



UFSM

Tese de Doutorado

**PARÂMETROS DE IRRIGAÇÃO PARA O FEIJOEIRO
EM DIFERENTES SOLOS E ÉPOCAS DE
SEMEADURA NA REGIÃO CENTRAL
DO RIO GRANDE DO SUL**

Joel Cordeiro da Silva

PPGEA

Santa Maria, RS, Brasil

2008

**PARÂMETROS DE IRRIGAÇÃO PARA O FEIJOEIRO EM
DIFERENTES SOLOS E ÉPOCAS DE SEMEADURA NA REGIÃO
CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

por
Joel Cordeiro da Silva

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração 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**.

PPGEA
UFSM

Santa Maria, RS, Brasil

2008

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

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

**PARÂMETROS DE IRRIGAÇÃO PARA O FEIJOEIRO EM
DIFERENTES SOLOS E ÉPOCAS DE SEMEADURA NA REGIÃO
CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

elaborada por

Joel Cordeiro da Silva

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

Arno Bernardo Heldwein, Dr.
(Presidente/Orientador)

Galileo Adeli Buriol, Dr. (UNIFRA)

Alessandro Dal Col Lúcio, Dr. (UFSM)

Nereu Augusto Streck, PhD (UFSM)

Toshio Nishijima, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 24 de março de 2008.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de registrar meu agradecimento a Deus pela vida e por me acompanhar durante ela, especialmente nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos meus familiares, em especial aos meus pais, Agenor e Regina, pela educação, esforço e exemplos dados, maior herança que algum ser humano pode obter e aos meus irmãos Narciso, Dorotéia, Aline, Raquel, Jonas e Enéias para os quais guardo sempre um lugar no meu coração e em meus pensamentos.

Não posso deixar de agradecer a minha amada Fabrina pelo amor, companheirismo, dedicação e compreensão.

A Universidade Federal de Santa Maria à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal (CAPES) e, em especial, ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, agradeço pela oportunidade de aprendizado e crescimento.

Ao professor Arno, grande orientador, pessoa fantástica que ensina não só com as palavras mas também através do exemplo de profissional ético, responsável e dedicado, agradeço grandemente por ter me aturado durante oito anos.

Agradeço aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola em especial ao professor Nereu pelo companheirismo e pela habilidade de cobrar nas horas certas.

Agradeço aos membros da banca, professores Galileo, Alessandro, Toshio e Nereu pelas contribuições na tese.

Como profissional da educação não posso deixar de registrar meu agradecimento para todos os professores que atuaram na minha formação de uma maneira ou outra, cada um com sua parcela de contribuição.

A todos os profissionais que não mediram esforços para implantar, manter a estação meteorológica principal de Santa Maria, coletar os dados e atualizar o banco de dados, com os quais foi elaborada a tese.

Agradeço a todos os colegas de setor, da “climato”, na “fito”, como sempre nos referimos, os quais sempre foram companheiros na hora de trabalhar, jogar bola e fazer festa.

Por fim agradeço a todos aqueles que, embora não citados diretamente, contribuíram de alguma forma para transformar o doutoramento em realidade.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	6
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	10
LISTA DE APÊNDICES	13
LISTA DE ANEXOS	15
RESUMO.....	16
ABSTRACT.....	17
1 INTRODUÇÃO	18
2. REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 TEMPERATURA DO AR E O CICLO DE DESENVOLVIMENTO DO FEJJOEIRO	21
2.2 CONSUMO DE ÁGUA DO FEJJOEIRO E NECESSIDADE DE IRRIGAÇÃO	24
2.3 FUNÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE EM ESTUDOS AGROMETEOROLÓGICOS.....	27
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO	33
3.2 PROCESSAMENTO DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E DETERMINAÇÃO DO MANEJO DE IRRIGAÇÃO	38
3.3 SIMULAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA CULTURA	43
3.4. DETERMINAÇÃO DA CAD PARA OS DIFERENTES SOLOS	45
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 DURAÇÃO DOS SUBPERÍODOS E DO CICLO DO FEJJOEIRO	51
4.2 IRRIGAÇÃO E NÚMERO DE IRRIGAÇÕES: COMPARAÇÃO DE MÉDIAS	61
4.3 IRRIGAÇÃO E NÚMERO DE IRRIGAÇÕES: ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÃO	70
5 CONCLUSÕES	80

REFERÊNCIAS.....	82
APÊNDICES	91
ANEXOS	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Área ocupada pelas diferentes unidades de mapeamento e respectivas classes dos solos na região de estudo.....	35
Tabela 2	Variáveis meteorológicas utilizadas na simulação do desenvolvimento do feijoeiro e para o cálculo do balanço hídrico diário do solo.....	38
Tabela 3	Variáveis meteorológicas calculadas a partir dos dados meteorológicos e respectivas funções matemáticas.....	39
Tabela 4	Épocas de semeadura (ES) utilizadas na simulação do desenvolvimento da cultura do feijão, tipo II (médio).....	43
Tabela 5	Soma térmica acumulada (ST), subperíodos de desenvolvimento e modelo de cálculo dos coeficientes de cultura utilizados para determinar a evapotranspiração máxima do feijoeiro em Santa Maria, RS, conforme Matzenauer et al. (1999) e Medeiros et al. (2000).....	44
Tabela 6	Capacidade de armazenamento de água disponível no solo inicial (CAD_{in}) e final (CAD_f), valor da curva (CN), unidades de mapeamento (BRASIL, 1973) e classificação dos solos (PERAZA, 2003) da área de abrangência da estação climatológica principal de Santa Maria, RS, utilizados no estudo simulado para os anos de 1968 a 2006.....	48
Tabela 7	Duração mínima (Mín), média (Méd), máxima (Máx) e desvio padrão dos subperíodos (Subp) do feijoeiro, em dias, para as duas épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.....	53
Tabela 8	Médias de duração em dias dos subperíodos compreendidos entre a semeadura (S), primeira folha trifoliada (1F), terceira folha trifoliada (3F), início da floração (IF), final da floração (FF), início do enchimento de grãos (IEG), maturação fisiológica (MF), e de todo ciclo (S-MF), para as dez épocas de semeadura (ES) simuladas em cada ano do período de 1968 a 2006.....	55
Tabela 9	Frequência de casos com ajuste estatisticamente significativos das funções de distribuição de probabilidades (fdp) gamma, log-normal, normal e Weibull para a duração dos subperíodos e do ciclo total, simulados de 1968 a 2006.....	56
Tabela 10	Funções de distribuição de probabilidades (fdp) selecionadas para determinar a duração dos subperíodos, semeadura – primeira folha trifoliada; primeira folha – terceira folha; terceira folha – início da floração; início da floração - final da floração; final da floração – início do enchimento de grãos; início do enchimento de grãos – maturação	

	fisiológica, para dez épocas de semeadura, simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.....	57
Tabela 11	Funções de distribuição de probabilidades (fdp) selecionadas para determinar a duração do ciclo do feijoeiro, para as dez épocas de semeadura, simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006...	58
Tabela 12	Duração provável dos subperíodos compreendidos entre a semeadura (S), primeira folha trifoliada (1F), terceira folha trifoliada (3F), início da floração (IF), final da floração (FF), início do enchimento de grãos (IEG) e maturação fisiológica (MF), para as dez épocas de semeadura (ES), simuladas para a séria histórica de 1968 a 2006.....	60
Tabela 13	Valores médios de lâmina de irrigação (mm) e do número de irrigações, totalizados em cada período de cultivo e solos estudados na simulação do ciclo do feijoeiro, durante o período de 1968 a 2006.....	63
Tabela 14	Valores médios de lâmina de irrigação (mm) e do número de irrigações, totalizados em cada período de cultivo e épocas de semeadura estudadas na simulação do ciclo do feijoeiro, durante o período de 1968 a 2006.....	65
Tabela 15	Valores médios de lâmina de irrigação (mm) e do número de irrigações, totalizados em cada período de cultivo para cada manejo de irrigação e solo, estudados na simulação do ciclo do feijoeiro, durante o período de 1968 a 2006.....	66
Tabela 16	Valores médios do número de irrigações (N. Irrig), totalizados em cada período de cultivo, solos e épocas de semeadura (ES), estudados na simulação do ciclo do feijoeiro, durante o período de 1968 a 2006, para os solos, Alto das Canas, Cambai, Charrua, Ciríaco, Guassupi, Júlio de Castilhos, Oásis e São Gabriel (a) e para os solos Santa Maria, São Pedro, Venda Grande, Cerrito e Vacacaí.....	69
Tabela 17	Funções de distribuição de probabilidades (fdp), exponencial (Exp), gamma, log-normal (Lnorm) e normal (Norm), e seus parâmetros, selecionadas para determinar a lâmina anual de irrigação, para os grupamentos de solos, Charrua, Ciríaco, Guassupi, Júlio de Castilhos, São Pedro, Venda Grande e Cerrito; para os diferentes manejos (M) de irrigação e para as épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.....	71
Tabela 18	Funções de distribuição de probabilidades (fdp), exponencial (Exp), gamma e log-normal (Lnorm) e seus parâmetros, selecionadas para determinar o número de irrigações por ano, para os grupamentos de solos, Charrua, Ciríaco, Guassupi, Júlio de Castilhos, São Pedro, Venda Grande e Cerrito; para os diferentes manejos (M) de irrigação e para as épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.....	72

Tabela 19	Estimativa da lâmina bruta máxima de irrigação (mm) necessária à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos, Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos, em cada manejo (M) de irrigação e cada época de semeadura (ES), simuladas em todos os anos agrícolas do período entre 1968 e 2006.....	74
Tabela 20	Estimativa da lâmina máxima bruta de irrigação (mm) necessária à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos São Pedro, Venda Grande e Cerrito, manejos (M) de irrigação de 0,5, 0,6, 0,7 e 0,8 e nas dez épocas de semeadura (ES), simuladas em todos os anos agrícolas do período entre 1968 e 2006.....	75
Tabela 21	Estimativa do número de irrigações por ano necessárias à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos, Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos, em cada manejo (M) de irrigação e época de semeadura (ES), simuladas em cada ano agrícola do período entre 1968 e 2006.....	78
Tabela 23	Estimativa do número de irrigações por ano necessárias à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos São Pedro, Venda Grande e Cerrito, em cada manejo (M) de irrigação e época de semeadura (ES), simuladas em cada ano agrícola do período entre 1968 e 2006.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Localização da área de abrangência do estudo, na região central do Rio Grande do Sul.....	34
Figura 2	Municípios da região central do Rio Grande do Sul, com destaque (em tom mais claro) da área de abrangência da Estação Meteorológica de Santa Maria considerado no estudo das necessidades de irrigação mais prováveis. FONTE: Cardoso (2005).....	36
Figura 3	Média dos elementos do balanço hídrico seriado calculado para o período de agosto de 1968 a junho de 2006, para Santa Maria, RS, considerando uma capacidade de armazenamento disponível no solo igual a 100 mm.....	37
Figura 4	Variação dos valores do coeficiente de cultura (K_c) do feijoeiro, em função da soma térmica ($^{\circ}\text{C dia}$), simulados para a região central do Rio Grande do Sul. Adaptação de Matzenauer et al. (1999) e Medeiros et al. (2000).....	45
Figura 5	Variação dos valores de CAD_n , em função do aprofundamento radicular ao longo do ciclo, determinado pela soma térmica ($^{\circ}\text{C dia}$), simulados para os diferentes solos da região central do Rio Grande do Sul.....	47
Figura 6	Variação da duração média dos subperíodos do ciclo feijoeiro, em função da época de semeadura, simulados durante os anos de 1968 a 2006.....	54
Figura 7	Percentual de anos agrícolas em que foi necessária pelo menos uma irrigação, para os diferentes solos, manejos de irrigação e épocas de semeadura simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006....	62

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- 1F – primeira folha trifoliada;
- 3F – terceira folha trifoliada;
- AD – água disponível no solo;
- α – parâmetro de forma da função gamma;
- β – parâmetro de escala da função gamma;
- b0 – coeficiente linear para a equação de Ångström-Prescott;
- b1 - coeficiente angular para a equação de Ångström-Prescott;
- CC – umidade do solo na capacidade de campo;
- CAD – capacidade de armazenamento de água disponível;
- CAD_{in} – valor inicial da CAD utilizado na simulação;
- CAD_f – valor final da CAD utilizado na simulação;
- CAD_n - valor da CAD calculado para o dia n;
- d – déficit de saturação de vapor do ar;
- 8° DISME – oitavo distrito de meteorologia;
- Δ - tangente à curva de saturação de vapor do ar;
- Dp – desvio padrão;
- Dur – duração do ciclo de desenvolvimento;
- ϵ =emissividade do gramado (0,95);
- e – pressão parcial de vapor;
- e_s – pressão de saturação de vapor;
- ES – épocas de semeadura;
- ETP – evapotranspiração;
- ET_c – evapotranspiração máxima da cultura;
- ET_m - evapotranspiração máxima da cultura;
- ET_o – evapotranspiração de referência;
- ETR – evapotranspiração real;
- EvP – evaporação medida no evaporímetro de Piche;
- Exp – Exponencial;
- fdp – função densidade de probabilidades;
- FF – final da floração;

$\Gamma(\alpha)$ – função gamma do parâmetro alfa;
 γ - constante psicrométrica;
h – profundidade efetiva do sistema radicular;
H0 – hipótese nula;
i – nível de manejo da irrigação;
IAF – índice de área foliar;
IEG – início do enchimento de grãos;
IF – início da floração;
Kc – coeficiente de cultura;
 $K_{o\downarrow}$ - densidade de fluxo da radiação solar global incidente no topo da atmosfera;
L – calor latente de evaporação da água;
 λ – parâmetro escalar da função exponencial;
L* - balanço de radiação de ondas longas;
LNormal – Log-normal;
LNorm – Log-normal;
M – manejo de irrigação;
 μ – média dos logaritmos da variável “X”;
Máx – valor máximo;
Méd – valor médio;
MF – maturação fisiológica;
Mín – valor mínimo;
n – insolação diária;
N – comprimento do dia;
NC – número da curva;
Norm – Normal;
PA – percentual de anos;
P – precipitação pluviométrica;
Pe – precipitação efetiva;
Pi – perdas iniciais por interceptação e enchimento da rugosidade do solo;
PMP – ponto de murcha permanente;
Pr - perdas por escoamento superficial
Q* - saldo de radiação;
r – refletividade do gramado;

R_g - densidade de fluxo da radiação global incidente;

σ – constante de Stefan-Boltzmann;

σ – desvio padrão dos logaritmos da variável “X”;

S – momento da sementeira;

s – parâmetro de retenção;

ST – soma térmica;

Subp – subperíodo;

T₉ - temperatura do ar determinada às 9 horas do dia;

T₁₅ – temperatura do ar determinada às 15 horas do dia;

T₂₁ - temperatura do ar determinada às 21 horas do dia;

T_m – temperatura média do ar;

T_{máx} – temperatura máxima do ar;

T_{min} – temperatura mínima do ar;

U_{0.5} – velocidade do vento medida 0,5m acima do solo;

U₂ - velocidade do vento medida 2m acima do solo;

U₁₀ – velocidade do vento medida a 10m acima do solo;

UR₉ - umidade relativa do ar determinada às 9 horas do dia;

UR₁₅ – umidade relativa do ar determinada às 15 horas do dia;

UR₂₁ - umidade relativa do ar determinada às 21 horas do dia;

UR_m - umidade relativa média do ar;

LISTA DE APÊNDICES

- APÊNDICE A Análise de variância da duração do ciclo total e dos subperíodos em função das épocas de semeadura (ES).....92
- APÊNDICE B Análise de variância da lâmina de irrigação e do número de irrigações em função do tipo de solo, do manejo de irrigação, das épocas de semeadura (ES) e suas interações.....93
- APÊNDICE C Funções de distribuição de probabilidades (fdp), gamma, log-normal (Lnorm) e Weibull (Weib), selecionadas para determinar a lâmina anual de irrigação, para os grupamentos de solos, Oásis e São Gabriel; Santa Maria, para os diferentes manejos (M) de irrigação e para as épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.....94
- APÊNDICE D Funções de distribuição de probabilidades (Fdp), gamma, log-normal (Lnorm) e normal (Norm) selecionadas para determinar a lâmina anual de irrigação, para os solos Vacacaí, Alto das Canas e Cambai, para os diferentes manejos (M) de irrigação e para as épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.....95
- APÊNDICE E Estimativa da lâmina bruta máxima de irrigação (mm) necessária à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos, Alto das Canas e Cambaí, em cada manejo (M) de irrigação e cada época de semeadura (ES), simuladas em todos os anos agrícolas do período entre 1968 e 2006.....96
- APÊNDICE F Estimativa da lâmina bruta máxima de irrigação (mm) necessária à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos, Oásis e São Gabriel, em cada manejo (M) de irrigação e cada época de semeadura (ES), simuladas em todos os anos agrícolas do período entre 1968 e 2006.....97
- APÊNDICE G Estimativa da lâmina bruta máxima de irrigação (mm) necessária à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para o solo Santa Maria, em cada manejo (M) de irrigação e cada época de semeadura (ES), simuladas em todos os anos agrícolas do período entre 1968 e 2006.....98
- APÊNDICE H Estimativa da lâmina bruta máxima de irrigação (mm) necessária à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para o solo Vacacaí, em cada manejo (M) de irrigação e cada época de semeadura (ES), simuladas em todos os anos agrícolas do período entre 1968 e 2006.....99

APÊNDICE I	Funções de distribuição de probabilidades (fdp), exponencial (Exp), gamma, log-normal (Lnorm), normal (Norm) e Weibull (Weib), selecionadas para determinar o número de irrigações por ano, para os grupamentos de solos, Oásis e São Gabriel; Santa Maria, para os diferentes manejos (M) de irrigação e para as épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.....	100
APÊNDICE J	Funções de distribuição de probabilidades (fdp), gamma, Weibull e log-normal (Lnorm) selecionadas para determinar o número de irrigações por ano, para os solos Vacacaí, Alto das Canas e Cambaí, para os diferentes manejos (M) de irrigação e para as épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.....	101
APÊNDICE K	Estimativa do número de irrigações por ano necessárias à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos, Alto das Canas e Cambaí, em cada manejo (M) de irrigação e época de semeadura (ES), simuladas em cada ano agrícola do período entre 1968 e 2006.....	102
APÊNDICE L	Estimativa do número de irrigações por ano necessárias à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos Oásis e São Gabriel, em cada manejo (M) de irrigação e época de semeadura (ES), simuladas em cada ano agrícola do período entre 1968 e 2006.....	103
APÊNDICE M	Estimativa do número de irrigações por ano necessárias à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para o solo Santa Maria, em cada manejo (M) de irrigação e época de semeadura (ES), simuladas em cada ano agrícola do período entre 1968 e 2006.....	104
APÊNDICE N	Estimativa do número de irrigações por ano necessárias à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para o solo Vacacaí, em cada manejo (M) de irrigação e época de semeadura (ES), simuladas em cada ano agrícola do período entre 1968 e 2006.....	105

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	Breve descrição das principais características dos solos estudados, conforme Cardoso (2005).....	107
---------	--	-----

RESUMO

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

PARÂMETROS DE IRRIGAÇÃO PARA O FEIJOEIRO EM DIFERENTES SOLOS E ÉPOCAS DE SEMEADURA NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL

Autor: Joel Cordeiro da Silva
Orientador: Prof^o Dr. Arno Bernardo Heldwein
Local e data da Defesa: Santa Maria, 24 de março de 2008.

