 10,5           | 9,6   | 8,1   | 6,7   | 10,6         | 9,8   | 8,6   | 7,2   | 11,3         | 10,2  | 8,6   | 7,0   |
|        | 0,8 | 16,6           | 15,7  | 14,3  | 12,5  | 17,7         | 16,6  | 14,8  | 12,8  | 17,4         | 16,5  | 15,0  | 13,1  |
| 31/dez | 0,5 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 4,2*         | 3,7*  | 2,9*  | 2,2*  |
|        | 0,6 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 6,8*         | 6,0*  | 4,7*  | 3,6*  |
|        | 0,7 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 9,4*         | 8,8*  | 7,6*  | 6,3*  |
|        | 0,8 | —              | —     | —     | —     | —            | —     | —     | —     | 15,6         | 14,9  | 13,5  | 11,8  |

\*A probabilidade para DS sem ajuste de Fdp (SA) foram determinadas pela distribuição empírica.

<sup>1</sup>Datas de semeadura não recomendadas pelas Indicações técnicas para a cultura da soja no RS e SC.

APÊNDICE O – Análise de variância da lâmina de irrigação por ciclo de desenvolvimento para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0 da cultura da soja em anos de El Niño em função do tipo de solo, do manejo de irrigação, das épocas de semeadura (DS) e suas interações, para os municípios da região central do RS.

| Fontes de Variação     | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F                  |
|------------------------|--------------------|-------------------|----------------|--------------------|
| ----- GM 5.9–6.8 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 2                  | 274666,55         | 137333,274     | 71,10*             |
| Manejo                 | 3                  | 1817998,65        | 605999,549     | 313,75*            |
| DS                     | 6                  | 748446,33         | 124741,05      | 64,58*             |
| Solo x Manejo          | 6                  | 52866,60          | 8811,10        | 4,56*              |
| Solo x DS              | 12                 | 2560,48           | 213,37         | 0,11 <sup>ns</sup> |
| Manejo x DS            | 18                 | 7221,47           | 401,19         | 0,21 <sup>ns</sup> |
| Solo x Manejo x DS     | 36                 | 9623,58           | 267,32         | 0,14 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 1176               | 2271427,53        | 1931,48        |                    |
| Total                  | 1259               | 5184811,19        |                |                    |
| ----- GM 6.9–7.3 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 2                  | 346429,32         | 173214,66      | 85,63*             |
| Manejo                 | 3                  | 2275389,84        | 758463,28      | 374,97*            |
| DS                     | 7                  | 1078053,92        | 154007,70      | 76,14*             |
| Solo x Manejo          | 6                  | 78632,69          | 13105,45       | 6,48*              |
| Solo x DS              | 14                 | 1985,46           | 141,82         | 0,07 <sup>ns</sup> |
| Manejo x DS            | 21                 | 11587,41          | 551,78         | 0,27 <sup>ns</sup> |
| Solo x Manejo x DS     | 42                 | 13692,79          | 326,02         | 0,16 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 1344               | 2718585,11        | 2022,76        |                    |
| Total                  | 1439               | 6524356,55        |                |                    |
| ----- GM 7.4–8.0 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 2                  | 407155,52         | 203577,77      | 98,49*             |
| Manejo                 | 3                  | 2850673,36        | 950224,45      | 459,72*            |
| DS                     | 9                  | 1636645,57        | 181849,51      | 87,98*             |
| Solo x Manejo          | 6                  | 98475,71          | 16412,62       | 7,94*              |
| Solo x DS              | 18                 | 5737,50           | 318,75         | 0,15 <sup>ns</sup> |
| Manejo x DS            | 27                 | 31027,98          | 1149,48        | 0,56 <sup>ns</sup> |
| Solo x Manejo x DS     | 54                 | 20353,29          | 376,91         | 0,18 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 1679               | 3470396,88        | 266,94         |                    |
| Total                  | 1798               | 8520465,82        |                |                    |

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup>Não significativo.