O feijão é uma leguminosa bastante cultivada no Brasil, sendo o principal alimento de muitos brasileiros. Apesar de ser cultivado em diferentes condições climáticas, o feijoeiro é uma planta bastante sensível a estresses ambientais, notadamente a deficiência hídrica. Para suprir adequadamente a planta com água é necessário estudar o clima da região e das épocas de cultivo. As informações obtidas irão ajudar na tomada de decisões da adoção ou não da irrigação e, quando recomendada, seu melhor planejamento. O objetivo desse estudo foi determinar os valores mais prováveis de duração do ciclo e subperíodos, de lâmina de irrigação e do número de irrigações necessários para o feijão semeado em diferentes épocas, considerando-se a capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) dos principais solos da região Central do Rio Grande do Sul. A simulação do ciclo foi realizada utilizando-se a soma térmica, em dez épocas de semeadura (ES) e em cada ano da séria histórica de dados meteorológicos, para o período entre 1968 e 2006. Os dados meteorológicos foram coletados na estação meteorológica principal de Santa Maria – RS (EMPSM). A irrigação foi simulada para 13 solos da região de abrangência da EMPSM, que foram reunidos em seis grupos, de acordo com sua CAD e sua textura. Para simular a irrigação, utilizaram-se quatro manejos: 0,8; 0,7; 0,6 e 0,5 os quais correspondem ao esgotamento máximo de 20%, 30%, 40% e 50% da CAD, respectivamente. A variação do conteúdo de água no solo foi determinada pelo balanço hídrico diário do solo, considerando-se a irrigação. Os dados de duração do ciclo e dos subperíodos, assim como a lâmina e o número de irrigações foram submetidos à análise de variância, teste de comparação de médias e análise de distribuição de probabilidade. A função de distribuição de probabilidades (fdp) normal foi utilizada para estudar a distribuição da duração do ciclo e de suas etapas. Para a lâmina de irrigação e o número de irrigações utilizou-se a fdp gamma, na maioria dos casos, por apresentar melhor ajuste aos dados. Quando não foi possível ajustar nenhuma fdp, utilizou-se a distribuição empírica. Verificou-se que o ciclo tem duração variável conforme a ES com médias entre 81 e 121 dias, sendo mais curto no final do período de safra. A lâmina e o número de irrigações foram influenciados pela ES e tipo de solo. A maior exigência de suplementação hídrica acontece nas últimas ES do período da safra e a menor no início da safra e na safrinha. Para a probabilidade de 90% de ocorrência a lâmina de irrigação variou entre 32 e 143 mm e o número de irrigações entre três e 20 vezes no ciclo de cultivo.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L.; Função densidade de probabilidade, Estresse hídrico, Capacidade de armazenamento de água disponível (CAD).

ABSTRACT

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

IRRIGATION PARAMETERS FOR COMMON BEAN IN DIFFERENT SOILS AND SOWING DATES IN THE CENTRAL REGION OF RIO GRANDE DO SUL

Author: Joel Cordeiro of Silva
Adviser: Prof^o Dr. Arno Bernardo Heldwein
Location and date of the Defense: Santa Maria, March 24th, 2008

Common bean is produced in the entire territory of Brazil and it is the staple food of many Brazilians. In spite of being cultivated in a variety of meteorological conditions, common bean is a plant sensitive to environmental stresses, mainly water stress. To appropriately provide the plant with water, it is necessary to study the climate of the region and the sowing times. Such information will be helpful to decide if the irrigation is recommended or not, and when recommended, its best planning. The objective of this study was to determine the most probable value of the duration of the cycle and the developmental phases, the irrigation requirements and the number of irrigations necessary for common bean cultivated during different sowing dates, considering the storage capacity of available water (CAD) of some of the main soils of the Central Region of the Rio Grande do Sul State, Brazil. The simulation of the developmental cycle was performed using thermal time units, in ten sowing dates (ES) and in each year of the meteorological database, from 1968 to 2006. Meteorological data were collected in the main meteorological station (MS) at Santa Maria - RS. Irrigation was simulated for 13 soils in the surroundings of the MS, organized in six groups according to CAD and texture. In simulating the irrigation it were used four managements: 0.8, 0.7, 0.6 and 0.5 which correspond to the maximum uptake of 20%, 30%, 40% and 50% of CAD, respectively. The variation of the amount of water in the soil was calculated through daily water balance, considering the irrigation. Data obtained, such as the entire cycle duration and developmental phases, and the amount and number of irrigations, was submitted to analysis variance, tests of means comparison and analysis of probability distribution. The normal probability density function (fdp) was used to study the developmental cycle and the duration of the developmental phases. For the irrigation requirements and the number of irrigations, the gamma fdp was used in most cases, because of a best fit of the data. When it was not possible to adjust any fdp the empirical distribution was used. The developmental cycle has a variable duration with average values between 81 and 121 days, being shorter at the end of the spring growing season. The irrigation requirement and the number of irrigations were influenced by ES and soil type. The largest demand of water supply takes place at the end of the spring growing season and the smallest one in the beginning of the spring growing season and during the autumn growing season. For a likelihood of 90% the irrigation requirement varied between 32 and 143 mm and the number of irrigations between 3 and 20 times during the growing season.

Key-words: *Phaseolus vulgaris* L., Density probability function, water stress, Storage capacity of available water.

1 INTRODUÇÃO

O feijoeiro é cultivado em todas as partes do território brasileiro. Os grãos produzidos são muito consumidos no país, geralmente em combinação com o arroz, fonte de amido o que constitui um equilíbrio na dieta, pois o feijão é uma fonte acessível de proteína. O cultivo dessa leguminosa, na maioria das regiões, ocorre em pequenas propriedades, com áreas entre um a 50 ha, porém, há um crescente interesse para produção em áreas irrigadas e de maior extensão (EMBRAPA, 2003).

Apesar de sua grande importância para a maioria da população brasileira, a produção de feijão é variável entre os anos e comumente observam-se perturbações e inconstância no seu cenário comercial (DOURADO NETO & FANCELLI, 2000). A variação anual da produção pode ser devido ao desconhecimento em relação às condições meteorológicas ao longo do período produtivo e nos locais de produção.

A incerteza ou o desconhecimento das condições meteorológicas e da probabilidade de ocorrência de adversidades climáticas tem sido tema de constante preocupação no setor primário para que as principais decisões técnicas, econômicas, administrativas e políticas possam ser tomadas de forma adequada e em tempo hábil, o qual em muitos casos pode ser de meses ou anos antes da atividade ser efetuada.

A máxima produtividade e o máximo retorno econômico, com os cultivos agrícolas e demais empreendimentos agropecuários, dependem de inúmeros fatores, entre os quais se destaca a disponibilidade hídrica. Nas áreas não irrigadas, onde a condição hídrica é favorável, a disponibilidade de água está relacionada à ocorrência, frequência e quantidade de chuva, enquanto que, para as áreas irrigadas, o êxito está relacionado com o correto manejo da irrigação. Nos dois casos é importante conhecer as probabilidades de ocorrência de diferentes níveis de disponibilidades hídricas críticas para a cultura em questão.

A análise de risco de ocorrência dos fatores que causam estresse nas culturas agrícolas, condicionantes da produtividade e do retorno econômico, utilizando um intervalo curto de dados como, dia a dia, permite identificar níveis críticos que não

seriam verificados através de determinações em intervalos de tempo mais longos, como por exemplo, em períodos mensais ou decendiais.

Para descrever a complexidade das reações biológicas das diferentes plantas cultivadas às diferentes condições ambientais e inferir estatisticamente qual seria a produtividade das culturas em determinada condição ambiental, utiliza-se a modelagem do desenvolvimento das plantas cultivadas que é a descrição através da linguagem matemática (modelos matemáticos) das principais reações das culturas agrícolas aos principais fatores de variação do desenvolvimento da cultura. 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 descrição da variação temporal dos parâmetros utilizados no planejamento e manejo da irrigação pode ser realizada através da análise da distribuição e teoria das probabilidades.

Esta análise possibilita estimar a variabilidade temporal da necessidade de água dos principais cultivos agrícolas sob irrigação suplementar. A partir da relação entre o consumo de água e a disponibilidade de água ao longo do tempo, dado pelo balanço hídrico seqüencial diário, poder-se-ia conhecer a necessidade de irrigação para um dado nível de probabilidade risco.

O rendimento da cultura do feijoeiro no Brasil e, em particular, no Rio Grande do Sul é considerado baixo e seguramente pode ser aumentado com o entendimento das variáveis de ambiente que limitam o potencial de rendimento, o zoneamento de riscos climáticos e a adoção de práticas culturais que possibilitem melhor aproveitamento das condições disponíveis (MALUF et al., 2001).

O estresse hídrico é a principal variável ambiental que causa o baixo rendimento do feijoeiro. A leguminosa é uma espécie muito sensível a extremos ambientais, principalmente durante o florescimento em relação à temperatura e deficiência hídrica (BERGAMASCHI et al., 1988; FARIA et al., 1997; EMBRAPA, 2003). Isso ocorre devido às suas limitações anatômicas e fisiológicas, ou seja, pela baixa capacidade de recuperação após a deficiência hídrica e também pelo sistema radicular pouco

desenvolvido (GUIMARÃES, 1988). A ocorrência de deficiência hídrica no Rio Grande do Sul para o feijoeiro é freqüente, podendo se esperar redução no rendimento de grãos desta cultura em duas a cada dez safras (MATZENAUER et al., 2004).

Para minimizar o risco de ocorrência de deficiência hídrica é necessário desenvolver metodologias visando à estimativa confiável das necessidades de água, para melhor entender as relações hídricas do sistema solo-planta-atmosfera, planejar a época de semeadura, aperfeiçoar o zoneamento agroclimático e para a elaboração de projetos de irrigação (MATEZENAUER et al., 1999). Os valores médios não são adequados para esse fim, pois mascaram os efeitos das condições extremas.

Determinando-se as exigências hídricas é possível quantificar a necessidade de irrigação, definir a área total do projeto, considerando-se os recursos hídricos disponíveis, dimensionar estruturas de armazenamento e distribuição da água e elaborar recomendações de manejo visando à racionalização e economia no uso da água, de equipamentos, de mão de obra e energia (DOORENBOS & PRUITT, 1977; SILVA et al., 1988).

O manejo da irrigação, ou seja, o nível de umidade do solo que determina o momento de irrigar, 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. Portanto, são necessários estudos para determinar os valores de lâmina de água, número de irrigações requeridas e respectivas probabilidades, essenciais na elaboração de projetos de irrigação e análise da viabilidade econômica de implantação da irrigação.

Com aplicação da técnica da modelagem de desenvolvimento e crescimento das culturas em diferentes condições meteorológicas locais e para os solos da região, possibilita estimar a provável lâmina de água e o provável número de irrigações para qualquer época de semeadura.

Assim, o objetivo desse trabalho foi determinar os valores mais prováveis de duração dos subperíodos do ciclo, de lâmina de irrigação e do número de irrigações necessários para feijão semeado em diferentes épocas, considerando-se a capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) dos principais solos da região Central do Rio Grande do Sul.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Temperatura do ar e o ciclo de desenvolvimento do feijoeiro

A temperatura do ar e a deficiência hídrica, são os fatores que mais afetam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade do feijoeiro (BERGAMASCHI et al., 1988; FARIA et al., 1997; EMBRAPA, 2003). A faixa de temperatura do ar ideal para o cultivo do feijoeiro, segundo Embrapa (2003), está próxima de 29°C, durante o dia, e de 21°C durante a noite. Conforme Maluf et al. (2001), a temperatura ideal para o feijoeiro situa-se entre 20 e 22°C, sendo a temperatura ótima igual a 21°C. Valores de temperatura máxima do ar entre 30 e 40°C causam danos às plantas de feijão, principalmente abortamento de flores (GONÇALVES et al., 1997; CARAMORI et al., 2001; EMBRAPA, 2003). A variação dos valores de temperaturas cardinais, observada entre as referências, provavelmente se deve ao fato de existirem diferentes materiais, com ampla variação genética, os quais se adaptam às diferentes regiões de cultivos, em todo Brasil.

Para entender melhor a relação da temperatura do ar com o ciclo do feijoeiro é importante conhecer a variabilidade genética existente entre os materiais cultivados. No Brasil existem inúmeros materiais, com diferentes características. Porém, estes podem ser agrupados, de uma maneira geral, conforme o hábito de crescimento. Dourado Neto & Fancelli (2000) consideram três grupos de hábitos de crescimento de feijoeiro: tipo I, tipo II e tipo III, os quais abrangem a maioria dos genótipos cultivados no Brasil. O tipo I apresenta plantas com crescimento determinado, eretas, de altura entre 25 e 50 cm, com haste principal e ramos laterais terminando em inflorescências e de ciclo curto (85 dias em média). O tipo II apresenta plantas de crescimento indeterminado, aspecto arbustivo, de crescimento pouco inclinado e com ramificações não-numerosas e curtas, e ciclo com duração média de 90 dias. O tipo III apresenta plantas de hábito de crescimento indeterminado e prostrado ou semiprostrado, com numerosas ramificações,

com hábito trepador e duração média do ciclo de 105 dias. O período compreendido entre o aparecimento dos botões florais e o aparecimento das primeiras vagens cheias para o tipo I inicia aos 23 dias após a emergência (DAE) e termina aos 44 DAE; para o tipo II está compreendido entre 27 e 50 DAE, e para o tipo III, entre 30 e 53 DAE (DOURADO NETO & FANCELLI, 2000).

Considerando-se a duração dos subperíodos do ciclo de desenvolvimento pode-se ter muitas variações. Pompeu (1993), reunindo informações obtidas em 2216 introduções de cultivares estudadas na Colômbia, pelo Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), relatou o tempo de cinco a 12 dias para semeadura-emergência, 29 a 72 dias da semeadura até o florescimento e 61 a 110 dias para o ciclo completo. Relatos semelhantes são encontrados na literatura brasileira. Barbano et al. (2001) estudaram a influência da temperatura na duração do ciclo do feijoeiro e de seus subperíodos, para duas cultivares (IAC Carioca e IAC-Una), durante seis cultivos e em oito municípios do Estado de São Paulo. Barbano et al. (2001) encontraram variação de seis a 13 dias para o subperíodo semeadura-emergência, variações entre 33 e 52 dias para emergência-floração, de 31 a 62 dias para floração-colheita e entre 73 e 116 dias para o ciclo total. Burato et al. (2007) estudaram 20 genótipos considerados precoces no Paraná, encontrando valores entre 28 e 43 dias e entre 54 e 88 dias para o intervalo entre a emergência e o aparecimento da primeira flor e para o intervalo entre a emergência e a maturação fisiológica, considerada quando haviam duas ou menos vagens verdes por planta. Para o Rio Grande do Sul, Ribeiro et al. (2004) estudaram o ciclo de 133 genótipos de feijão, 41 do grupo comercial "Preto" e 92 do grupo comercial "Carioca", cultivados durante três anos em Santa Maria. Esses autores observaram, para o grupo preto, uma amplitude de duração do subperíodo emergência-floração de 14 a 43 dias, sendo que a maioria dos genótipos (em torno de 75%) teve duração desse subperíodo variando entre 32 e 40 dias. Para o grupo Carioca foi observado uma oscilação entre 29 e 45 dias, com a maioria (em torno de 75%) dos genótipos com duração do subperíodo emergência-floração entre 32 e 41 dias. Para a duração do ciclo observaram-se variações entre 70 e 82 dias e 68 e 85 dias para os feijões dos grupos Preto e Carioca, respectivamente (RIBEIRO et al., 2004).

No intuito de quantificar a interação entre o genótipo e o ambiente e tomar uma medida invariável de duração do ciclo e/ou de suas etapas, ou com pouca variação, entre épocas de semeadura e locais, modeladores tem assumido o conceito de unidade térmica. Esse conceito considera a temperatura do ar como uma quantificação da energia disponível que desencadeia estímulos, ativando ou desativando funções vitais das plantas (DOURADO NETO, 2002).

Diferentes modelos que utilizam a soma térmica para simular o ciclo do feijoeiro são encontrados na literatura (MASSIGNAM et al., 1998; WUTKE et al., 2000; MEDEIROS et al., 2000; BARBANO et al., 2001, entre outros). Porém, há evidências (SILVA et. al., 2004, MASSIGNAM et. al., 1998) da existência de outros fatores que também influenciam na duração do ciclo do feijoeiro, principalmente nas cultivares de grãos pretos, as mais cultivadas no RS e ainda pouco estudadas quanto à este aspecto.

Massignam et al. (1998) determinaram os valores de temperatura base, para o subperíodo emergência-floração, de 3°C e -2°C para as cultivares Carioca 80 e Rio Tibagi, respectivamente. A justificativa para os valores de temperatura base encontrados não coincidirem com os valores de temperatura base do feijoeiro citados na literatura, dada pelos autores, é que esses são meramente valores estatísticos utilizados nos modelos. Esse fato corrobora a especulação de que existem outros fatores determinantes na duração dos subperíodos e do ciclo, não considerados por esses autores.

Apesar de não haver comprovação científica quanto à influência do fotoperíodo na duração do ciclo do feijoeiro para as cultivares utilizadas no Brasil, e de haver citações de que não há essa influência para as cultivares brasileiras (VIEIRA & MASSIGNAM, 1992), há provas da influência do fotoperíodo no feijoeiro, encontradas na literatura internacional para cultivos em outros locais. Kornegay et al. (1993) e White et al. (1996), verificaram que, conforme o genótipo, o ciclo do feijoeiro pode ser influenciado pela temperatura do ar e pela variação do fotoperíodo. A partir disso, classificaram o feijoeiro conforme a resposta à temperatura e ao fotoperíodo em três grupos distintos: neutro, intermediário e sensível, considerando a cultura como planta de dia curto. Wallace & Yan (1998) criaram um modelo matemático baseado na

interação genótipo x temperatura x fotoperíodo para calcular a duração dos subperíodos. A análise da herança genética ligada ao fotoperíodo, realizada por Gu et al. (1998), confirmou a existência de dois loci que afetam significativamente a resposta do feijoeiro ao fotoperíodo, em câmara com condições controladas, com quatro cruzamentos, de genótipos dos diferentes centros de origem (Andino e Meso-americano). Em virtude do exposto, se justificam linhas de pesquisa com o objetivo de elucidar a influência do ambiente na fenologia do feijoeiro, para vários genótipos, principalmente para cultivares recém disponibilizados para cultivo.

2.2 Consumo de água do feijoeiro e necessidade de irrigação

O consumo de água pelas plantas cultivadas depende da época do ano e local de semeadura, cultivar, condições edafoclimáticas, estágio de desenvolvimento da cultura e manejo da cultura (MOREIRA et al., 1996).

A variação do consumo de água das culturas, conforme a época do ano, está relacionada à flutuação anual dos elementos meteorológicos que definem a demanda atmosférica. A radiação solar, a temperatura, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento são os elementos meteorológicos que determinam o consumo de água das plantas. Por ocorrerem variações desses elementos em diferentes locais e épocas do ano, é natural que também ocorram variações no consumo de água das plantas. Stone & Silveira (1995) encontraram valores médios de 4,6; 4,8; 5,5; 6,7 e 6,5 mm dia⁻¹ de evapotranspiração máxima (E_m) para a cultura do feijoeiro, cultivado na localidade de Santo Antônio de Goiás, semeado nos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro, respectivamente. Oliveira & Villa Nova (1996) encontraram para cinco municípios do Estado do Paraná, variações na lâmina de irrigação necessária para o feijoeiro, conforme a época do ano e o local de cultivo, em virtude da variação geográfica da capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) dos solos. O aumento da necessidade de irrigação com o avanço das datas de semeadura, ao longo a primavera, é provocado pelo aumento da E_m em função do aumento na energia radiante

disponível. Variações na ET_m do feijoeiro em função da época de semeadura também foram relatadas por Matzenauer et al. (1999) para Taquari, RS.

Considerando-se as características das plantas, sabe-se que o índice de área foliar (IAF) está diretamente relacionado ao consumo de água. Santos & André (1992) determinaram a proporcionalidade entre o coeficiente de cultura (K_c) e o IAF durante todo o ciclo do feijoeiro. Stone & Pereira (1994) encontraram diferenças nos valores do coeficiente de cultura (K_c) entre três cultivares, devido às suas características de hábito de crescimento, com diferenças no consumo de água em todo ciclo.

O IAF é afetado pela densidade de cultivo, pois quanto maior for a densidade de plantas, maior será a cobertura do solo e o IAF, portanto é lógico admitir que o consumo de água é também uma função do espaçamento e densidade de semeadura. Stone & Pereira (1994), concluíram que o consumo médio de água foi menor para o espaçamento de 0,5 m, entre linhas de plantas, em comparação com o espaçamento de 0,3 m, mantendo-se constante o estande de 15 plantas por metro linear. Dados semelhantes foram encontrados por Mack & Varseveld (1982) e por Guimarães et al. (1982).

Outro aspecto de manejo que deve ser considerado, além do espaçamento entre as plantas, é o manejo da cobertura morta sobre o solo. No início do ciclo, quando as plantas de feijão não cobrem totalmente o solo, a evaporação da água no solo é predominante em relação à transpiração (BERLATO & MOLION, 1981). Quando há a presença de restos vegetais (ou cobertura morta) sobre o solo, ocorre atenuação no processo de aquecimento do solo e, com menos energia disponível, redução na evaporação (BERLATO & MOLION, 1981).

Comparando-se os valores de K_c obtidos para o cultivo convencional (STEINMETZ, 1984) com os valores obtidos para o plantio direto (STONE & SILVA, 1999), observa-se uma economia aproximada de 30% de água em todo ciclo, no plantio direto. Stone & Silveira (2003) relataram evapotranspiração de 310 mm e 231 mm em todo ciclo do feijoeiro cultivado no preparo convencional do solo e no plantio direto, respectivamente, o que representa uma diferença de 79 mm (25%).

Quanto ao nível de cobertura do solo pela palhada, Moreira (1999) observou diminuição significativa no número de irrigações à partir de 50% de cobertura. Andrade

(2001) verificando essa influência no consumo de água do feijoeiro cultivado em diferentes níveis de cobertura do solo com palha de sorgo (0, 25, 50, 75 e 100%), demonstrou que a evapotranspiração da cultura (ET_c), durante todo ciclo, diminui linearmente com o aumento da cobertura percentual (c) do solo (ET_c = - 0,8392 c + 274,8; R² = 0,952) aumentando assim a eficiência das plantas no uso da água com a diminuição da evaporação.

O consumo de água do feijoeiro em todo ciclo varia entre 300 e 500 mm, para ciclos com duração entre 60 e 120 dias (DOORENBOS & KASSAN, 1994), mas valores inferiores foram relatados, como em Faria (1989) que encontrou valores de consumo de água entre 270 e 360 mm para ciclos de 90 dias, Bergamaschi et al. (1989); Andreatta et al. (1991); Maluf & Caiaffo (1999) que obtiveram valores entre 300 e 400 mm para ciclos de 90 a 110 dias e os valores entre 230 e 360 mm para ciclos com duração entre 80 e 87 dias, em Matzenauer et al. (1999).

A irrigação será necessária quando o consumo de água da planta não puder ser atendido pela água da chuva armazenada no solo. Oliveira & Villa Nova (1996) encontraram variação entre 97 e 228 mm para valores médios de lâmina de irrigação requerida em diferentes localidades do Paraná. No Rio Grande do Sul, foram relatadas deficiências hídricas para anos secos, durante todo ciclo, maiores que 300 mm no município de Júlio de Castilhos, e valores médios de deficiência hídrica entre 38 e 97 mm para a Região do Planalto Médio (MATZENAUER et al., 2004).

Kelling (1995) trabalhando com a cultivar “BR/IPAGRO1 – MACANUDO” em Santa Maria, RS, em solo São Pedro (Argissolo Vermelho distrófico arênico), utilizando três níveis de irrigação, constatou diferenças consideráveis entre os valores de evapotranspiração real (ET_r) e consumo médio diário de água. Determinou 349,8 mm, 293,4 mm e 199,2 mm de ET_r durante todo o ciclo da cultura e 5,74 mm, 4,81 mm e 3,27 mm de consumo médio diário para os três tratamentos de irrigação submetidos a potenciais matriciais máximos de - 40 kPa, - 80 kPa e sem irrigação, respectivamente.

As plantas suportam deficiências hídricas, desde que não severas e não prolongadas, com pouca redução no rendimento de grãos; essa maior ou menor tolerância depende das condições fisiológicas das plantas e do subperíodo em que a deficiência ocorre (DOORENBOS & KASSAN, 1994; FRIZZONE et al., 2005).

A maior ou menor redução na produção de grãos, devido ao estresse hídrico, acontecerá de acordo com o momento de ocorrência, volume e intervalo de tempo entre as chuvas e/ou irrigações. Portanto, a irrigação deve ser manejada de forma que não ocorram aplicações excessivas em determinados subperíodos do ciclo em que a necessidade de água é reduzida ou que as plantas possam se recuperar do estresse e manejada para não ocorrer deficiências nos momentos do ciclo em que o rendimento é altamente influenciado pela deficiência hídrica (DOORENBOS & KASSAN, 1994).

Maluf et al. (2001) consideraram o Índice de Satisfação da Necessidades de Água (ISNA), que é a relação $E_{Tr} E_{Tm}^{-1}$, como favorável à produção do feijoeiro quando $ISNA > 0,6$, intermediário quando ISNA estiver entre 0,5 e 0,6 e desfavorável quando $ISNA < 0,5$, utilizando-os dessa forma no Zoneamento de Riscos Climáticos para a cultura de feijão no Rio Grande do Sul.

2.3 Funções de distribuição de probabilidade em estudos agrometeorológicos

As funções de distribuição de probabilidades (fdp) podem ser utilizadas em agrometeorologia para caracterizar a distribuição de dados de uma variável, analisar a probabilidade de ocorrência desta e quando se dispõe de um grande número de dados, detalhar os estudos climatológicos, através da previsão da ocorrência de determinado evento, com certo nível de probabilidade.

Existem diversas funções de distribuições de probabilidade para variáveis aleatórias discretas e contínuas. Para variáveis aleatórias discretas as funções mais conhecidas são Bernoulli, binomial, binomial negativa, hipergeométrica, geométrica e Poisson. Para variáveis aleatórias contínuas são utilizadas distribuições uniforme, normal, log-normal, gamma, valores extremos ou Gumbel, Weibull, exponencial, beta, chi-quadrado, t de Student, F de Snedecor, entre outras (CARGNELUTTI FILHO et al., 2004).

A escolha de uma ou outra fdp está relacionada à quantidade e tipo dos dados. Algumas fdps se ajustam melhor a um pequeno número de dados, outras requerem

uma grande série de observações. A flexibilidade de uma fdp está associada ao número de parâmetros de sua equação, funções com maior flexibilidade podem assumir diferentes formas, enquadrando-se com melhor ajuste em um número maior de situações (CATALUNHA et al., 2002).

O uso das fdps para estudar a distribuição de dados meteorológicos é mais freqüentemente relatado para a distribuição de dados de precipitação. Dentre as diversas fdps existentes, a função gamma é a mais comum (SEDIYAMA et al., 1978; SAAD, 1990; ASSIS, 1991; CASTRO, 1994; RIBEIRO & LUNARDI, 1997; WILKS, 1999; BOTELHO & MORAIS, 1999; ANDRADE JÚNIOR et al., 2001; ARAÚJO et al., 2001 e CASTELLVÍ et al., 2004), porém outras fdps podem apresentar melhor ajuste que a função gamma, pois existem variações de acordo com o regime pluviométrico do local em estudo, segundo o conjunto de dados (médio, total, absoluto, máximo, mínimo) e conforme o período de tempo utilizado para a separação dos dados (LYRA et al., 2006; SILVA et al., 2007).

Barger & Thom (1949) recomendaram a fdp gamma para estudar a distribuição da precipitação para períodos mensais ou menores ou, até mesmo, para períodos maiores, em regiões onde é comum a ocorrência de valores baixos de precipitação. No entanto, Catalunha et al. (2002), testaram as fdps exponencial, gamma, log-normal, normal e Weibull, para os dados de chuva no estado de Minas Gerais e verificaram predominância das funções Weibull, gamma e exponencial. Quando foram considerados totais decendiais e totais mensais, a função mais significativa foi a exponencial e nas estimativas para dados diários, separados por decêndio e por mês, a função Weibull apresentou melhor ajuste. As fdps Weibull e gamma também foram as que tiveram ajuste com mais freqüência aos dados diários de precipitação, separados por mês, para Santa Maria, RS, com melhores ajustes para a função Weibull (SILVA et al., 2007).

Para a distribuição de valores de intensidade de precipitação a função mais comum é a função extrema do tipo I, também conhecida como função Gumbel (PALYNCHUK & GUO, 2008). Eltz et al. (1992) utilizaram essa fdp, para determinar o período de retorno de chuvas para a região de Santa Maria, RS, com base em 27 anos de dados máximos anuais de intensidade de precipitação, registrados na localidade de

Boca do Monte. Para valores máximos e mínimos de totais mensais de precipitação Damé et al. (1996) encontraram resultados semelhantes, para municípios da região Sul do Rio Grande do Sul.

As fdps também foram utilizadas para estudar eventos como a ocorrência de geada. Silva & Sentelhas (2001) utilizaram as fdps gamma, log-normal e normal para estudar a probabilidade de ocorrência de níveis de diferença entre a temperatura mínima do ar medida no abrigo e na relva em eventos de geada, para oito municípios de Santa Catarina. A escolha das fdps baseou-se na significância do teste do chi quadrado e variou de município para município, ou seja, não foi escolhida a mesma fdp para os oito municípios estudados.

A probabilidade de ocorrência de granizo no RS também foi determinada utilizando-se as fdps. Berlato et al. (2000) utilizaram os dados mensais de ocorrência de granizo registrados em 37 estações da rede de estações meteorológicas do 8º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (8º DISME/INMET). Verificaram que 80% das estações tiveram seus dados sazonais ajustados à distribuição de Poisson, mostrando que essa função é adequada para o cálculo de probabilidade de granizo nas quatro estações do ano no Estado do Rio Grande do Sul.

Em estudos da ocorrência de dias com temperatura do ar acima ou abaixo de determinados níveis no RS, Buriol et al. (1998) e Estefanel et al. (1994) utilizaram a distribuição Binomial Negativa e Poisson na determinação da probabilidade de ocorrência de dias com temperaturas mínimas do ar prejudiciais à fecundação das flores de arroz e das probabilidades de ocorrência de dias com temperatura máxima do ar prejudicial aos cultivos agrícolas, respectivamente. Hoffmann et al. (1994), estudando a frequência da primeira data do outono e última data da primavera, com temperatura do ar menor ou igual a 0°C em Pelotas-RS, concluíram que a distribuição de frequência das datas segue a distribuição Normal. A fdp Normal também foi utilizada para a temperatura média diária do ar por Sedyama et al. (1978) e Assis et al. (2004).

Para quantificar a distribuição dos dados de radiação solar a fdp que apresenta melhor ajuste é a função normal (ASSIS et al., 2004), também relatada por Cargnelutti Filho et al. (2004) para dados de radiação solar global média decendial, em 22 municípios do Estado do Rio Grande do Sul. Buriol et al. (2001) avaliaram o ajuste dos

dados do número de dias com radiação solar, abaixo de determinados níveis, medidos na região do baixo Vale do Taquari - RS, separados por decêndio, às distribuições Binomial Negativa e Poisson, e concluíram que a distribuição de Poisson possui melhor ajuste.

Saad & Scaloppi (1988) e Saad (1990) afirmam que a fdp normal pode ser empregada para a distribuição da evapotranspiração potencial, porém este ajuste depende de uma série histórica de no mínimo 20 anos para uma previsão adequada (SOUSA & FRIZZONE, 1997). As fdps gamma e beta também foram utilizadas para a evapotranspiração de referência (MARQUES et al., 1995) com ajuste bom aos dados.

Outras variáveis que também seguem a distribuição normal são a deficiência hídrica diária relativa à evapotranspiração de referência (SOUSA & FRIZZONE, 1997) e a lâmina de irrigação necessária ao feijoeiro (OLIVEIRA & VILLA NOVA, 1996) e a lâmina de irrigação para o feijão-caupi (FRIZZONE et al., 2005). Para a deficiência hídrica no solo é possível utilizar as fdps exponencial, gamma, log-normal e Weibull, porém melhores resultados foram encontrados com a função gamma (CARDOSO, 2005; SILVA, 2005).

Segue uma breve descrição das principais funções de densidade de probabilidade e suas funções de distribuição acumuladas ajustadas e testadas.

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, que neste caso, foi a DHS, e é base do logaritmo neperiano (2,718281828...) e λ é o parâmetro escalar, estimado pela média dos valores de x.

A distribuição com função gamma é um caso particular da distribuição de Pearson do Tipo III, com parâmetro de localização igual à zero (THOM, 1958). Sendo x for uma variável aleatória contínua com valores maiores que zero, com distribuição gamma 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 β e α são o parâmetro de escala e o parâmetro de forma da variável aleatória contínua x e $\Gamma(\alpha)$ é a função gamma incompleta do parâmetro α (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; μ a média dos logaritmos da variável x ; σ 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 (μ), variância (σ^2) e desvio-padrão (σ), 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 (β) e de forma (α), é dada por (RIBEIRO JÚNIOR, 2004):

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

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição do local de estudo

A região de estudo abrange integralmente os municípios de Santa Maria, São Pedro do Sul, Dilermando de Aguiar, São Martinho da Serra, Itaara, Silveira Martins, São João do Polêsine, Restinga Seca, Formigueiro, localizados na área de abrangência da Estação Meteorológica Principal de Santa Maria (EMPSM), e parte dos municípios de São Sepé, Santa Margarida do Sul, São Gabriel, Cacequi, Júlio de Castilhos, Ivorá e Faxinal do Soturno (Figura 2).

A área utilizada está localizada na área de abrangência da EMPSM, definida em Cardoso (2005), entre as coordenadas de 29° 23' 15" S e 30° 22' 17" S, 54° 32' 07" W e 53° 05' 20" W, totalizando aproximadamente 8000 Km² (Figura 1).

A maior parte dessa área situa-se na meso-região fisiográfica denominada de Depressão Central do RS. Essa região possui diversidade de tipos de solos, em virtude principalmente da diversidade de materiais de origem. É delimitada pelo Planalto Arenito-basáltico, pela Campanha, pelas Serras do Sudeste e Planície Litorânea, regiões com diferentes características quanto ao relevo e altitude. A maior parte da superfície dessa região é ocupada pelos Planossolos, unidades de mapeamento Vacacaí e São Gabriel, seguido dos Argissolos (Alto das Canas, Júlio de Castilhos, Oásis e São Pedro), Alissolo (Santa Maria) e demais solos (Neosolo, Chernossolo, Luvisolo e Latossolo), ocupando aproximadamente 34%, 33%, 18% e 15% da área, respectivamente (Tabela 1).

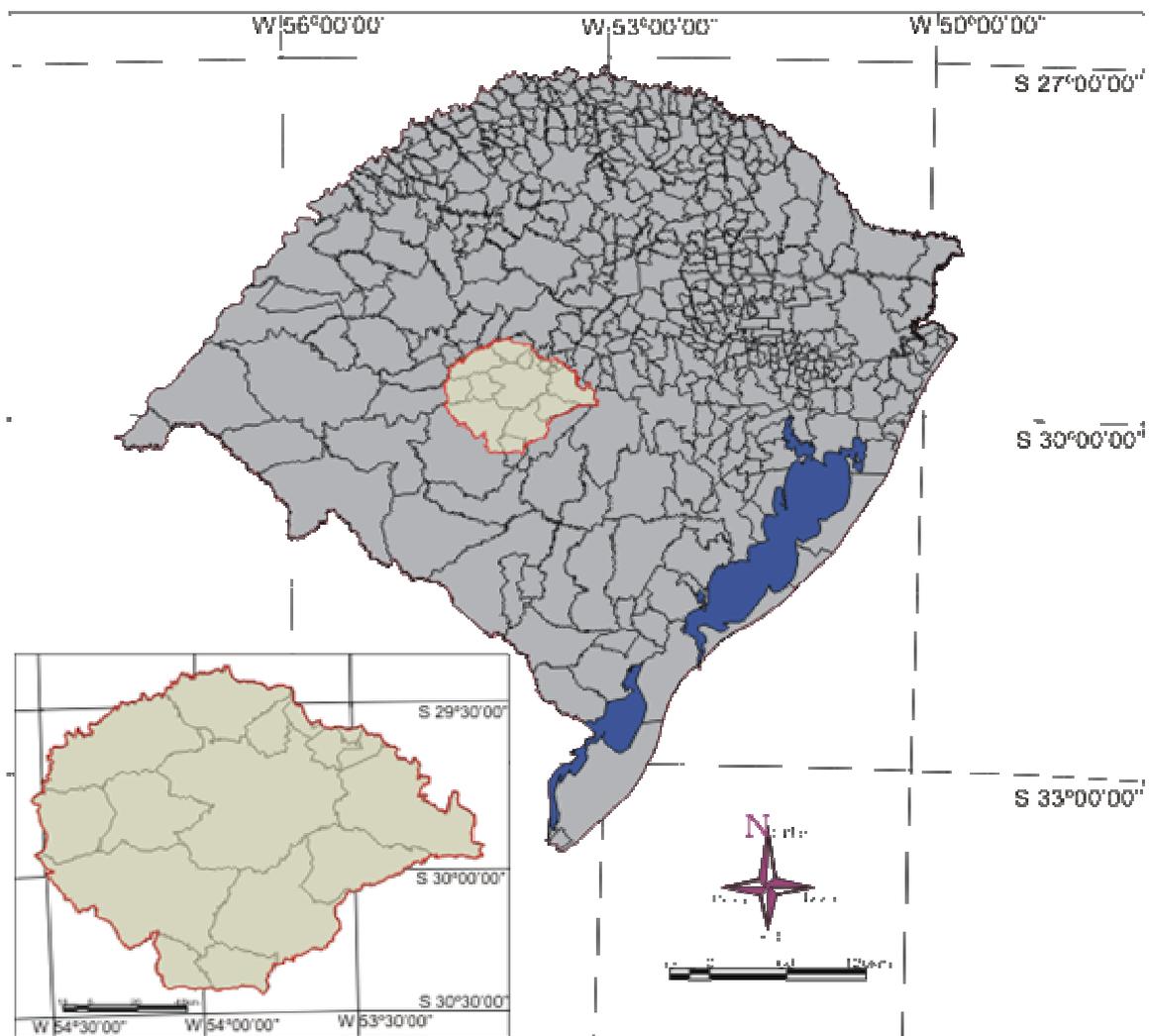


Figura 1 - Localização da área de abrangência do estudo, na região central do Rio Grande do Sul.