APÊNDICE P – Análise de variância da lâmina de irrigação por ciclo de desenvolvimento para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0 da cultura da soja em anos de La Niña em função do tipo de solo, do manejo de irrigação, das épocas de semeadura (DS) e suas interações, para os municípios da região central do RS.

| Fontes de Variação     | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F                  |
|------------------------|--------------------|-------------------|----------------|--------------------|
| ----- GM 5.9–6.8 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 2                  | 240884,75         | 120442,38      | 98,02*             |
| Manejo                 | 3                  | 1715224,14        | 571741,38      | 465,29*            |
| DS                     | 6                  | 1030476,90        | 171746,15      | 139,77*            |
| Solo x Manejo          | 6                  | 38977,05          | 6496,17        | 5,29*              |
| Solo x DS              | 12                 | 1366,74           | 113,89         | 0,09 <sup>ns</sup> |
| Manejo x DS            | 18                 | 8636,17           | 479,79         | 0,39 <sup>ns</sup> |
| Solo x Manejo x DS     | 36                 | 12202,36          | 338,95         | 0,28 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 1092               | 1341832,33        | 1228,78        |                    |
| Total                  | 1175               | 4389600,45        |                |                    |
| ----- GM 6.9–7.3 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 2                  | 283367,09         | 141683,54      | 107,36*            |
| Manejo                 | 3                  | 2068836,67        | 689612,22      | 522,54*            |
| DS                     | 7                  | 1552384,85        | 221769,26      | 168,04*            |
| Solo x Manejo          | 6                  | 48612,10          | 8102,02        | 6,14*              |
| Solo x DS              | 14                 | 4330,22           | 309,30         | 0,23 <sup>ns</sup> |
| Manejo x DS            | 21                 | 18026,73          | 858,42         | 0,65 <sup>ns</sup> |
| Solo x Manejo x DS     | 42                 | 17954,59          | 427,49         | 0,32 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 1247               | 1645708,36        | 1319,73        |                    |
| Total                  | 1342               | 5639220,61        |                |                    |
| ----- GM 7.4–8.0 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 2                  | 315099,27         | 157549,64      | 119,23*            |
| Manejo                 | 3                  | 2473509,89        | 824503,29      | 623,99*            |
| DS                     | 9                  | 2442722,18        | 271413,57      | 205,41*            |
| Solo x Manejo          | 6                  | 62131,72          | 10355,28       | 7,84*              |
| Solo x DS              | 18                 | 8728,95           | 484,94         | 0,37 <sup>ns</sup> |
| Manejo x DS            | 27                 | 39501,09          | 1463,00        | 1,11 <sup>ns</sup> |
| Solo x Manejo x DS     | 54                 | 24176,94          | 447,72         | 0,34 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 1557               | 2057335,59        | 1321,35        |                    |
| Total                  | 1676               | 7423205,65        |                |                    |

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup>Não significativo.

APÊNDICE Q – Análise de variância da lâmina de irrigação por ciclo de desenvolvimento para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0 da cultura da soja em anos Neutros em função do tipo de solo, do manejo de irrigação, das épocas de semeadura (DS) e suas interações, para os municípios da região central do RS.

| Fontes de Variação     | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F                  |
|------------------------|--------------------|-------------------|----------------|--------------------|
| ----- GM 5.9–6.8 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 2                  | 136040,47         | 68020,24       | 40,17*             |
| Manejo                 | 3                  | 1426019,92        | 475339,97      | 280,71*            |
| DS                     | 6                  | 1140762,28        | 190127,05      | 112,28*            |
| Solo x Manejo          | 6                  | 35971,26          | 5995,21        | 3,54*              |
| Solo x DS              | 12                 | 3776,15           | 314,68         | 0,19 <sup>ns</sup> |
| Manejo x DS            | 18                 | 8236,71           | 457,59         | 0,27 <sup>ns</sup> |
| Solo x Manejo x DS     | 36                 | 16405,97          | 455,72         | 0,27 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 1176               | 1991365,92        | 1693,34        |                    |
| Total                  | 1259               | 4758578,69        |                |                    |
| ----- GM 6.9–7.3 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 2                  | 177195,58         | 88597,79       | 50,23*             |
| Manejo                 | 3                  | 1783353,35        | 594451,12      | 337,00*            |
| DS                     | 7                  | 1503997,89        | 214856,84      | 121,80*            |
| Solo x Manejo          | 6                  | 55273,63          | 9212,27        | 5,22*              |
| Solo x DS              | 14                 | 3876,09           | 276,86         | 0,16 <sup>ns</sup> |
| Manejo x DS            | 21                 | 13192,98          | 628,23         | 0,36 <sup>ns</sup> |
| Solo x Manejo x DS     | 42                 | 20817,17          | 495,65         | 0,28 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 1344               | 2370772,79        | 1763,97        |                    |
| Total                  | 1439               | 5928479,51        |                |                    |
| ----- GM 7.4–8.0 ----- |                    |                   |                |                    |
| Solo                   | 2                  | 218915,46         | 109457,73      | 65,43*             |
| Manejo                 | 3                  | 2206159,72        | 735386,57      | 439,59*            |
| DS                     | 9                  | 2306159,72        | 260857,50      | 155,93*            |
| Solo x Manejo          | 6                  | 60089,65          | 10014,94       | 5,99*              |
| Solo x DS              | 18                 | 4782,43           | 265,69         | 0,16 <sup>ns</sup> |
| Manejo x DS            | 27                 | 34504,37          | 1277,94        | 0,76 <sup>ns</sup> |
| Solo x Manejo x DS     | 54                 | 34994,59          | 648,05         | 0,39 <sup>ns</sup> |
| Erro                   | 1679               | 2808764,27        | 1672,88        |                    |
| Total                  | 1798               | 7715928,01        |                |                    |