FONTE: Macrozoneamento Agroecológico e Econômico do Rio Grande do Sul (Secretaria da Agricultura e Abastecimento 1994, extraído de CARDOSO, 2005).

Tabela 1 – Área ocupada pelas diferentes unidades de mapeamento e respectivas classes dos solos na região de estudo.

Unidades de Mapeamento	Área (ha)	Área (%)	Classificação
Santa Maria	145356	18,10	Alissolo Hipocrômico argilúvico típico
São Pedro	203047	25,28	Argissolo vermelho distrófico arênico
Júlio de Castilhos	22827	2,84	Argissolo vermelho-amarelo alumínico típico
Oásis	3158	0,39	Argissolo vermelho-amarelo alumínico alissólico
Alto das Canas	33012	4,11	Argissolo vermelho distrófico latossólico
Venda Grande	35871	4,47	Chernossolo Argilúvico órtico saprolítico
Ciríaco-			Chernossolo Argilúvico férrico típico -
Charrua*	50551	6,29	Neossolo Litólico Eutrófico Chernozêmico
Cerrito	3764	0,47	Latossolo Vermelho Distrófico Argissólico
Cambaí	11582	1,44	Luvissolo Crômico órtico típico
Guassupi	20857	2,60	Neossolo Litólico Distrófico típico
Vacacaí	210797	26,24	Planossolo Hidromórfico Eutrófico Arênico
São Gabriel	62382	7,77	Planossolo Háplico Eutrófico típico

FONTE: CARDOSO (2005); *Os solos Ciríaco e Charrua ocorrem em associações por isso foram quantificados conjuntamente.

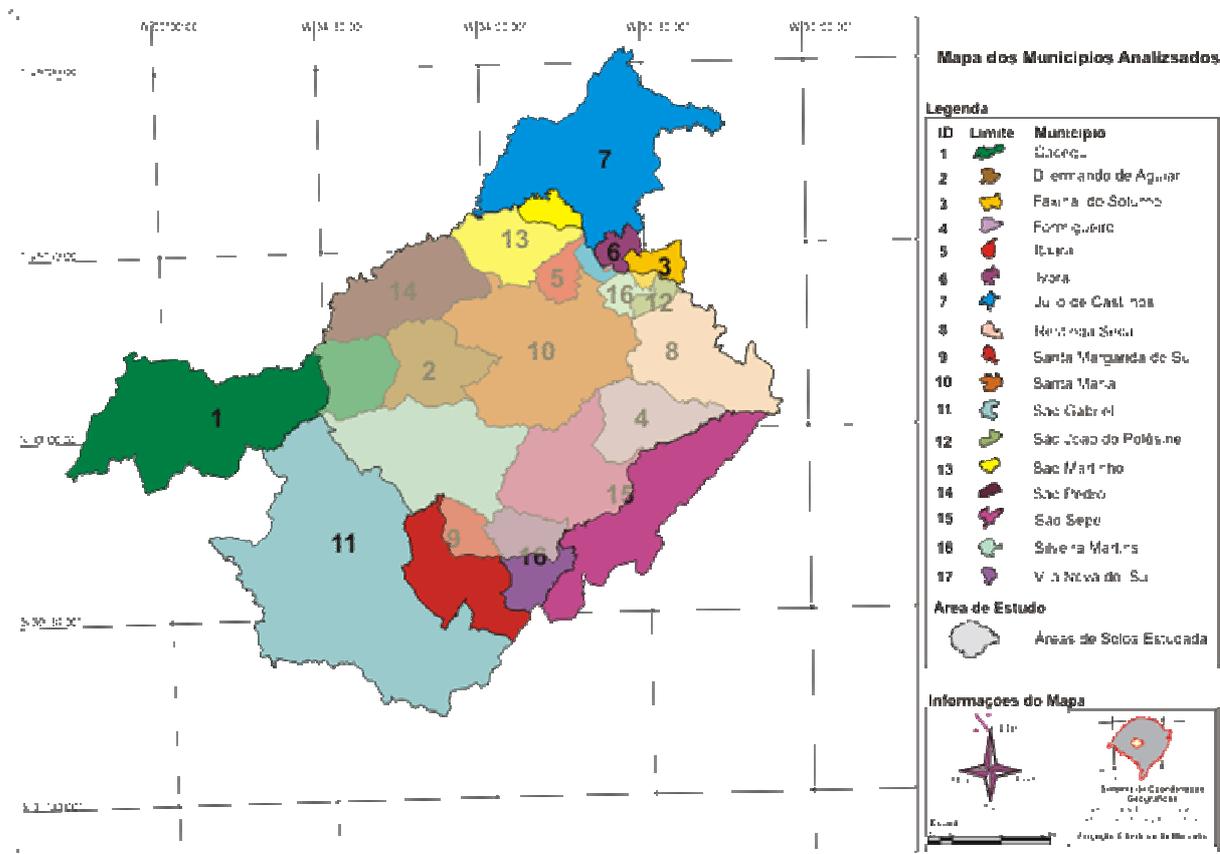


Figura 2 - Municípios da região central do Rio Grande do Sul, com destaque (em tom mais claro) da área de abrangência da Estação Meteorológica de Santa Maria considerada no estudo das necessidades de irrigação mais prováveis. FONTE: Cardoso (2005)

Na região de estudo podem ocorrer deficiências hídricas, principalmente durante o período de maior demanda evapotranspiratória, de setembro a abril, pois a precipitação normal varia pouco ao longo do ano (BURIOL et al., 2006), porém ocorre aumento da evapotranspiração, o que é evidenciado através dos valores médios dos elementos do balanço hídrico seriado diário, realizado para capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) de 100 mm, a partir da soma mensal dos valores de evapotranspiração e precipitação do banco de dados meteorológicos, para o período de 1968 até 2006 (Figura 3).

Observando-se a diferença entre a evapotranspiração potencial (ETP) e a evapotranspiração real (ETR) e considerando o fato de que a maioria dos solos da região de estudos possui CAD menor do que 100 mm e que a profundidade do solo explorada pelo sistema radicular varia ao longo do ciclo, o que reduz ainda mais a água disponível à planta, evidencia-se a necessidade da avaliação da irrigação e quantificação desta para as diferentes épocas de semeadura e para os diferentes solos, com base no balanço hídrico seriado diário para cada solo da região.

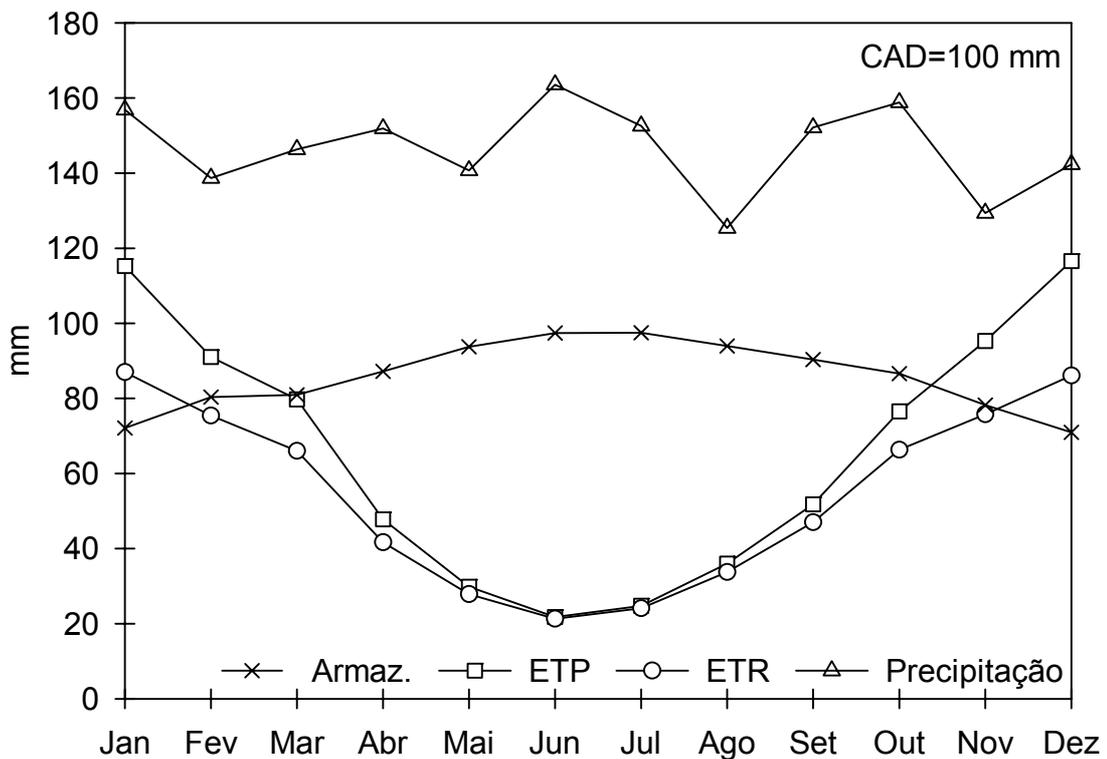


Figura 3 – Média dos elementos do balanço hídrico seriado calculado para o período de agosto de 1968 a junho de 2006, para Santa Maria, RS, considerando uma capacidade de armazenamento disponível no solo igual a 100 mm.

3.2 Processamento das variáveis meteorológicas e determinação do manejo de irrigação

Os cálculos foram realizados de forma seriada utilizando-se dados diários de evapotranspiração, calculada pelo método de Penman, precipitação pluviométrica diária e a capacidade de armazenamento de água disponível do solo (CAD), considerando sua variação em função do tipo de solo e em função do desenvolvimento das plantas do feijoeiro simulado para as diferentes épocas de semeadura.

Do banco de dados da estação climatológica, foram utilizadas todas as variáveis necessárias para a realização da simulação de desenvolvimento das culturas e para a realização do cálculo do balanço hídrico (Tabela 2).

Tabela 2 – Variáveis meteorológicas utilizadas na simulação do desenvolvimento do feijoeiro e para o cálculo do balanço hídrico diário do solo.

Variável	Descrição
T_{\min}	Temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$)
T_{\max}	Temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$)
T_9	Temperatura do ar medida às 9 horas ($^{\circ}\text{C}$)
T_{15}	Temperatura do ar medida às 15 horas ($^{\circ}\text{C}$)
T_{21}	Temperatura do ar medida às 21 horas ($^{\circ}\text{C}$)
UR_9	Umidade relativa do ar das 9 horas (%)
UR_{15}	Umidade relativa do ar das 15 horas (%)
UR_{21}	Umidade relativa do ar das 21 horas (%)
U_{05}	Velocidade do vento a 0,5 m acima do solo (m dia^{-1})
U_2	Velocidade do vento a 2 m acima do solo (m dia^{-1})
U_{10}	Velocidade do vento a 10 m acima do solo (m dia^{-1})
N	Insolação diária (horas)
P	Precipitação pluviométrica (mm)
EvP	Evaporação no evaporímetro de Piche (mm)

Utilizando-se estes dados foram calculadas as médias diárias de temperatura e umidade relativa do ar, da pressão parcial e de saturação de vapor d'água do ar e do déficit de saturação do ar, conforme equações descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Variáveis meteorológicas calculadas a partir dos dados meteorológicos e respectivas funções matemáticas.

Variáveis	Equação
1. Temperatura média (°C)	$T_m = 0,2(T_9 + T_{\max} + T_{\min} + 2T_{21})$
2. Umidade relativa média (%)	$UR_m = 0,25(UR_9 + UR_{15} + 2UR_{21})$
3. Pressão de saturação (hPa)	$e_s = 6,1070 \exp\left(\frac{17,2694 \cdot T_m}{237,3 + T_m}\right)$
4. Pressão parcial de vapor (hPa)	$e = 0,01 e_s UR_m$
5. Déficit de saturação do ar (hPa)	$d = e_s - e$
6. Tangente à curva de saturação (hPa °C ⁻¹)	$\Delta = \frac{409,8 e_s}{(T_m + 237,3)^2}$
7. Densidade de fluxo da radiação global incidente (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	$R_g = K_o \downarrow (b_o + b_1 n N^{-1})$
8. Balanço de radiação de ondas longas (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	$L^* = -\varepsilon \sigma (T_m + 273)^4 [0,56 + 0,09 (0,75e)^{0,5}] (0,1 + 0,9n N^{-1})$
9. Saldo de radiação (MJm ⁻² dia ⁻¹)	$Q^* = R_g(1 - r) + L^*$
10. Evapotranspiração de referência (mm dia ⁻¹)	$ET_o = \frac{\Delta Q^*}{\Delta + \gamma L} + \frac{\gamma 900}{(\Delta + \gamma)(T_m + 275)} U_2 d$
11. Evapotranspiração máxima de cultura (mm dia ⁻¹)	$ET_m = K_c ET_o$

Sendo: Δ é a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água para a temperatura média diária T_m (kPa °C⁻¹), ε a emissividade do gramado (0,95); σ a constante de Stefan-Boltzmann ($4,9861 \cdot 10^{-9}$ MJl m⁻² dia⁻¹ K⁻⁴); r a refletividade do gramado (0,23); γ a constante psicrométrica (0,0662 kPa.°C⁻¹); U_2 a velocidade média diária do vento a 2 m de altura (m s⁻¹), d o déficit de saturação do ar (kPa) e L o calor latente de evaporação (2,5 MJ Kg⁻¹); K_c o coeficiente de cultura.

As estimativas de temperatura média (T_m) e umidade relativa média (UR_m) do ar foram calculadas pelos métodos do 8º DISME, a pressão de saturação foi calculada pela equação de Tétens (MURRAY, 1967) com coeficientes ajustados conforme Fischer et al. (1987) e a densidade de fluxo da radiação global incidente (R_g) foi estimada

através da equação de Ångström-PreScott (equação 7), sendo $Ko\downarrow$ a densidade de fluxo da radiação solar global incidente no topo da atmosfera ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$), b_0 e b_1 os coeficientes mensais ajustados para Santa Maria por Estefanel et al. (1990), n a insolação diária registrada com heliógrafo ($h\ dia^{-1}$) e N é o comprimento do dia ($h\ dia^{-1}$) calculado em função da declinação solar e da latitude local. O saldo de radiação foi estimado pela equação de Brunt–Penman (BERLATO & MOLION, 1981).

Na estimativa da evapotranspiração de referência, para o período em que não houve ausência de dados de vento, foi utilizado o método de Penman-Monteith, conforme Pereira et al. (1997). Para o período com ausência de dados de velocidade do vento foi usada a equação de Penman (VAREJÃO SILVA, 2000), com um ajuste no termo aerodinâmico, através da evaporação medida no evaporímetro de Piche (EvP , $mm\ dia^{-1}$) e do déficit de saturação do ar (hPa), conforme Alberto et al. (2002).

A equação utilizada para a estimativa da ET_o , quando não se dispunha de dados de vento, foi:

$$ET_o = \frac{\frac{\Delta Q^*}{\gamma L} + (a + bEvP) d}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (9)$$

em que: Δ é dada em $mmHg\ ^\circ C^{-1}$; γ igual a $0,60\ mmHg\ ^\circ C^{-1}$; L o calor latente de evaporação ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}\ mm^{-1}$), Q^* o saldo da densidade de fluxo da radiação ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); d o déficit de saturação do ar de vapor d'água do ar (kPa), a e b coeficientes ajustados por Alberto et al. (2002) para a evaporação do evaporímetro de Piche, 0,42 e 0,0245, respectivamente.

Para o cálculo do balanço hídrico (BH) diário 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 Nied (2003) e por Silva (2005), com a diferença de que o cálculo foi 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, sendo ambas consideradas como entradas de água no cálculo do BH.

A quantidade de água que realmente contribui para o armazenamento da água no solo é a que infiltrou depois de uma precipitação (FRIZZONE et al., 2005). A

consideração de todas as combinações de situações práticas possíveis de acontecer em relação à infiltração de água no solo é uma situação de difícil contorno, pois esse parâmetro do solo tem uma variação espacial muito grande, mesmo em áreas homogêneas quanto ao tipo de solo, manejo do solo e relevo. Além disso, a consideração de todas as situações possíveis para vários tipos de solos e diferentes manejos de irrigação, geraria um número muito grande (infinito) de combinações. Porém, uma maneira de se considerar pelo menos em parte essa variação, é determinar a precipitação efetiva (FRIZZONE et al., 2005).

Na agricultura, a precipitação efetiva é definida como a parte da precipitação que fica armazenada no solo até a profundidade das raízes e que fica disponível para os cultivos. É a diferença entre a precipitação total e as diferentes perdas como escoamento superficial, percolação além da zona radicular do solo e evaporação da água interceptada pela vegetação. A precipitação efetiva é um parâmetro de difícil determinação, pois vários fatores influem na porção efetiva da precipitação total, os quais podem atuar isoladamente ou interagindo com outros. Qualquer fator que afete a infiltração, o escoamento superficial ou a evaporação, tem influência no valor da precipitação efetiva. Dentre os principais destacam-se a intensidade da chuva, declividade do terreno, tipo, textura, estrutura e umidade do solo, sistema de cultivo, práticas culturais e conservacionistas, profundidade do sistema radicular e demais características das culturas (FRIZZONE et al., 2005).

Na modelagem da determinação da chuva efetiva, a metodologia mais comumente empregada é a metodologia do U.S. Soil Conservation Service. Por esse método, a precipitação pluviométrica reparte-se em perdas iniciais, em razão da interceptação e enchimento das rugosidades superficiais do solo e perdas por escoamento superficial (FRIZZONE et al., 2005):

$$P_i = \frac{5080}{NC} - 50,8 \quad (10)$$

$$P_r = \frac{(P - 0,2s)^2}{(P + 0,8s)} \quad \text{quando } P > 0,2s \quad (11)$$

$$P_r = 0,0 \quad \text{quando } P < 0,2s \quad (12)$$

Sendo que:

$$s = 254 \left(\frac{100}{NC} - 1 \right) \quad (13)$$

em que: P_i = perdas iniciais em virtude da interceptação e enchimento das rugosidades superficiais do solo, mm; P_r = perdas por escoamento superficial, mm; P = precipitação pluviométrica, mm; NC = número da curva, adimensional; s = parâmetro de retenção, adimensional.

O parâmetro de retenção (s) varia conforme o tipo de solo, uso e práticas de manejo, sendo definido em função do número-curva ($0 \leq NC \leq 100$) tabelado. A determinação do valor de NC para os diferentes tipos de solos foi realizada conforme o teor de areia, adotando-se o valor de $NC=72$ para os arenosos (com teor de areia maior que 50%) e o valor de $NC=91$ para os solos em que havia o predomínio das outras classes de partículas (teor de silte + teor de argila > 50%) (Tabela 6).

Nessa metodologia, parte das perdas iniciais é evaporada (25%) e apenas 75% infiltra-se no solo. Dessa forma, a precipitação pluviométrica que efetivamente contribui para a variação do conteúdo de água no solo é obtida por:

$$P_e = P - P_r - 0,25.P_i \quad \text{quando } P > P_i \quad (14)$$

$$P_e = 0,75 P \quad \text{quando } P \leq P_i \quad (15)$$

Em que, P_e = precipitação efetiva, mm.

O cálculo da necessidade de irrigação foi determinado pelo quociente entre o conteúdo atual de água no solo e a CAD determinados para o dia n , sendo a irrigação realizada no próximo dia (dia $n+1$). Assim, a determinação do momento de irrigar, foi realizada de acordo com umidade existente no solo, ou seja, conforme a relação dada pelo quociente entre a umidade atual e CAD calculada para o dia n e de acordo com o nível de depleção de água previamente estabelecido para o manejo de irrigação. Os diferentes manejos de irrigação (i) foram: 0,5; 0,6; 0,7 e 0,8 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. Dessa forma, a água prontamente disponível às plantas (AD), para o processo de evapotranspiração, foi estabelecida pelo manejo de irrigação:

$$AD = (1-i) CAD \quad (16)$$

em que: $(1-i) = p$ = fração de esgotamento de água no solo para os níveis de irrigação (i). Os valores de p foram definidos dentro da faixa para a cultura do feijão (DOOREMBOS & KASSAN, 1994): $p=0,5$; $p=0,4$; $p=0,3$ e $p=0,2$ para os níveis de irrigação: $i=0,5$; $i=0,6$; $i=0,7$ e $i=0,8$, respectivamente.

3.3 Simulação do desenvolvimento da cultura

A simulação do desenvolvimento da cultura foi realizada para cada solo, utilizando-se diferentes manejos de irrigação e diferentes épocas de semeadura, sempre no 1º e 15º dias do mês, durante o período de semeadura recomendado pela pesquisa para cada época de cultivo, safra ou safrinha (Tabela 4). Os períodos de semeadura utilizados foram semelhantes aos indicados como períodos favoráveis de semeadura para o feijão por Maluf et al. (2001), entre 11 de agosto até 10 de novembro para a safra e entre 11 de janeiro e 28 de fevereiro para a safrinha.

Tabela 4 - Épocas de semeadura (ES) utilizadas na simulação do desenvolvimento da cultura do feijão, tipo II (médio).

Época	Cultivo	Data	Época	Cultivo	Data
1	Safra	15/08	6	Safra	01/11
2	Safra	01/09	7	Safra	15/11
3	Safra	15/09	8	Safrinha	15/01
4	Safra	01/10	9	Safrinha	01/02
5	Safra	15/10	10	Safrinha	15/02

Para o cálculo da evapotranspiração máxima da cultura, utilizou-se a evapotranspiração de referência calculada e os coeficientes de cultura para o feijoeiro determinados por Matzenauer et al. (1999). Os coeficientes de cultura (K_c) foram calculados por equações lineares considerando-se o intervalo entre os subperíodos:

Semeadura – Primeira Folha Trifoliada; Primeira Folha Trifoliada – Início da Floração; Início da Floração – Início do enchimento de grãos; Início do enchimento de grãos – Maturação Fisiológica (Tabela 5), as equações lineares foram estimadas à partir dos valores determinados por Matzenauer et al. (1999) para os subperíodos, de forma que houvesse uma transição gradual dos valores de kc, durante o ciclo.

Os subperíodos foram determinados pelo cálculo da soma térmica diária, o qual foi realizado pelo somatório das unidades térmicas diárias, quantificadas pela diferença entre a média das temperaturas extremas do ar (máxima e mínima) e a temperatura base, assumida como igual à 10°C (MEDEIROS et al., 2000). A partir do cálculo da soma térmica definiu-se os subperíodos e os valores de Kc (Tabela 5 e Figura 4).

Tabela 5 - Soma térmica acumulada (ST), subperíodos de desenvolvimento e modelo de cálculo dos coeficientes de cultura utilizados para determinar a evapotranspiração máxima do feijoeiro, conforme Matzenauer et al. (1999) e Medeiros et al. (2000).

Soma Térmica (°C Dia)	Subperíodos	Coeficiente de cultura
0 – 94	Semeadura - Primeira folha trifoliada	$0,4 + 2,447(10^{-3}) ST$
94 – 246	Primeira folha trif. - terceira folha trifoliada	$0,57 + 5,936(10^{-4}) ST$
246 - 532	Terceira folha trifoliada – Início da floração	
532 - 653	Início da floração – Início Formação vagens	0,89
653 - 812	In formação vagens – Início ench. de grãos	
812 - 1155	Início de ench. Grãos – Maturação Fisiológica	$1,01 - 1,458(10^{-4}) ST$

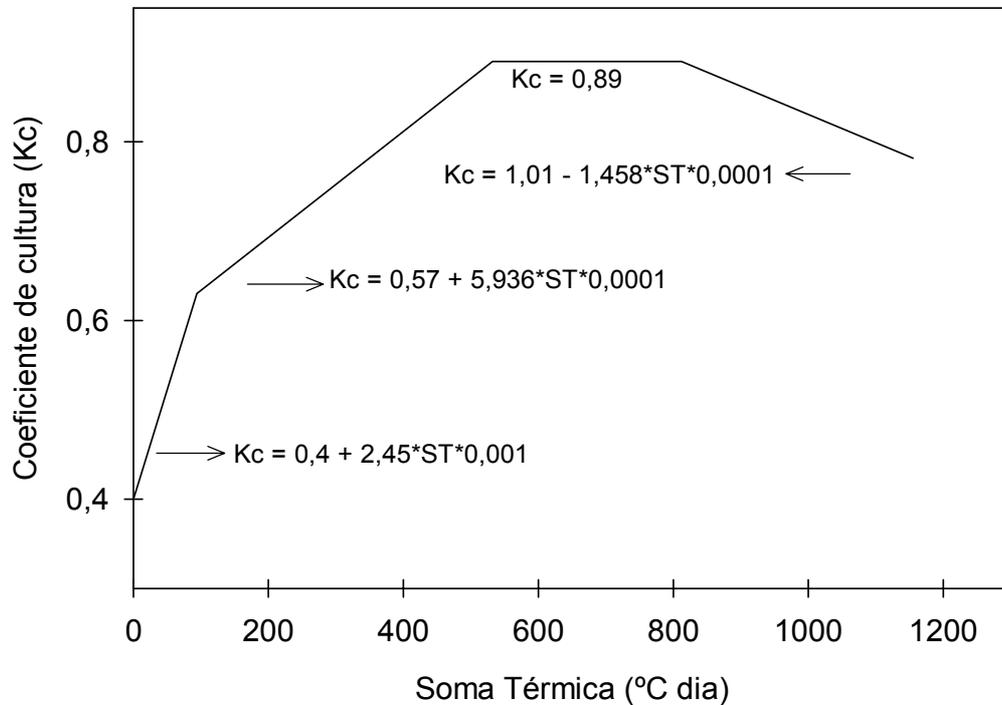


Figura 4 - Variação dos valores do coeficiente de cultura (K_c) do feijoeiro, em função da soma térmica ($^{\circ}\text{C dia}$), simulados para a região central do Rio Grande do Sul. Adaptação de Matzenauer et al. (1999) e Medeiros et al. (2000).

3.4. Determinação da CAD para os diferentes solos

Para o cálculo da água disponível no solo para a cultura do feijoeiro, os valores diários da capacidade de armazenamento de água disponível do solo (CAD) foram variáveis, conforme o aprofundamento radicular. Durante o subperíodo semeadura-emergência foi considerada a CAD até a profundidade de 0,10 m; durante o subperíodo início da floração-maturação fisiológica foi considerada a CAD até a máxima profundidade radicular (CADf) e durante o subperíodo emergência - início da floração a

CAD foi calculada para cada dia (CAD_n), simulando-se o aprofundamento radicular progressivo, pela equação proposta por Oliveira & Villa Nova (1996):

$$CAD_n = CAD_{in} e^x \quad (17)$$

sendo: CAD_{in} (mm) a capacidade de armazenamento de água disponível no solo no início do ciclo (momento da emergência) e

$$x = ST[\ln(CAD_f/CAD_{in})/438] \quad (18)$$

onde, ST é a soma térmica obtida até o dia em questão; CAD_f a capacidade de armazenamento de água disponível no solo no início da floração e 438 é a soma térmica para o subperíodo compreendido entre a emissão da primeira folha trifoliada e o início da floração (532 – 94 = 438°C dia). A representação dessa função é apresentada na Figura 5.

A CAD (mm) foi calculada, em função da diferença entre a umidade volumétrica do solo (cm³ cm⁻³) na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP), através da equação:

$$CAD = (CC - PMP)h \quad (19)$$

onde: h é a profundidade efetiva do sistema radicular (mm).

Os valores de CAD inicial e final foram calculados para os distintos solos, 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) e Cardoso (2005). A CAD_{in} foi determinada para a profundidade de 0,10 m enquanto que a CAD_f foi determinada até a profundidade de 0,50 m quando a presença natural de raízes era abundante ou não havia nenhum impedimento químico ou físico para as raízes atingirem a camada até 0,50 m ou, em caso contrário, até 0,40 m (PIRES et al., 1991 e OLIVEIRA & VILLA NOVA, 1996). A partir do cálculo das CAD(s), os solos da região foram agrupados em classes, conforme o valor da CAD_{in} e CAD_f (Tabela 6).

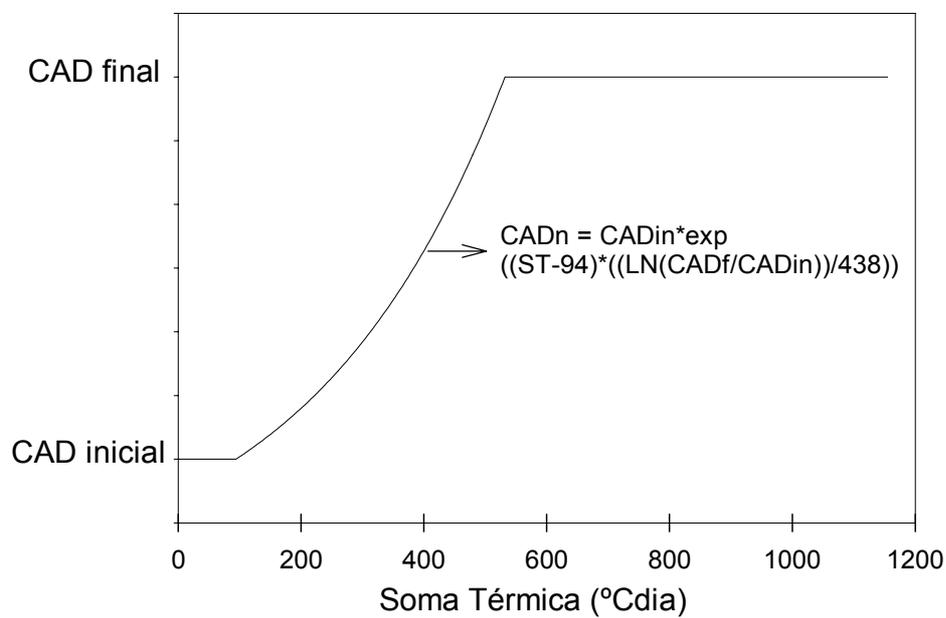


Figura 5 - Variação dos valores de CADn, em função do aprofundamento radicular ao longo do ciclo, determinado pela soma térmica (°C dia), simulados para os diferentes solos da região central do Rio Grande do Sul.

Tabela 6 - Capacidade de armazenamento de água disponível no solo, inicial (CAD_{in}) e final (CAD_f), valor da curva (CN), unidades de mapeamento (BRASIL, 1973) e classificação dos solos (PERAZA, 2003) da área de abrangência da estação climatológica principal de Santa Maria, RS, utilizados no estudo simulado para os anos de 1968 a 2006.

CAD_{in} (mm)	CAD_f (mm)	CN	Unidades de Mapeamento	Classificação dos solos
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 Argissólico
15	100	72	Vacacaí	Planossolo Hidromórfico Eutrófico Arênico
22	80	72	Santa Maria	Alissolo Hipocrômico argilúvico típico
15	45	91	Charrua	Neossolo Litólico Eutrófico Chernozênico
15	45	91	Ciríaco	Chernossolo Argilúvico férrico típico
15	45	91	Guassupi	Neossolo Litólico Distrófico típico
15	45	91	Júlio de Castilhos	Argissolo vermelho-amarelo alumínico típico
15	70	91	Alto das Canas	Argissolo vermelho distrófico latossólico
15	70	91	Cambai	Luvissolo Crômico órtico típico
22	80	91	Oásis	Argissolo vermelho-amarelo alumínico alissólico
22	80	91	São Gabriel	Planossolo Háptico Eutrófico típico

Uma descrição mais detalhada das características dos solos da região de estudo e valores utilizados no cálculo das CADs pode ser encontrada em Cardoso (2005), em anexo (ANEXO A) que contém parte desta descrição.

Utilizando-se as simulações de desenvolvimento da cultura, para o cálculo da variação do K_c e variação do CAD, considerando o aprofundamento radicular, foram obtidos os valores de irrigação simulada pelo cálculo iterativo do balanço hídrico diário, para os diferentes solos, diferentes manejos de irrigação (M) e diferentes épocas de semeadura (ES) e em cada ano de 1968 até 2006. Esses valores foram somados para todos os anos agrícolas, obtendo-se a lâmina de irrigação requerida para o feijoeiro. Foi contabilizado também o número de irrigações por período de cultivo e a relação entre o número de anos em que foi necessário irrigar e total de anos da simulação, para cada solo, M e ES.

3.5 Análise Estatística

A duração dos subperíodos do ciclo, duração total do ciclo, lâmina 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 Tukey, ao nível de 5% de significância. As fontes de variação foram as épocas de semeadura, para a duração dos subperíodos e do ciclo. Para a lâmina de irrigação e número de irrigação as fontes de variação foram os tipos de solos, épocas de semeadura, níveis de manejo de irrigação e respectivas interações.

A análise de distribuição de probabilidade e teste para qualidade de ajustamento das funções foi utilizada para a duração dos subperíodos do ciclo e do ciclo total, para cada época de semeadura, e para os valores de lâmina de irrigação e de número de irrigações, obtidos para cada época de semeadura, manejo de irrigação e tipo de solo.

Em uma primeira análise, feita visualmente, através da plotagem da distribuição de dados, foram escolhidas as funções que poderiam apresentar ajustes aos dados. Após isso, foram testados os ajustes das funções de distribuições de frequência para buscar-se a fdp que melhor se ajusta à cada variável, em cada combinação de tipo de solo, manejo de irrigação e época de semeadura, embora a maioria dos dados se ajuste à distribuição normal, o que justifica a análise paramétrica, para análise da variância e comparação de médias.

O ajuste das funções de distribuição de probabilidades e testes de aderência foram realizados conforme Campos (1979), Assis et al. (1996) e Catalunha et al. (2002). 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, de Chi-Quadrado e Kolmogorov-Smirnov. Quando houve mais de uma função de distribuição ajustada, para cada caso, foi escolhida aquela que apresentou maior nível de significância indicado pelo teste do Chi-Quadrado, ou seja, maior valor de “ p ”. Os testes de ajuste de distribuição de frequência analisados consideram como hipótese nula que não há diferença entre a frequência relativa empírica e a frequência relativa teórica, definida matematicamente, portanto, nesse caso não se deseja refutar a hipótese nula (H_0).

Utilizando-se os parâmetros estimados para as fdp selecionadas, 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, manejos de irrigação e épocas de semeadura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Duração dos subperíodos e do ciclo do feijoeiro

A análise da duração do ciclo e seus subperíodos é importante na determinação do momento de aplicação de práticas culturais, previsão de época de aquisição de insumos, época de colheita e comercialização da produção, bem como na programação da necessidade de suplementação hídrica, através da irrigação, pois o consumo da água está relacionado ao momento fenológico da cultura e ao momento de ocorrência no ano. Períodos de maior necessidade de água pela cultura poderão ou não coincidir com épocas do ano com maior demanda atmosférica, conforme a época de semeadura. Essa análise também é importante como suporte à discussão nos capítulos seguintes.

Na Tabela 7 podem ser visualizados os valores mínimos, máximos, médios e o desvio-padrão da duração dos subperíodos do ciclo do feijoeiro, simulado em todos os anos do período compreendido entre 1968 e 2006, utilizando-se os valores de soma térmica, conforme Medeiros et al. (2000). Verifica-se que de modo geral, para todos os subperíodos, nas épocas de semeadura (ES) de 15/08, 01/09, 01/02 e 15/02 (ES 1, 2, 9 e 10, respectivamente), ocorreu uma maior variação na duração, evidenciada pela diferença entre os valores máximo e mínimo e pelo valor do desvio-padrão (Dp), maiores para essas ES. O valor médio de duração dos subperíodos também foi maior para essas ES.

A maior amplitude de variação dos subperíodos nessas ES é causada pela oscilação nos valores de temperatura observados nesses períodos (EMBRAPA, 2003). As oscilações de temperatura, observadas no início da primavera e no final do verão – início de outono, ocorrem devido às entradas de massas de ar frio, principalmente no período entre o final do outono e início da primavera, período no qual se intensifica no Rio Grande do Sul a circulação secundária do ar na atmosfera, a qual produz acentuada queda térmica. Nessas condições, as ondas de frio são observadas de maio a setembro (MACHADO, 1950; MORENO, 1961).

Períodos com temperaturas mais baixas fazem com que o metabolismo das plantas se reduza, aumentando assim a duração dos subperíodos e do ciclo, conceito considerado quando se utiliza a soma térmica para simular o ciclo de desenvolvimento (WANG, 1960).

Comparando-se os subperíodos entre si, quanto à variação do valor médio de sua duração nas épocas de semeadura, ocorreu uma maior variação na duração do subperíodo compreendido entre o início da formação de grãos e a maturação fisiológica (Subp=6) (Tabela 7, Figura 6), principalmente para a ES=10 (15/02). O aumento na duração do final do ciclo para a época de semeadura de 15/02 aconteceu porque nas épocas de semeadura da safrinha o final do ciclo ocorre no final de maio, início de junho, época em que as temperaturas são mais baixas e há oscilação da temperatura do ar pela ocorrência de ondas de frio (MACHADO, 1950; MORENO, 1961).

As épocas de semeadura com menor duração do ciclo são as épocas do final da safra (ES 6 e 7) e início da safrinha (ES 8) (Tabela 7; Figura 6), pois nessa época ocorrem temperaturas mais elevadas em decorrência da maior incidência de radiação solar e ocorrência das ondas de calor, principalmente no mês de janeiro (MACHADO, 1950; MORENO, 1961).

Tabela 7 – Duração mínima (Mín), média (Méd), máxima (Máx) e desvio padrão dos seis subperíodos (Subp) do feijoeiro, em dias, para as dez épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.