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup>Não significativo.

APÊNDICE R – Análise de variância da lâmina de irrigação por ciclo de desenvolvimento para os grupos de maturação 5.9–6.8, 6.9–7.3 e 7.4–8.0 da cultura da soja em anos Neutros em função do tipo de solo, do manejo de irrigação, das épocas de semeadura (DS) e suas interações, para os municípios da região central do RS.

| Fontes de Variação        | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrado Médio | F                  |
|---------------------------|--------------------|-------------------|----------------|--------------------|
| ----- GM 5.9–6.8 -----    |                    |                   |                |                    |
| ENOS                      | 2                  | 383861,74         | 191930,87      | 117,94*            |
| Solo                      | 2                  | 636811,18         | 318405,59      | 195,66*            |
| Manejo                    | 3                  | 4941811,69        | 1647270,56     | 1012,24*           |
| DS                        | 6                  | 2886054,56        | 481009,09      | 295,58*            |
| ENOS x Solo               | 4                  | 14780,60          | 3695,15        | 2,27 <sup>ns</sup> |
| ENOS x DS                 | 12                 | 33630,96          | 2802,58        | 1,72 <sup>ns</sup> |
| ENOS x Manejo             | 6                  | 17431,01          | 2905,17        | 1,79 <sup>ns</sup> |
| ENOS x Solo x Manejo      | 18                 | 127814,91         | 7100,82        | 4,36 <sup>ns</sup> |
| ENOS x Solo x DS          | 36                 | 7703,38           | 213,98         | 0,13 <sup>ns</sup> |
| ENOS x Manejo x DS        | 54                 | 24094,35          | 446,19         | 0,27 <sup>ns</sup> |
| ENOS x Solo x Manejo x DS | 108                | 38231,91          | 353,99         | 0,22 <sup>ns</sup> |
| Erro                      | 3444               | 5604625,79        | 1627,36        |                    |
| Total                     | 3695               | 14716852,08       |                |                    |
| ----- GM 6.9–7.3 -----    |                    |                   |                |                    |
| ENOS                      | 2                  | 417175,43         | 208587,71      | 121,87*            |
| Solo                      | 2                  | 790851,16         | 395425,59      | 231,03*            |
| Manejo                    | 3                  | 6109208,53        | 2036402,84     | 1189,78*           |
| DS                        | 7                  | 4100700,13        | 585814,31      | 342,27*            |
| ENOS x Solo               | 4                  | 16340,95          | 4085,23        | 2,39 <sup>ns</sup> |
| ENOS x DS                 | 14                 | 41168,98          | 2940,64        | 1,72 <sup>ns</sup> |
| ENOS x Manejo             | 6                  | 20402,74          | 3400,46        | 1,99 <sup>ns</sup> |
| ENOS x Solo x Manejo      | 18                 | 181454,83         | 10080,82       | 5,89 <sup>ns</sup> |
| ENOS x Solo x DS          | 42                 | 7939,23           | 189,03         | 0,11 <sup>ns</sup> |
| ENOS x Manejo x DS        | 63                 | 36755,88          | 583,43         | 0,34 <sup>ns</sup> |
| ENOS x Solo x Manejo x DS | 126                | 52167,98          | 414,03         | 0,24 <sup>ns</sup> |
| Erro                      | 3935               | 6735066,26        | 1711,58        |                    |
| Total                     | 4222               | 18503232,09       |                |                    |
| ----- GM 7.4–8.0 -----    |                    |                   |                |                    |
| ENOS                      | 2                  | 437165,41         | 218582,71      | 128,87*            |
| Solo                      | 2                  | 925423,34         | 462711,67      | 272,80*            |
| Manejo                    | 3                  | 7516098,82        | 2505366,27     | 1477,10*           |
| DS                        | 9                  | 6383657,39        | 709295,27      | 418,18*            |
| ENOS x Solo               | 4                  | 15958,89          | 3989,72        | 2,35 <sup>ns</sup> |
| ENOS x DS                 | 18                 | 79137,38          | 4396,52        | 2,59*              |
| ENOS x Manejo             | 6                  | 23591,44          | 3931,91        | 2,32 <sup>ns</sup> |
| ENOS x Solo x Manejo      | 18                 | 215860,15         | 11992,23       | 7,07*              |
| ENOS x Solo x DS          | 54                 | 9336,21           | 172,89         | 0,10 <sup>ns</sup> |
| ENOS x Manejo x DS        | 81                 | 76196,71          | 940,72         | 0,55 <sup>ns</sup> |
| ENOS x Solo x Manejo x DS | 162                | 77840,42          | 480,49         | 0,28 <sup>ns</sup> |
| Erro                      | 4915               | 8336496,75        | 1696,13        |                    |
| Total                     | 5274               | 2409676,4         |                |                    |

\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro; <sup>ns</sup>Não significativo.

## **ANEXO A – Descrição das características dos solos estudados, conforme Cardoso (2005).**

### **Argissolos**

O termo Argissolo deriva da presença de um horizonte subsuperficial mais argiloso no perfil. São geralmente profundos a muito profundos, bem drenados, e podem ser originados a partir de rochas eruptivas, como os basaltos e granitos ou de arenitos e outros sedimentos. A limitação física refere-se à textura, espessura da camada arenosa (que promove rápida infiltração de água) com mudanças abruptas (arênico e espessarênicos), ou só mudança abrupta (abrupticos). A declividade do relevo interfere na erosão hídrica e no potencial de uso, pois ocorrem em relevo suavemente ondulado até fortemente ondulado, formado por elevações (coxilhas) com declives que variam de 5 a 10 % e altitude de 400 a 700 m, ocupando a maior área territorial do RGS.

Classe: Argissolo Bruno Acinzentado Alumínico típico.

Unidade de mapeamento: Oásis.

Antiga classificação: Laterítico Bruno Avermelhado distrófico húmico textura argilosa.

Sua ocorrência na área de estudo concentra-se na parte alta com menor declive do relevo da borda do Planalto, nos municípios de Itaara, Silveira Martins, Faxinal do Soturno, Agudo. Sob condições de vegetação natural predominam a vegetação rasteira e mata secundária; as raízes são “abundantes” no horizonte A até 25 cm, “muitas” no horizonte A de 25 até 40cm e “poucas” no horizonte B até 65cm de profundidade (BRASIL, 1973).

Classe: Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico úmbrico.

Unidade de mapeamento: Júlio de Castilhos.

Antiga classificação: Podzólico Vermelho Amarelo álico textura argilosa.

Os municípios de maior ocorrência na área de estudo são Santa Maria, São Pedro do Sul, Silveira Martins, Itaara e Nova Palma, parte alta com menos declive na borda do Planalto. Sob condições naturais predominam a vegetação rasteira de campos mistos e matas galerias; as raízes são “abundantes” no horizonte A até 30 cm, “raras” no horizonte AB de 30 até 50cm, e “escassas” no horizonte B de 50 até 80cm de profundidade.

Classe: Argissolo Vermelho Distrófico arênico.

Unidade de mapeamento: São Pedro.

Antiga classificação: Podzólico Vermelho Amarelo textura média.