Subp	ES*→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Mín	8,0	6,0	6,0	7,0	7,0	5,0	5,0	5,0	4,0	5,0
	Méd	15,7	14,7	12,6	10,5	9,2	8,4	7,4	5,8	5,8	6,1
	Máx	31,0	23,0	18,0	17,0	12,0	11,0	12,0	7,0	8,0	8,0
	Dp	5,4	4,0	2,8	2,4	1,4	1,3	1,3	0,6	0,8	0,7
2	Mín	11,0	11,0	12,0	11,0	10,0	7,0	10,0	8,0	8,0	8,0
	Méd	22,0	19,0	17,5	15,5	14,1	12,8	11,8	9,9	10,3	10,4
	Máx	31,0	25,0	24,0	19,0	18,0	18,0	14,0	12,0	13,0	13,0
	Dp	5,2	3,4	2,6	2,0	1,9	1,9	1,1	1,0	1,1	1,2
3	Mín	26,0	24,0	21,0	20,0	17,0	14,0	16,0	16,0	16,0	16,0
	Méd	32,5	29,3	27,2	25,4	23,7	21,4	20,4	19,3	19,6	21,1
	Máx	42,0	37,0	33,0	30,0	31,0	24,0	24,0	22,0	22,0	25,0
	Dp	3,9	3,1	2,7	2,5	2,4	1,8	1,7	1,5	1,8	2,0
4	Mín	8,0	7,0	6,0	7,0	5,0	7,0	4,0	7,0	7,0	7,0
	Méd	11,3	10,8	10,3	9,3	8,8	8,6	8,1	8,3	8,9	10,2
	Max	15,0	15,0	16,0	12,0	11,0	10,0	15,0	10,0	12,0	14,0
	Dp	1,6	1,5	1,7	1,0	1,1	0,9	2,6	1,0	1,3	1,9
5	Mín	10,0	7,0	10,0	5,0	9,0	5,0	4,0	9,0	9,0	12,0
	Méd	13,9	13,2	12,3	11,4	11,2	10,8	10,6	11,0	12,7	15,9
	Máx	19,0	19,0	15,0	14,0	14,0	20,0	16,0	13,0	18,0	30,0
	Dp	1,9	2,0	1,3	1,6	1,1	3,1	2,4	1,3	2,0	3,4
6	Mín	19,0	19,0	19,0	13,0	7,0	1,0	19,0	21,0	27,0	31,0
	Méd	25,9	24,9	24,3	23,8	22,6	22,0	22,5	27,6	35,4	50,3
	Máx	30,0	29,0	30,0	34,0	34,0	32,0	25,0	37,0	53,0	86,0
	Dp	1,8	1,8	2,5	4,7	5,3	4,9	1,3	3,6	5,9	14,1

*Épocas de semeadura simuladas nos dias 01e 15 de cada mês, iniciando dia 15/08 até dia 15/11, para safra e iniciando dia 15/01 até 15/02, para safrinha, conforme Tabela 4. Os subperíodos foram simulados conforme a Tabela 5.

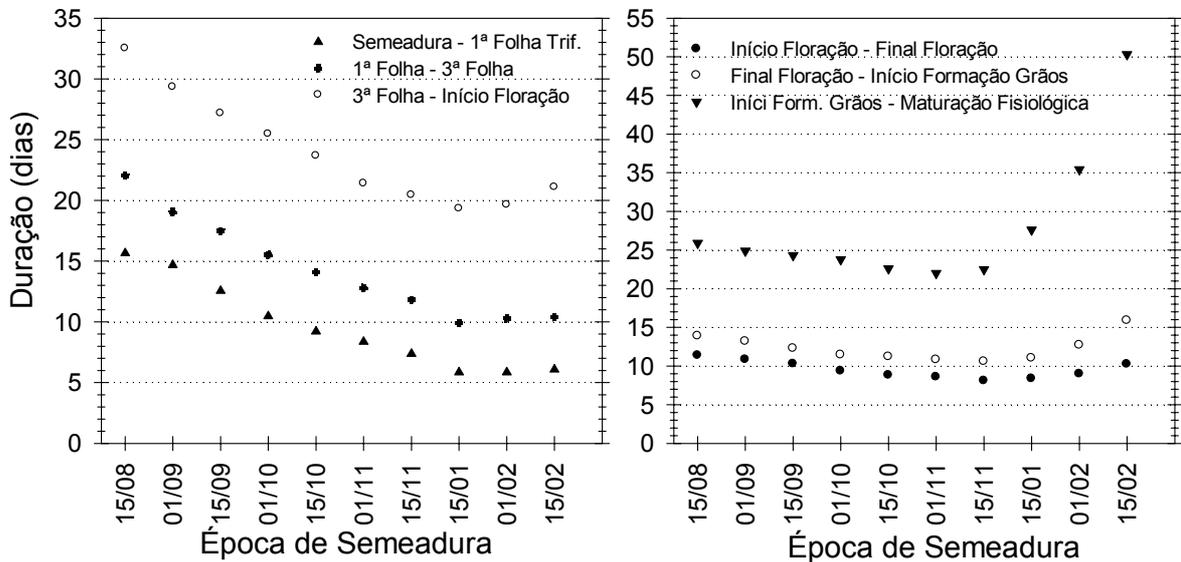


Figura 6 – Variação da duração média dos subperíodos do ciclo feijoeiro, em função da época de semeadura, simulados durante os anos de 1968 a 2006.

A duração do ciclo e de todos os subperíodos foi significativa ao nível de 1% de probabilidade de erro para as épocas de semeadura, conforme análise de variância (Apêndice A).

Na Tabela 8 são apresentadas as comparações das médias de duração dos subperíodos entre épocas de semeadura. Para o subperíodo inicial, semeadura – primeira folha trifoliada, as ES 1 e 2 (15/08 e 01/09) foram as que tiveram maior duração, seguidas das épocas 3, 4, 5, 6, 7 e das épocas de safrinha 8, 9 e 10, comportamento semelhante aos subperíodos primeira folha – terceira folha (1F – 3F) e de terceira folha ao início da floração (3F-IF). Para os outros subperíodos, as ES 5, 6, 7 e 8 (15/10, 01/11, 15/11 e 15/01), de maneira geral, são semelhantes entre si, com duração dos subperíodos maior para as ES do início da safra e final da safrinha. Considerando-se o ciclo total, semeadura (S) – maturação fisiológica (MF), as ES 6, 7 e 8 (01/11, 15/11 e 15/01, respectivamente), apresentam a menor duração e não diferem

entre si. A ES com maior duração do ciclo foi a época 1 (15/08), seguida das épocas 2 e 10 (01/09 e 15/02), 3 (15/09), 4 e 9 (01/10 e 01/02), respectivamente.

Tabela 8 – Médias de duração em dias dos subperíodos compreendidos entre a semeadura (S), primeira folha trifoliada (1F), terceira folha trifoliada (3F), início da floração (IF), final da floração (FF), início do enchimento de grãos (IEG), maturação fisiológica (MF), e de todo ciclo (S-MF), para as dez épocas de semeadura (ES) simuladas em cada ano do período de 1968 a 2006.

ES ¹	S – 1F	1F – 3F	3 ^a F – IF	IF – FF	FF - IEG	IEG – MF	S – MF
1	15,7 A*	22,0 A	32,5 A	11,3 A	13,9 B	25,9 C D	121,3 A
2	14,7 A	19,0 B	29,3 B	10,8 A B	13,2 B C	24,9 C D	111,9 B
3	12,6 B	17,5 B	27,2 C	10,3 A B C	12,3 C D E	24,3 C D	104,2 C
4	10,5 C	15,5 C	25,4 C D	9,3 C D	11,4 D E F	23,8 C D	96,3 D
5	9,2 C D	14,1 C D	23,7 D	8,8 D E	11,2 D E F	22,6 D	89,8 E
6	8,4 D	12,8 D E	21,4 E	8,6 D E	10,8 E F	22,0 D	83,9 F
7	7,4 D E	11,8 E F	20,4 E F	8,1 E	10,6 F	22,5 D	80,7 F
8	5,8 E	9,9 G	19,3 F	8,3 D E	11,0 E F	27,6 C	82,0 F
9	5,8 E	10,3 F G	19,6 E F	8,9 D E	12,7 B C D	35,4 B	92,8 D E
10	6,1 E	10,4 F G	21,1 E F	10,2 B C	15,9 A	50,3 A	113,9 B

¹ Épocas de semeadura simuladas nos dias 01 e 15 de cada mês, iniciando dia 15/08 até dia 15/11, para safra e iniciando dia 15/01 até 15/02, para safrinha, conforme Tabela 4. * Médias não seguidas por mesma letra na vertical, diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

Para caracterizar melhor a distribuição da duração dos subperíodos do ciclo e do ciclo total, os resultados são frutos da análise de distribuição de probabilidades para cada época de semeadura, com base nas funções de distribuição de probabilidades (fdp) testadas, exponencial, gamma, log-normal, normal e Weibull. Combinando-se o número de subperíodos (6), com as ES (10) e com as fdp (5) foram testadas 300 fdps para a duração dos subperíodos e 50 fdps para a duração do ciclo, verificando-se o ajuste de pelo menos uma fdp para 34 dos 60 casos analisados para a duração dos subperíodos nas diferentes épocas de semeadura. Para o ciclo total foi possível o ajuste de fdps em nove das dez ES; apenas para época de 01 de novembro não houve fdp ajustada. A fdp que se ajustou em maior número de casos para a duração dos

subperíodos foi a função gamma, seguida das funções normal, Weibull e log-normal, as quais, considerando-se as funções estatisticamente significativas, se ajustaram em 28, 27, 26 e 26 dos 107 casos ou em 26,2%, 25,2%, 24,3% e 24,3% dos casos, respectivamente (Tabela 9). Para a duração total do ciclo as fdp gamma e log-normal se ajustaram em sete dos 26 casos (26,9%) e as fdps normal e Weibull se ajustaram em seis dos 26 casos (23,1%) (Tabela 9).

Tabela 9 – Frequência de casos com ajuste estatisticamente significativos das funções de distribuição de probabilidades (fdp) gamma, log-normal, normal e Weibull para a duração dos subperíodos e do ciclo total, simulados de 1968 a 2006.

Fdp	% Freq (Subperíodos)	% Freq (Ciclo Total)
gamma	26,17	26,92
Log-normal	24,30	26,92
Normal	25,23	23,08
Weibull	24,30	23,08
Total*	100,00 (107*)	100,00 (26*)

*O valor entre parêntesis é o número total de fdp ajustadas.

A função normal foi escolhida para determinar a duração dos subperíodos e do ciclo por se ajustar a um grande número de casos, além disso trata-se de uma função amplamente conhecida, com parâmetros de fácil obtenção. Na Tabela 10 encontram-se as fdps escolhidas para cada caso da duração dos subperíodos e na Tabela 11 as fdps escolhidas para a duração do ciclo. Quando não foi possível utilizar a função normal e havia mais de uma fdp ajustada, optou-se pela função com maior significância do teste do qui-quadrado. As combinações ausentes nas Tabelas 10 e 11 são os casos em que não houve nenhuma fdp ajustada.

Tabela 10 – Funções de distribuição de probabilidades (fdp) selecionadas para determinar a duração em número de dias dos subperíodos, semeadura – primeira folha trifoliada; primeira folha – terceira folha; terceira folha – início da floração; início da floração - final da floração; final da floração – início do enchimento de grãos; início do enchimento de grãos – maturação fisiológica, para dez épocas de semeadura de feijão, simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.

Semead.	Subperíodo	fdp	a*	b*
15/Ago	Semeadura – 1ª Folha	Normal	15,6579	5,3891
	1ª Folha – 3ª Folha	Normal	22,0263	5,1595
	3ª Folha – Início Floração	Normal	32,5000	3,9370
01/Set	Semeadura – 1ª Folha	Normal	14,6842	3,9872
	1ª Folha – 3ª Folha	Normal	19,0263	3,4208
	3ª Folha – Início Floração	Normal	29,3158	3,0941
	Início Ench. Grãos – M. F.	Weibull	25,6822	15,8233
15/Set	Semeadura – 1ª Folha	Normal	12,5526	2,8255
	1ª Folha – 3ª Folha	Normal	17,4737	2,6277
	3ª Folha – Início Floração	Normal	27,1579	2,7166
	Início Flor – Final Floração	Lnormal	2,3148	0,1690
	Fim Flor - Início Ench. Grãos	Normal	12,2632	1,3494
01/Out	Semeadura – 1ª Folha	Normal	10,4737	2,3794
	1ª Folha – 3ª Folha	Normal	15,5263	2,0233
	3ª Folha – Início Floração	Weibull	26,5538	11,7186
	Início Flor – Final Floração	Normal	9,3421	1,0208
	Início Ench. Grãos – M. F.	Normal	23,7895	4,7086
15/Out	Semeadura – 1ª Folha	Normal	9,2105	1,4362
	1ª Folha – 3ª Folha	Normal	14,1053	1,8858
	Início Ench. Grãos – M. F.	Normal	22,5897	5,3297
01/Nov	Semeadura – 1ª Folha	Weibull	8,9240	7,1675
	1ª Folha – 3ª Folha	Normal	12,7895	1,8767
	Fim Flor - Início Ench. Grãos	Normal	10,7895	3,1465
15/Nov	3ª Folha – Início Floração	Normal	20,4211	1,6543
	Início Flor – Final Floração	Normal	8,0789	2,6033
	Fim Flor - Início Ench. Grãos	Normal	10,5526	2,4351
15/Jan	3ª Folha – Início Floração	Normal	19,3158	1,5264
	Início Ench. Grãos – M. F.	Normal	27,6316	3,6274
01/Fev	1ª Folha – 3ª Folha	Normal	10,2895	1,0882
	Início Flor – Final Floração	Lnormal	2,1815	0,1413
	Fim Flor - Início Ench. Grãos	Lnormal	2,5285	0,1552
15/Fev	1ª Folha – 3ª Folha	Normal	10,3947	1,2201
	3ª Folha – Início Floração	Normal	21,0789	2,0452
	Início Ench. Grãos – M. F.	Lnormal	3,8833	0,2636

*Os parâmetros das fdp Weibull e log-normal são ditos “escalar” e “de forma” e para a função normal são média e desvio-padrão.

Tabela 11 – Funções de distribuição de probabilidades (fdp) selecionadas para determinar a duração do ciclo do feijoeiro, para as dez épocas de semeadura, simuladas em cada ano do período de 1968 a 2006.

Semeadura	fdp	a*	b*
15 de agosto	Normal	121,2895	6,2164
01 de setembro	Normal	111,8947	5,2391
15 de setembro	Normal	104,2105	4,8888
01 de outubro	Normal	96,3421	4,3761
15 de outubro	Weibull	91,9360	20,4650
15 de novembro	Normal	80,7368	3,8533
15 de janeiro	Normal	82,0263	5,0107
01 de fevereiro	Log-normal	4,5265	0,0914
15 de fevereiro	Log-normal	4,7238	0,1545

*Os parâmetros das fdp Weibull e log-normal são ditos “escalar” e “de forma” e para a função normal são média e desvio-padrão..

Utilizando-se as fdps determinadas e selecionadas foi possível calcular a duração dos subperíodos e do ciclo, por época de semeadura para as probabilidades de 95, 90 e 75% de ocorrência. Para a duração do ciclo trabalhou-se com o nível máximo de ocorrência. Por exemplo, pode-se afirmar que em 90% dos casos, nove em cada dez anos, que o ciclo do feijoeiro será menor ou igual a 129 dias, quando semeado em data próxima ou em 15 de agosto (Tabela 12). Análise semelhante pode ser realizada para outras ES e subperíodos. Constatou-se a redução dos valores de duração com a diminuição da probabilidade, variação esperada, pois se trata do valor máximo de ocorrência em cada nível de probabilidade.

A variação da duração do ciclo ao longo das ES, para os valores calculados nos níveis de probabilidade de ocorrência, foi semelhante ao observado para os valores médios. A duração do ciclo variou entre 87 e 145 dias, para a probabilidade de 95% de ocorrência, ou seja, pode-se afirmar que em 95% dos casos o ciclo terá uma duração de no máximo 87 dias para a ES de 15/11 e que terá uma duração máxima de 145 dias para a ES de 15/02. Essa variação na duração do ciclo se dá pela diferença de temperatura do ar ao longo do ciclo entre as ES, já explicada anteriormente.

Os resultados de duração dos subperíodos foram semelhantes aos encontrados na literatura (POMPEU, 1993; BARBANO et al., 2001), com duração um pouco maiores do que foi relatado para o Paraná (BURATTO et al., 2007), pois esses autores trabalharam com genótipos precoces. Comparando-se com os valores observados para Santa Maria – RS (RIBEIRO et al., 2004), observou-se que na média os valores foram bastante semelhantes, porém considerando-se a amplitude dos dados, a duração dos subperíodos e do ciclo determinados foram em torno de 20 dias maiores que os valores observados por Ribeiro et al. (2004). A diferença provavelmente se deve ao fato de que Ribeiro et al. (2004) avaliaram três cultivos semeados no final de outubro e início de novembro (04/11/1998, 27/10/1999 e 26/10/2001) e apresentaram a duração dos subperíodos e do ciclo a partir da emergência, enquanto que para os dados aqui apresentados foram consideradas as épocas de todo o período da safra e safrinha, simuladas em 38 anos, e a duração dos subperíodos e do ciclo foi considerada a partir da semeadura. Quando se considera apenas as ES de 15 de outubro e 01 de novembro, apresentadas na Tabela 8 e subtrai-se o intervalo de tempo entre a semeadura e emergência (aproximadamente sete ou oito dias) dos valores médios, verifica-se grande concordância entre os dados, indicando que a metodologia utilizada está adequada para determinar a duração dos subperíodos e do ciclo total.

Salienta-se que a simulação do ciclo total foi realizada para a cultivar Carioca 80 - SII, de ciclo médio (MEDEIROS et al., 2000) e que a variação entre cultivares poderá ser ampla (COSTA & ZIMMERMANN, 1988; WALLACE et al., 1991; POMPEU, 1993; GUTIERREZ et al., 1994 e WHITE et al, 1996;).

Tabela 12 – Duração provável dos subperíodos compreendidos entre a semeadura (S), primeira folha trifoliada (1F), terceira folha trifoliada (3F), início da floração (IF), final da floração (FF), início do enchimento de grãos (IEG) e maturação fisiológica (MF), para as dez épocas de semeadura (ES), simuladas para a série histórica de 1968 a 2006.

Subperíodo	ES	Probab. de ocorrência (%)			ES	Probab. de ocorrência (%)		
		95	90	75		95	90	75
S – 1F	15 de agosto	25	23	19	01 de novembro	10	10	9
1F – 3F		31	29	26		16	15	14
3F – IF		39	38	35		24*	23*	23*
IF – FF		15*	13*	12*		10*	10*	9*
FF – IEG		18*	16*	15*		16	15	13
IEG – MF		28*	28*	27*		27*	27*	24*
S – MF		132	129	125		92*	89*	87*
S – 1F	01 de setembro	21	20	17	15 de novembro	9*	9*	8*
1F – 3F		25	23	21		14*	14*	12*
3F – IF		34	33	31		23	23	22
IF – FF		13*	13*	12*		12	11	10
FF – IEG		15*	15*	14*		15	14	12
IEG – MF		28	27	26		25*	24*	23*
S – MF		121	119	115		87	86	83
S – 1F	15 de setembro	17	16	14	15 de janeiro	7*	7*	6*
1F – 3F		22	21	19		12*	11*	10*
3F – IF		32	31	29		22	21	20
IF – FF		13	13	11		10*	10*	9*
FF – IEG		14	14	13		13*	13*	12*
IEG – MF		29*	28*	26*		34	32	30
S – MF		112	110	108		90	88	85
S – 1F	01 de outubro	14	14	12	01 de fevereiro	7*	7*	6*
1F – 3F		29	29	27		12	12	11
3F – IF		11	11	10		22*	22*	21*
IF – FF		11*	10*	10*		11	11	10
FF – IEG		14*	13*	12*		16	15	14
IEG – MF		32	30	27		49*	46*	38*
S – MF		104	102	99		107	104	98
S – 1F	15 de outubro	12	11	10	15 de fevereiro	8*	7*	6*
1F – 3F		17	17	15		12	12	11
3F – IF		27*	26*	25*		24	24	22
IF – FF		10*	10*	9*		14*	14*	11*
FF – IEG		14*	12*	12*		22*	20*	17*
IEG – MF		31	29	26		75	68	58
S – MF		97	96	93		145	137	125

*Valores determinados pela distribuição empírica.