Sua ocorrência na área de estudo é maior na parte alta das coxilhas nos municípios de São Pedro do Sul, Santa Maria, Restinga Seca, Formigueiro e São Gabriel. Nele predomina a

vegetação rasteira de campos grossos; as raízes são “abundantes” no horizonte A até 65 cm, “muitas” no horizonte AB de 65 a 100 cm, e “poucas” no horizonte B de 100 até 130cm de profundidade.

Classe: Argissolo vermelho distrófico latossólico (PVD3 ).

Unidade de mapeamento: Alto das Canas.

Antiga classificação: Laterítico Bruno Avermelhado eutrófico textura argilosa.

Na área de estudo tem maior ocorrência nos municípios de São Gabriel e São Sepé. A vegetação natural se apresenta com campos mistos; as raízes, segundo Brasil (1973), são classificadas como “abundantes” no horizonte A até 40 cm, e “muitas” no horizonte AB de 40 até 133 cm de profundidade.

Classe: Argissolo Amarelo Alítico típico

Unidade de mapeamento: Santa Maria.

Antiga classificação: Brunizem Hidromórfico textura média.

Os municípios de maior ocorrência na área de estudo são: Santa Maria, São Pedro do Sul, Restinga Seca, São Sepé, Formigueiro, São Gabriel, Faxinal do Soturno, Nova Palma, Dona Francisca, Cacequi. Sob condições de pastagem nativa, vegetação predominante na sua área de ocorrência, as raízes são “abundantes” no horizonte A até 40 cm e “poucas” no horizonte A/B de 40 até 55 cm de profundidade.

## **Chernossolos**

Essa classe de solos caracteriza-se pelos solos rasos a profundos (80 a 120 cm em média), com perfil de horizontes A-B-C, com médios a altos teores de material orgânico, desenvolvidos a partir do basalto que lhe confere cores escuras ao horizonte superficial A. Apresenta horizonte B textural, pouco espesso (30-60 cm), de textura argilosa. O horizonte C é composto por material intemperizado (basalto amigdalóide), apresentando grande número de incrustações de vários tamanhos.

Classe: Chernossolo Argilúvico Férrico típico.

Unidade de mapeamento: Ciríaco.

Antiga classificação: Brunizem avermelhado raso textura argilosa.

Os municípios de maior ocorrência na área de estudo são Itaara, São Martinho da Serra e São Pedro do Sul. Sob condições naturais predomina a vegetação de mata subtropical alta,

embora atualmente com expressivas áreas cultivadas. As raízes apresentam-se “abundantes” no horizonte A até 25 cm, “comuns” de 25 a 48 cm no horizonte AB e de 48 a 90cm como “ausentes” no horizonte B (BRASIL, 1973).

A unidade de mapeamento Ciríaco não constitui unidade de mapeamento simples no Rio Grande do Sul, estando sempre associados em manchas com os solos Charrua (Neossolos litólico eutrófico chernossólico – Rle1) formando a Associação Ciríaco-Charrua. Esses solos ocupam área de pequena extensão, em relevo ondulado a fortemente ondulado, o que dificulta a mecanização, exigindo práticas conservacionistas intensivas.

Classe: Chernossolo Argilúvico Órtico saprolítico.

Unidade de mapeamento: Venda Grande.

Antiga classificação: Brunizem raso.

Esses solos ocorrem em relevo ondulado com pequenas elevações e declive médio ( $\approx$  8%), em altitudes de 80 a 200 m, aparecendo nos municípios de Restinga Seca, São Sepé, São Gabriel, Santa Maria, Dilermando de Aguiar e Cacequi.

A vegetação natural aparece como mata subtropical arbustiva, mas intensamente modificada e reduzida pelo uso agrícola intenso. As raízes apresentam-se “abundantes” no horizonte A até 28 cm e no horizonte B até 42 cm, sendo “comuns” no horizonte C de 42 a 75 cm de profundidade (BRASIL, 1973).

## **Latossolos**

É um solo profundo, bem desenvolvido, que, comparado aos demais solos, apresenta alta capacidade de armazenamento de água.

Classe: Latossolo Vermelho Distrófico típico.

Unidade de mapeamento: Cerrito.

Antiga classificação: Laterítico Bruno Avermelhado Distrófico textura argilosa.

Esse solo ocorre na parte central do município de São Sepé. Sob condições naturais predomina a vegetação de campos com pequena cobertura de gramíneas, atualmente com áreas cultivadas intensamente assim como pecuária. As raízes apresentam-se “abundantes” no horizonte A até 35 cm e de 35 a 60 cm no horizonte AB e são “comuns” de 60 a 94 cm no horizonte BA e de 94 a 136cm no horizonte B.

### **Luvissolos**

O termo luvissolo significa acumulação subsuperficial de argila. São solos quase sempre pouco profundos, com drenagem imperfeita, perfil com os horizontes A-B-C, com presença de argilas expansivas que favorecem a erosão, dificultando o manejo e exigindo práticas conservacionistas intensivas.

Classe: Luvissolo Crômico Pálico saprolítico.

Unidade de mapeamento: Cambaí.

Antiga classificação: Brunizem Avermelhado raso textura argilosa.

Ocorrem em relevo ondulado nos municípios de Vila Nova, São Gabriel, e Santa Margarida do Sul. São pouco profundos a rasos, associados a afloramentos rochosos.

Sob condições naturais predomina a vegetação de campos finos, com mata galeria nas margens dos rios e arroios. As raízes apresentam-se “abundantes” no horizonte A até 40 cm, “poucas” de 40 a 67 cm no horizonte B e “raras” na profundidade de 67 a 85 cm no horizonte BC.

### **Neossolos**

O termo “neossolos” refere-se a solos novos, pouco desenvolvidos. São solos de formação muito recente, derivados do basalto. São encontrados em condições de relevo médio a fortemente ondulado, com drenagem moderada. Devido a sua pouca espessura, possuem fortes restrições às culturas anuais, mas apresentam aptidão para reflorestamento e fruticultura.

Classe: Neossolo Litólico Eutrófico típico.

Unidade de mapeamento: Charrua.

Antiga classificação: Litólico Eutrófico textura média.

Sua ocorrência na área estudada concentra-se nas encostas da Serra aparecendo sempre associado com solos Círiaco.

A vegetação original compunha-se de mata subtropical alta, mas está intensamente alterada pelo desmatamento intensivo e uso em áreas ocupadas com culturas regionais. As raízes são classificadas como “abundantes” até 20 cm no horizonte A, sendo que a próxima camada é de rocha matriz.

Classe: Neossolo Litólico Distró-úmbrico fragmentário

Unidade de mapeamento: Guassupi

Antiga classificação: Litólico Distrófico textura média

Área de ocorrência: nos municípios de São Martinho da Serra, São Pedro, Santa Maria, Itaara e Silveira Martins. A vegetação original predominante é a de campos com presença de matas baixas e esparsas, sendo utilizado para pastagens. O sistema radicular apresenta-se “abundante” com pouca profundidade até 20 cm e penetrando nas fendas de rochas.

### **Planossolos**

Os Planossolos, típicos de áreas planas, são imperfeitamente ou mal drenados, encontrados em várzeas, com relevo plano suave a ondulado. São adequados para o cultivo de arroz irrigado, milho, soja e pastagens.

Classe: Planossolo Háptico Eutrófico arênico.

Unidade de mapeamento: Vacacaí.

Antiga classificação: Planosol textura média.

A área de ocorrência concentra-se em altitudes menores do que 150m em relevo plano à suave ondulado, nas várzeas dos rios, principalmente na Depressão Central. A vegetação predominante é a de campos, mas modificada pelo uso atual com cultivos de arroz e após sua colheita com pastagem de resteva.

O sistema radicular apresenta-se como “abundante” até 45 cm no horizonte A, “comum” de 45 a 70 cm no horizonte e de “poucas” raízes no horizonte B de 70 a 120 cm.

Classe: Planossolo Háptico Eutrófico típico.

Unidade de mapeamento: São Gabriel.

Antiga classificação: Planosol textura argilosa.

A área de sua ocorrência abrange uma faixa de relevo entre a várzea da margem direita do rio Vacacaí e as encostas da Serra do Sudeste nos municípios de São Gabriel, Santa Margarida do Sul, Vila Nova do Sul e São Sepé. O relevo é suavemente ondulado, com altitudes entre 80 a 200m. A vegetação predominante é a de campos finos entremeados de esparsos capões de mato. As raízes apresentam-se “abundantes” no horizonte A até 20 cm, “poucas” de 20 a 55 cm no horizonte BC e ainda como “poucas” na profundidade de 55 a 68 cm no horizonte C.