4.2 Irrigação e número de irrigações: comparação de médias

Houve diferença significativa entre solos, entre manejos de irrigação e entre épocas de semeadura, bem como interação entre solos e manejo de irrigação e entre solos e épocas de semeadura (APÊNDICE B).

Na Figura 7 são apresentados os percentuais de anos agrícolas (PA) em que foi necessário irrigar, para os diferentes solos e M, em função das ES. Para todos os solos houve aumento de PA ao longo da safra (de 15/08 a 15/11) e leve diminuição ao longo da safrinha. A irrigação foi mais freqüente para os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos, com valores maiores que 60% dos anos para a maioria das ES, e menos freqüente para o solo Vacacaí. Os primeiros solos citados são solos com baixa CAD, com impedimentos ao aprofundamento radicular e com baixa taxa de infiltração de água no solo, enquanto que o solo Vacacaí é um solo profundo e com CAD alta (CARDOSO, 2005). Considerando o manejo de irrigação “0,6” o percentual aproximado de anos com irrigação variou entre 40% e 90% para os solos, Alto das Canas e Cambaí; entre 70% e 95%, para os solos, Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos, entre 40% e 90%, para os solos Oásis e São Gabriel, entre 25% e 70%, para o solo Santa Maria, entre 35% e 85% dos anos para os solos São Pedro, Venda Grande e Cerrito; e entre 28% e 77% para o solo Vacacaí (Figura 7).

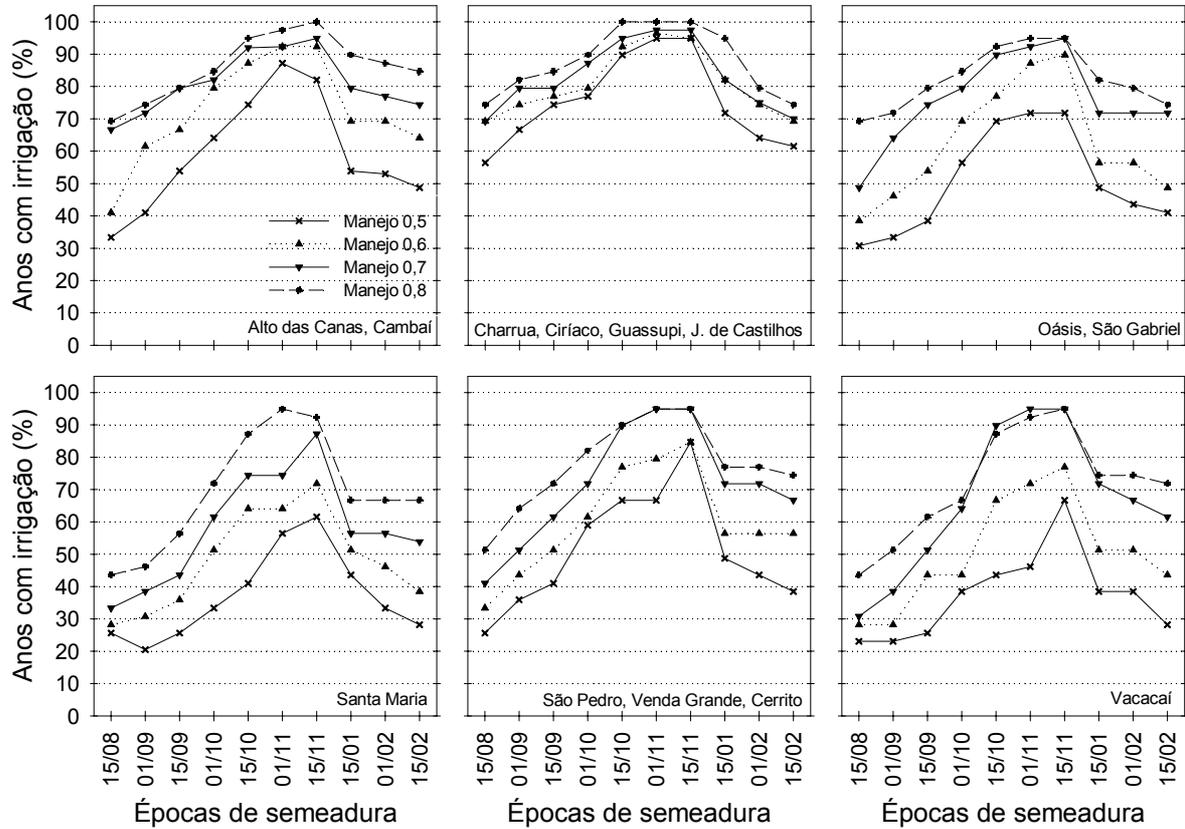


Figura 7 – Percentual de anos agrícolas em que foi necessária pelo menos uma irrigação, para os diferentes solos, manejos de irrigação e épocas de semeadura, simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.

A comparação entre solos, para as médias de irrigação e número de irrigações, por ano agrícola, é apresentada na Tabela 13. Não houve diferença estatisticamente significativa, para os valores de lâmina de irrigação, entre os solos Alto das Canas, Cambaí, Charrua, Ciríaco, Guassupi, Júlio de Castilhos, Oásis e São Gabriel, com aproximadamente 53 mm de necessidade de irrigação por cultivo, e entre os solos Santa Maria, São Pedro, Venda Grande, Cerrito e Vacacaí, com aproximadamente 45 mm de necessidade de irrigação. Provavelmente essa separação em dois agrupamentos se deve à semelhança de textura entre os solos dos dois grupos, a qual possivelmente resultou da consideração de diferentes infiltrações de água no solo, para

cada grupo, diferença considerada no cálculo da precipitação efetiva, modelada a partir dos valores de CN (Tabela 6). Essa diferença revela a importância de adoção de práticas de conservação e manejo do solo visando o aumento da infiltração da água no solo, como a prática do plantio direto, destruição de camadas compactadas, rotação com culturas de sistema radicular profundo, terraceamento, entre outros, principalmente em solos com característica de baixa infiltração de água.

Quanto ao número de irrigações, observou-se um número maior para os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos com aproximadamente cinco irrigações, seguidos dos solos Alto das Canas, Cambaí, São Pedro, Venda Grande e Cerrito, com aproximadamente quatro irrigações e os demais com uma média aproximada de três irrigações por cultivo (Tabela 13).

A diferença entre o número de irrigações para cada grupo de solos mostra que, mesmo havendo semelhança entre as médias dos totais de irrigação, poderá haver diferenças entre os solos para a lâmina de irrigação requerida em cada aplicação. Nos solos com menor CAD a irrigação é mais freqüente, porém a quantidade de água necessária para completar a CAD é menor, pois o conteúdo de água armazenado na saturação é menor nesses casos. Nos solos com maior CAD a irrigação é menos freqüente, porém o volume de água necessário para repor o conteúdo de água até completar a CAD é maior. Por essa razão, a lâmina total de água foi semelhante nos dois casos, embora o número de aplicações seja diferente.

Tabela 13 – Valores médios de lâmina de irrigação (mm) e do número de irrigações, totalizados em cada período de cultivo e solos estudados na simulação do ciclo do feijoeiro, durante o período de 1968 a 2006.

Solo	Irrigação (mm)	Num. Irrig.
Alto das Canas, Cambai	53,7 A*	3,8 B
Charrua, Ciríaco, Guassupi, Júlio de Castilhos	53,7 A	4,6 A
Oásis, São Gabriel	52,5 A	2,9 C D
Santa Maria	44,5 B	2,6 D
São Pedro, Venda Grande, Cerrito	45,3 B	3,6 B
Vacacaí	45,5 B	3,1 C

* Médias não seguidas por mesma letra na vertical, diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

Na comparação dos valores de irrigação e número de irrigações entre ES (Tabela 14), o comportamento foi semelhante para as duas variáveis. A lâmina de irrigação e o número de aplicações foram maiores nas ES de 01/11 e 15/11, aproximadamente 60 mm e cinco aplicações, embora nessas épocas o ciclo seja mais curto (Tabela 8). A maior necessidade de suplementação hídrica para as ES de 01/11 e 15/11, provavelmente se deve a maior disponibilidade de energia solar e ao maior aquecimento do ar, em virtude da aproximação do verão, e a coincidência do período de maior exigência de água pela planta, próximo à floração (MATZENAUER et al., 1999) com a época do ano em que a demanda evaporativa da atmosfera é mais elevada (MACHADO, 1950; MORENO, 1961). Situação contrária ocorreu para as ES da safrinha (15/01, 01/02 e 15/02), épocas em que se obtiveram os menores valores de irrigação e número de irrigações, aproximadamente 40, 33 e 27 mm, aplicados em quatro, três e três vezes, para as ES de 15/01, 01/02 e 15/02, respectivamente, embora o ciclo seja mais longo nessas ES (Tabela 8). Esse comportamento foi observado porque o ciclo das plantas cultivadas na safrinha ocorre no final do verão e outono, enquanto que a necessidade de água das plantas aumenta a demanda evaporativa da atmosfera diminui, não ocorrendo coincidência entre os períodos. As demais ES tiveram valores intermediários entre os extremos, para as variáveis analisadas.

Na comparação entre os manejos de irrigação para a lâmina e número de irrigações, verificou-se diferença estatisticamente significativa entre todos os manejos. Essa situação era esperada, pois os manejos de irrigação diferenciados pressupõem aplicação de diferentes lâminas de irrigação. Enquanto que no manejo 0,5 a irrigação é realizada somente quando o conteúdo de água no solo atingir 50% da CAD, no manejo 0,8 a irrigação é prevista para quando for consumido 20% da CAD ou o conteúdo atual de água no solo esteja a 80% da CAD, calculada para aquele dia.

Tabela 14 –Valores médios de lâmina de irrigação (mm) e do número de irrigações, totalizados em cada período de cultivo e épocas de semeadura estudadas na simulação do ciclo do feijoeiro, durante o período de 1968 a 2006.

Época de Semeadura	Irrigação (mm)	Num. Irrig.
15 de agosto	46,9 E*	2,6 F
01 de setembro	50,8 D E	2,9 E F
15 de setembro	53,2 C D	3,2 D E
01 de outubro	55,0 B C D	3,5 C D
15 de outubro	56,1 B C	3,8 C
01 de novembro	60,5 A	4,2 B
15 de novembro	59,1 A B	4,8 A
15 de janeiro	39,6 F	3,6 C
01 de fevereiro	32,6 G	2,8 E F
15 de fevereiro	26,8 H	2,5 F

* Médias não seguidas por mesma letra na vertical, diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

Houve efeito da interação entre os solos e manejo de irrigação. Assim, realizou-se a comparação das médias de lâmina de irrigação e número de irrigações entre manejos de irrigação, para cada solo (Tabela 15). Para os solos Alto das Canas e Cambaí a lâmina de irrigação determinada foi maior para o manejo 0,8 (63,1 mm), não havendo diferença estatisticamente significativa entre os manejos 0,7 e 0,6 e entre os manejos 0,6 e 0,5. O menor valor de lâmina de irrigação foi para o manejo 0,5 (43,5 mm), comportamento idêntico ao observado para os solos Oásis e São Gabriel (Tabela 15).

Constatou-se semelhança na comparação entre as médias de lâmina de irrigação para os solos Charrua, Guassupi, Ciríaco, Guassupi, Júlio de Castilhos e São Pedro, Venda Grande e Cerrito. A maior média foi para o manejo 0,8, seguido do manejo 0,7 e dos manejos 0,6 e 0,5. Os dois últimos não apresentaram diferença estatística significativa entre si (Tabela 15).

Ao comparar as médias de lâmina de irrigação entre os manejos para o solo Santa Maria, observou-se que não houve diferença significativa entre os manejos 0,6, 0,7 e 0,8 e que esses manejos diferem estatisticamente do manejo 0,5, com menor lâmina de irrigação requerida (Tabela 15).

Tabela 15 – Valores médios de lâmina de irrigação (mm) e do número de irrigações, totalizados em cada período de cultivo para cada manejo de irrigação e solo, estudados na simulação do ciclo do feijoeiro, durante o período de 1968 a 2006.

Solo	Manejo ¹	Irrigação (mm)	Num. Irrig.
Alto das Canas, Cambai	0,5	43,5 C*	1,9 D
	0,6	49,6 B C	2,5 C
	0,7	55,1 B	3,7 B
	0,8	63,1 A	6,1 A
Charrua, Ciríaco, Guassupi, Júlio de Castilhos	0,5	43,6 C	2,4 D
	0,6	49,8 C	3,3 C
	0,7	56,4 B	4,9 B
	0,8	63,2 A	7,4 A
Oásis, São Gabriel	0,5	44,7 C	1,5 C
	0,6	48,8 B C	2,0 C
	0,7	53,2 B	2,8 B
	0,8	59,4 A	4,6 A
Santa Maria	0,5	39,2 B	1,4 C
	0,6	42,6 A	1,8 C
	0,7	44,9 A	2,5 B
	0,8	48,4 A	3,9 A
São Pedro, Venda Grande e Cerrito	0,5	39,8 C	1,9 C
	0,6	42,0 C	2,5 C
	0,7	46,0 B	3,5 B
	0,8	51,1 A	5,6 A
Vacacaí	0,5	38,7 B	1,6 C
	0,6	40,5 B	1,9 C
	0,7	45,8 B	3,2 B
	0,8	52,4 A	4,5 A

1 Fração da CAD que foi mantida no solo, com a simulação de irrigação. * Médias não seguidas por mesma letra na vertical, diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

Para o solo Vacacaí os manejos 0,5, 0,6 e 0,7 não diferiram entre si quanto à lâmina de irrigação e o manejo 0,8 possui o maior valor da variável (Tabela 15).

De maneira geral, para a maioria dos solos, a lâmina de irrigação foi maior para o manejo 0,8, o qual, com exceção para o solo Santa Maria, diferiram estatisticamente dos demais que geralmente apresentaram valores semelhantes, quando comparados entre si. Para o solo Santa Maria o único valor que diferiu dos demais foi a lâmina de irrigação média determinada para o manejo 0,5 (Tabela 15).

Na comparação das médias do número de irrigações entre os manejos de irrigação, para cada solo, nota-se que existem dois grandes grupos de solos, cada um com comportamento idêntico. Para os solos, Alto das Canas, Cambaí, Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos os manejos foram todos diferentes entre si, com os valores aumentando do manejo 0,5 para 0,8 (Tabela 15). Para os solos Oásis, São Gabriel, Santa Maria, São Pedro, Venda Grande, Cerrito e Vacacaí os menores valores do número de irrigações médio foi encontrado para os manejos 0,5 e 0,6 que não diferiram estatisticamente e foram seguidos das médias encontradas para os manejos 0,7 e 0,8, respectivamente.

O aumento dos valores de lâmina de irrigação e do número de irrigações com o aumento dos valores de percentagem da CAD, utilizados no manejo da irrigação, era esperado, como explicado anteriormente, e segue a tendência da lâmina de irrigação.

Os valores de lâmina de irrigação encontrados foram inferiores aos relatados para o Paraná (OLIVEIRA & VILLA NOVA, 1996), mas bastante semelhantes aos valores de deficiência hídrica para a região do Planalto Médio do RS (MATZENAUER et al., 2004). Esse resultado é teoricamente correto, pois a tendência à similaridade entre as duas regiões pode estar associada a uma provável compensação relativa do efeito da menor temperatura com a maior insolação no Planalto Médio do RS em relação à Santa Maria.

A comparação dos valores de lâmina de irrigação entre ES não foi realizada, pois a interação solo x ES não foi significativa (Apêndice B). Na comparação dos valores do número de irrigações, para os solos, Alto das Canas, Cambaí, Oásis e São Gabriel observaram-se as maiores médias para as ES de 01/11 e 15/11, valores intermediários para as ES de 15/09 até 15/10 e os menores valores para o início da safra e para todas ES da safrinha. Para os solos Santa Maria, São Pedro, Venda Grande, Cerrito e

Vacacaí os maiores valores do número de irrigações foram observadas para as ES de 15/10 a 15/11, em torno de quatro a seis aplicações de irrigação, e as demais foram semelhantes, com valores em torno de duas a quatro vezes por ciclo de cultivo. Para os solos com menor CAD (Charrua, Ciríaco, Guassupi, Júlio de Castilhos) foram previstas de três a cinco irrigações, no início da safra e na safrinha e para as ES de 01/10 a 15/11 foram previstas de cinco a sete irrigações.

Tabela 16 – Valores médios do número de irrigações (N. Irrig.), totalizados em cada período de cultivo, solos e épocas de semeadura (ES), estudados na simulação do ciclo do feijoeiro, durante o período de 1968 a 2006, para os solos, Alto das Canas, Cambaí, Charrua, Ciríaco, Guassupi, Júlio de Castilhos, Oásis e São Gabriel (a) e para os solos Santa Maria, São Pedro, Venda Grande, Cerrito e Vacacaí (b).

ES	Solo	N. Irrig. (a)	Solo	N. Irrig. (b)
15/08	Alto das Canas, Cambaí	2,6 D	Santa Maria	1,9 C
01/09		2,9 D		2,1 B C
15/09		3,2 C D		2,3 B C
01/10		3,8 B C		2,4 B C
15/10		4,2 B C		2,7 A B C
01/11		4,5 A B		3,0 A B
15/11		5,3 A		3,4 A
15/01		3,8 B C D		2,9 A B C
01/02		3,1 D		2,2 B C
15/02		2,8 D		2,1 B C
15/08	Charrua, Ciríaco, Guassupi, Júlio de Castilhos	3,5 E F G	São Pedro, Venda Grande e Cerrito	2,7 C
01/09		4,0 D E F		2,9 C
15/09		4,5 B C D E		3,2 B C
01/10		5,1 A B C D		3,4 B C
15/10		5,4 A B C		3,8 B C
01/11		5,9 A		4,2 A B
15/11		6,5 A		4,8 A
15/01		4,3 C D E		3,7 B C
01/02		3,0 F G		3,0 C
15/02		2,6 G		2,7 C
15/08	Oásis, São Gabriel	2,1 D	Vacacaí	1,9 E
01/09		2,3 C D		2,1 D E
15/09		2,6 C D		2,3 C D E
01/10		2,8 B C D		2,8 B C D E
15/10		3,2 B C		3,2 B C D
01/11		3,6 A B		3,6 A B
15/11		4,0 A		4,3 A
15/01		3,0 B C D		3,5 A B C
01/02		2,5 C D		2,6 B C D E
15/02		2,2 D		2,5 C D E

* Médias não seguidas por mesma letra na vertical, diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

4.3 Irrigação e número de irrigações: análise de distribuição

A análise de distribuição de probabilidades e o cálculo da lâmina de irrigação e número de irrigações, para as probabilidades de ocorrência de 95, 90 e 75%, foram realizados para todos os solos, manejos de irrigação e épocas de semeadura. Combinando-se os seis grupos de solos, com as dez ES, quatro manejos de irrigação e cinco fdps, foram testadas 1200 fdps. Dessas, 658 fdps apresentaram ajuste significativo para a lâmina de irrigação e 424 fdps para o número de irrigações. As fdps com ajuste estatisticamente significativo foram gamma, Weibull, log-normal, normal, e exponencial, em 25%, 23%, 22%, 21% e 9% dos casos, respectivamente, para a lâmina de irrigação e em 27%, 25%, 22%, 12% e 14% dos casos, respectivamente, para o número de irrigações.