## ANEXO B - Descrição das principais funções de densidade de probabilidade, conforme Silva (2008)

A função exponencial é utilizada para dados com forte assimetria à esquerda, ou seja, com forma similar à um “J” invertido (THOM, 1958; KITE, 1978). Sua função de densidade de probabilidade [f(x)] é expressa por:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\lambda} e^{-x/\lambda} & ; x > 0 \\ 0 & ; x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

A probabilidade de ocorrer um valor menor ou igual à x pode ser calculada pela sua função de distribuição acumulada [F(x)], dada por:

$$F(x) = \int_0^{\infty} f(x) = 1 - e^{-x/\lambda} \quad (2)$$

em que x é a variável aleatória contínua, e é base do logaritmo neperiano (2,718281828...) e  $\lambda$  é o parâmetro escalar, estimado pela média dos valores de x.

A distribuição com função gama é um caso particular da distribuição de Pearson do Tipo III, com parâmetro de localização igual à zero (THOM, 1958). Se x for uma variável aleatória contínua com valores maiores que zero, com distribuição gama de parâmetros  $\alpha > 0$  e  $\beta > 0$ , sua função densidade de probabilidade é:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \text{ para } 0 < x < \infty \quad (3)$$

em que  $\beta$  e  $\alpha$  são o parâmetro de escala e o parâmetro de forma da variável aleatória contínua x e  $\Gamma(\alpha)$  é a função gama incompleta do parâmetro  $\alpha$  (THOM, 1958). A média e a variância dos dados são iguais a  $\alpha\beta$  e  $\alpha\beta^2$ . Sua função cumulativa de probabilidade [F(x)] é definida por:

$$F(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (4)$$

A distribuição log-normal considera que os logaritmos das variáveis aleatórias seguem uma distribuição normal. A função densidade da distribuição log-normal a dois e a três parâmetros são representadas pela seguinte equação (MIRSHAWKA, 1971):

$$f(x) = \frac{1}{(x-a)\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{[\ln(x-a)-\mu]^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (5)$$

em que  $f(x)$  é a função densidade de probabilidade da variável aleatória  $x$ ; e a base dos logaritmos neperianos;  $\mu$  a média dos logaritmos da variável  $x$ ;  $\sigma$  o desvio-padrão dos logaritmos da variável  $x$ ; e “a” o limite inferior da amostra, sendo “a” igual à zero para a função a dois parâmetros.

Assumindo-se valores entre  $a$  e  $b$  ( $a \leq x \leq b$ ) para uma variável aleatória  $x$ , pode-se encontrar a probabilidade de  $x$  por:

$$F(a \leq x \leq b) = \int_a^b \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{[\ln(x-a)-\mu]^2}{2\sigma^2}\right)} dx \quad (6)$$

O valor de “a” pode ser zero ou o valor mínimo da série. O valor de “b” pode ser o valor da variável aleatória quando se considera a probabilidade cumulativa de ocorrência daquele valor (HASTINGS & PEACOCK, 1975).

Uma das mais importantes distribuições de probabilidades, com muitas variáveis modeladas, é a distribuição de probabilidades “normal”. Se a variável  $X$  tem distribuição normal com parâmetros média ( $\mu$ ), variância ( $\sigma^2$ ) e desvio-padrão ( $\sigma$ ), a sua função densidade de probabilidade é dada por (RIBEIRO JÚNIOR, 2004):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \text{ para } -\infty < \mu < \infty, -\infty < x < \infty \text{ e } \sigma > 0 \quad (7)$$

A função densidade de probabilidade Weibull para a variável  $X$ , para os parâmetros escalar ( $\beta$ ) e de forma ( $\alpha$ ), é dada por (RIBEIRO JÚNIOR, 2004):

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} x^{\alpha-1} e^{\left(-\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, \text{ para } x \geq 0, \alpha > 0 \text{ e } \beta > 0 \quad (8)$$

Utilizando-se os parâmetros das Fdp calculou-se os valores de duração do ciclo, de lâmina de irrigação e do número de irrigações por ano agrícola mais prováveis, para os diferentes solos e datas de semeadura para a cultura da soja.