Na seqüência são apresentadas as fdps ajustadas para os solos, Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos e para os solos São Pedro, Venda Grande e Cerrito. Por conveniência são apresentados os resultados da análise de distribuição e cálculo de probabilidade somente para esses dois grupos de solos, pois houve grande semelhança nos resultados de irrigação e número de irrigações entre esses dois grupos e os demais, conforme Tabela 13. As demais fdps ajustadas e os valores calculados de lâmina de irrigação e número de irrigações encontram-se nos apêndices (Apêndices C até N).

Na Tabela 17 são apresentadas as fdps ajustadas e seus parâmetros para os solos, Charrua, Ciríaco, Guassupi, Júlio de Castilhos e São Pedro. Optou-se pela função gamma por esta predominar entre as funções com ajuste significativo. Quando não foi possível ajustar a função gamma e havia outras, optou-se pela fdp com maior nível de significância pelo teste do qui-quadrado. A mesma situação ocorreu para as fdps ajustadas para o número de irrigações (Tabela 18).

Tabela 17 – Funções de distribuição de probabilidades (fdp), exponencial (Exp), gamma, log-normal (Lnorm) e normal (Norm) e seus parâmetros, selecionadas para determinar a lâmina anual de irrigação, para os grupamentos de solos, Charrua, Ciríaco, Guassupi, Júlio de Castilhos, São Pedro, Venda Grande e Cerrito; para os diferentes manejos (M) de irrigação e para as épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.

M ¹	ES	fdp	Escalar	Forma	M ¹	ES	fdp	Escalar	Forma
Charrua, Ciríaco, Guassupi e J. de Castilhos					São Pedro, Venda Grande e Cerrito				
0,5		gamma	7,8395	5,2322	0,5		gamma	12,8805	3,3136
0,7	15/08	gamma	17,6821	2,8130	0,6	15/08	gamma	10,0625	4,6099
0,8		gamma	22,3993	2,4078	0,7		gamma	13,2748	3,5523
0,5		gamma	12,9345	3,3302	0,8		gamma	21,1058	2,1684
0,6	01/09	gamma	19,7674	2,4650	0,6		Exp	46,6020	
0,7		gamma	22,4462	2,4071	0,7	01/09	gamma	17,2422	2,9858
0,8		gamma	26,7062	2,2624	0,8		gamma	31,7643	1,5329
0,5		Exp	46,6069		0,6		Norm ²	47,598	29,1628
0,6	15/09	gamma	15,7270	3,5163	0,7	15/09	gamma	26,0778	1,9070
0,7		gamma	19,9256	3,1492	0,8		gamma	32,5548	1,6131
0,8		gamma	27,9772	2,3786	0,6			LNorm	3,6773
0,5		gamma	10,4324	4,7212	0,7	01/10	gamma	17,3271	2,9194
0,6	01/10	gamma	14,3350	4,2250	0,8		gamma	25,3307	2,1938
0,7		gamma	17,6376	3,6869	0,6		gamma	20,9481	2,2771
0,8		gamma	25,3054	2,9194	0,7	15/10	gamma	18,4117	2,7195
0,5		gamma	14,6730	3,4501	0,8		gamma	23,2543	2,5763
0,6	15/10	gamma	15,8255	3,7763	0,5			gamma	14,2372
0,7		gamma	25,4916	2,6922	0,6	01/11	gamma	17,5100	2,9720
0,8		gamma	27,9608	2,7197	0,7		gamma	20,6368	2,5921
0,5		gamma	15,0212	3,4561	0,8		gamma	22,5256	2,8110
0,6	01/11	gamma	14,2059	4,5962	0,5		gamma	17,5250	2,6469
0,7		gamma	19,8763	3,6956	0,6	15/11	gamma	17,3275	2,8538
0,8		gamma	25,0416	3,2489	0,7		gamma	20,6389	2,7006
0,5		gamma	18,8379	2,8003	0,8		gamma	22,2472	2,9664
0,6	15/11	gamma	18,7446	3,2656	0,5		gamma	7,1354	4,3920
0,7		gamma	19,8813	3,5934	0,6	15/01	gamma	12,4293	2,6004
0,8		gamma	25,1828	3,2691	0,7		gamma	17,8544	2,1120
0,5		gamma	14,0951	2,5661	0,5			gamma	5,1703
0,6	15/01	gamma	13,3835	2,6359	0,6	01/02	Norm ²	24,407	14,1739
0,7		gamma	17,4852	2,5854	0,7		gamma	15,0156	2,0828
0,8		gamma	22,0127	2,2025	0,8		gamma	18,9895	1,9030
0,5		gamma	8,2719	3,3942	0,6		Norm ²	21,91	11,5951
0,6	01/02	gamma	13,3042	2,4148	0,7	15/02	gamma	12,0319	2,2541
0,7		gamma	17,8942	1,9901	0,8		gamma	17,5057	1,7029
0,5			gamma	7,6336	3,0825				
0,6	15/02	gamma	10,0646	2,5283					
0,7		gamma	14,2386	2,0458					
0,8		gamma	16,9679	1,9117					

1-Fração da CAD mantida pela irrigação. 2-Os parâmetros da fdp normal são média e desvio-padrão

Tabela 18 – Funções de distribuição de probabilidades (fdp), exponencial (Exp), gamma e log-normal (Lnorm) e seus parâmetros, selecionadas para determinar o número de irrigações por ano, para os grupamentos de solos, Charrua, Ciríaco, Guassupi, Júlio de Castilhos, São Pedro, Venda Grande e Cerrito; para os diferentes manejos (M) de irrigação e para as épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.

M ¹	ES	fdp	Escalar	Forma	M ¹	ES	fdp	Escalar	Forma
Charrua, Ciríaco, Guassupi e J. de Castilhos					São Pedro, Venda Grande e Cerrito				
0,8	15/08	gamma	2,2399	2,5555	0,6	15/08	gamma	0,2946	6,789
0,5		gamma	0,5040	3,9685	0,7	01/09	gamma	0,9042	3,263
0,7	01/09	gamma	1,6642	2,4423	0,8		gamma	2,2525	1,865
0,8		gamma	2,8611	2,2828	0,6		gamma	0,6786	3,389
0,5		gamma	0,6750	3,3204	0,7	15/09	gamma	1,2827	2,436
0,6	15/09	gamma	0,9793	3,3018	0,8		gamma	2,875	1,652
0,7		gamma	1,4476	3,3204	0,6		gamma	0,8138	2,97
0,8		gamma	2,9961	2,4375	0,7	01/10	gamma	1,4223	2,385
0,5		gamma	0,6727	3,6666	0,8		gamma	3,0501	1,742
0,6	01/10	gamma	1,0334	3,6209	0,5		gamma	0,7198	2,672
0,7		gamma	1,7944	2,9177	0,7	15/10	gamma	1,7371	2,089
0,8		gamma	3,5375	2,4149	0,8		gamma	2,9431	2,077
0,6		gamma	1,2991	2,9935	0,5	01/11	gamma	0,8316	2,694
0,7	15/10	gamma	2,3637	2,4584	0,8		LNorm	1,6529	0,759
0,8		gamma	3,8603	2,3314	0,7	15/11	gamma	2,2817	2,144
0,5		gamma	0,8818	3,1876	0,8		gamma	3,1452	2,552
0,6	01/11	gamma	1,0543	4,1630	0,7	15/01	gamma	1,608	2,288
0,7		gamma	2,0073	3,1595	0,8		gamma	3,3299	1,712
0,8		gamma	3,7077	2,6902	0,8	01/02	gamma	1,9775	2,410
0,5		gamma	1,2223	2,6754	0,8	15/02	gamma	2,1073	2,013
0,6	15/11	gamma	1,3538	3,4138					
0,7		gamma	2,1026	3,3042					
0,8		gamma	3,7209	2,9700					
0,5		gamma	0,8594	2,7429					
0,6	15/01	Exp	2,8438						
0,7		gamma	1,7974	2,5732					
0,8		gamma	3,3434	2,0290					
0,6	01/02	gamma	0,6967	3,6132					
0,8		gamma	1,6436	2,3749					
0,6		gamma	0,5600	3,9024					
0,7	15/02	gamma	1,1884	2,6559					
0,8		gamma	1,3511	2,3990					

1-Fração da CAD mantida pela irrigação.

As fdps ajustadas para a lâmina de irrigação e número de irrigações, são semelhantes, com outros parâmetros, às encontradas para a distribuição dos valores de precipitação (SILVA et al., 2007) e para a deficiência hídrica do feijoeiro (SILVA, 2005), estimadas para a região central do Rio Grande do Sul. Isso confirma que a distribuição dos valores de precipitação influencia a distribuição dos valores de irrigação e do número de irrigações.

Em alguns casos, houve o ajuste da função normal à distribuição dos dados, a qual não se ajusta aos dados de precipitação observados na estação meteorológica principal de Santa Maria, RS (SILVA et al., 2007). Portanto, pode-se afirmar que no caso da distribuição dos dados de lâmina de irrigação e do número de irrigações a assimetria à esquerda não é tão forte quanto na distribuição dos valores de precipitação. O ajuste da função normal à distribuição dos dados de lâmina de irrigação para o Feijão Caupi, para os municípios de Parnaíba e Teresina, também foi relatado por Frizzone et al. (2005) e para o feijão em cinco municípios do Paraná por Oliveira & Villa Nova (1996). Outro motivo que pode ter influenciado na distribuição das variáveis é o número de dados, pois, conforme Thom (1958) quando se aumenta o número de dados ocorre a tendência de ajuste destes à distribuição normal. Supostamente no Piauí e no Paraná a irrigação é mais freqüente do que no Rio Grande do Sul devido às características climáticas dessas regiões, portanto nas situações com maior número de dados, irrigações mais freqüentes, ocorre aproximação à distribuição normal enquanto que para situações com menor exigência em irrigação ou menor freqüência na irrigação ocorre assimetria à esquerda na distribuição dos dados.

Com as fdps ajustadas foi possível obter a estimativa da lâmina bruta de irrigação necessária para o feijoeiro, para os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos (Tabela 19) e para os solos São Pedro, Venda Grande e Cerrito (Tabela 20), bem como para os demais solos estudados (APÊNDICES C à R). Notou-se uma redução dos valores das estimativas com a redução da probabilidade, sendo esta a tendência natural, pois as estimativas são baseadas em probabilidade de não-excedência, ou seja, para um determinado valor de probabilidade a lâmina de irrigação não é maior que "X", ou ainda, pode-se afirmar que com um determinado nível de probabilidade que a lâmina de irrigação é menor ou igual à "X" (FRIZZONE et al., 2005).

Tabela 19 – Estimativa da lâmina bruta máxima de irrigação (mm) necessária à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos, Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos, em cada manejo (M) de irrigação e cada época de semeadura (ES), simuladas em todos os anos agrícolas do período entre 1968 e 2006.

ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência			ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência		
		95%	90%	75%			95%	90%	75%
15/Ago	0,5	74,3	65,0	51,3	01/Nov	0,5	104,7	89,4	67,1
	0,6 ²	93,3	80,4	57,6		0,6	122,1	106,1	82,5
	0,7	106,3	89,5	65,3		0,7	145,4	124,7	94,4
	0,8	120,8	100,5	71,7		0,8	166,9	141,9	105,7
01/Set	0,5	87,8	74,7	55,8	15/Nov	0,5	112,9	95,0	69,3
	0,6	108,3	90,3	64,6		0,6	125,4	106,6	79,5
	0,7	121,0	100,7	71,8		0,7	142,5	122,0	92,0
	0,8	137,9	114,2	80,7		0,8	168,6	143,4	106,9
15/Set	0,5	139,6	107,3	64,6	15/Jan	0,5	79,5	66,4	47,8
	0,6	111,0	94,8	71,4		0,6	76,9	64,4	46,6
	0,7	129,9	110,2	81,7		0,7	99,1	82,9	59,8
	0,8	149,6	124,3	88,5		0,8	111,6	92,2	64,8
01/Out	0,5	91,5	79,6	62,1	01/Fev	0,5	56,9	48,5	36,3
	0,6	115,7	100,1	77,0		0,6	71,9	59,8	42,7
	0,7	128,8	110,4	83,6		0,7	84,6	69,3	48,0
	0,8	156,3	131,8	96,7		0,8 ²	91,8	70,3	64,1
15/Out	0,5	102,1	87,2	65,4	15/Fev	0,5	49,0	41,5	30,7
	0,6	117,6	101,0	76,7		0,6	56,2	46,9	33,7
	0,7	148,6	124,7	90,4		0,7	68,6	56,4	39,2
	0,8	164,2	137,8	100,1		0,8	78,1	63,8	43,8

1-Fração da CAD mantida pela irrigação. 2-Valores determinados pela distribuição empírica.

Tabela 20 – Estimativa da lâmina máxima bruta de irrigação (mm) necessária à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos São Pedro, Venda Grande e Cerrito, manejos (M) de irrigação de 0,5, 0,6, 0,7 e 0,8 e nas 10 épocas de semeadura (ES), simuladas em todos os anos agrícolas do período entre 1968 e 2006.

ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência			ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência		
		95%	90%	75%			95%	90%	75%
15/Ago	0,5	87,1	74,1	55,3	01/Nov	0,5	98,8	84,3	63,2
	0,6	86,7	75,3	58,6		0,6	109,5	92,5	68,1
	0,7	94,4	80,7	60,8		0,7	117,2	98,0	70,7
	0,8	105,8	87,3	61,3		0,8	135,4	113,9	83,2
01/Set	0,5 ²	92,9	91,6	61,5	15/Nov	0,5	101,0	84,6	61,2
	0,6	139,6	107,3	64,6		0,6	105,3	88,7	64,9
	0,7	108,2	91,4	67,3		0,7	120,6	101,2	73,4
	0,8	125,9	100,9	66,6		0,8	138,9	117,4	86,3
15/Set	0,5 ²	92,1	90,7	52,1	15/Jan	0,5	59,3	51,4	39,7
	0,6	95,6	85,0	67,3		0,6	70,7	59,2	42,7
	0,7	119,8	97,8	67,2		0,7	87,9	72,4	50,6
	0,8	133,5	107,5	71,6		0,8 ²	48,0	42,0	33,0
01/Out	0,5 ²	99,0	91,8	47,0	01/Fev	0,5	47,7	42,6	34,0
	0,6	113,8	90,1	61,0		0,6	73,2	60,2	42,0
	0,7	107,0	90,3	66,2		0,7	87,1	71,1	48,8
	0,8	128,0	105,8	74,3		0,8	87,1	71,1	48,8
15/Out	0,5 ²	97,6	97,1	41,6	15/Fev	0,5 ²	33,3	32,3	31,2
	0,6	108,7	90,0	63,6		0,6	41,0	36,8	29,7
	0,7	108,1	90,8	65,9		0,7	62,0	51,3	36,2
	0,8	131,5	109,9	79,2		0,8	74,5	60,2	40,5

1-Fração da CAD mantida pela irrigação. 2-Valores determinados pela distribuição empírica.

A variação da lâmina de irrigação (Tabelas 19 e 20) ao longo das ES é bastante semelhante ao observado para o comportamento de suas médias (Tabela 14), ou seja, maior necessidade de irrigação nas ES do final da safra e menor necessidade no final da safrinha. Essa constatação confirma as conclusões obtidas por Silva (2005) que indicou como épocas de menor risco de ocorrência de estresse hídrico para o feijoeiro, na região central do RS, as ES do início da safra e final da safrinha, não recomendando as ES do final da safra, em cultivos não irrigados, recomendações também encontradas em Maluf et al. (2001) para várias regiões do RS e Matzenauer et al. (2004) para a região do Planalto Médio.

Os valores de lâmina de irrigação variaram entre 168,5 mm (ES de 15/11, manejo 0,8 e probabilidade de 95%) e 30,7 mm (ES de 15/02, manejo 0,5 e probabilidade de 75%), para os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos (Tabela 19). Para os solos São Pedro, Venda Grande e Cerrito (Tabela 20) o valor máximo foi de 138,9 mm (ES de 15/11, manejo de irrigação 0,8 e 95% de probabilidade de ocorrência), e os valores mínimos foram de cerca de 30 mm (ES de 15/02, manejos de irrigação 0,6 e 0,5 e probabilidade de ocorrência de 75%).

A mesma variação observada para a lâmina de irrigação em relação à probabilidade de ocorrência e em relação às ES foi observada para as estimativas do número de irrigações por ano de cultivo (Tabelas 21 e 22). O número de irrigações estimado variou entre 23 e duas vezes, para os solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos para a ES de 15/11, manejo de irrigação 0,8 e 95% de probabilidade de ocorrência e para a ES de 15/02, manejo de irrigação 0,5 e 75% de probabilidade de ocorrência, respectivamente. Para os solos São Pedro, Venda Grande e Cerrito, ES de 15/11, manejo de irrigação 0,8 e 95% de probabilidade de ocorrência e para a ES de 15/02, manejo de irrigação 0,5 e 75% de probabilidade de ocorrência, o número de irrigações estimado variou entre 18 e duas vezes, respectivamente.

A determinação dos valores máximos possíveis de acontecer em uma determinada situação é uma informação importante em projetos de irrigação, para o dimensionamento dos equipamentos e tubulações (FRANKE, 1996). Por exemplo, se forem considerados os solos São Pedro, Venda Grande e Cerrito, a ES de 15/11, nível de manejo 0,6 e a probabilidade de ocorrência de 90%, a lâmina bruta de irrigação necessária para o feijoeiro foi 88,7 mm e o número de irrigações previstas foi de seis vezes. Isso significa que em 90% dos casos (nove em cada dez anos) os valores de lâmina bruta de irrigação serão de no máximo 88,7 mm, durante todo cultivo, aplicados em seis vezes. Esse valor será superado somente em um de cada dez anos com necessidade de irrigação, o que representa um risco de falha de 10%, aceitável para o planejamento de irrigação (FRANKE, 1996). Interpretação semelhante pode ser realizada para as outras condições de solo, época de semeadura, manejo de irrigação e probabilidade de ocorrência.

É importante salientar que a probabilidade determinada poder ser reduzida, pois as fdps e valores determinados para as probabilidades especificadas foram estimados para os valores diferentes de zero, ou seja, quando houve irrigação, porém houve casos que em alguns anos agrícolas não foi necessário irrigar (Figura 7). Como por exemplo, para as mesmas condições citadas anteriormente, a probabilidade de 90% se reduziria para aproximadamente 86%, considerando-se os anos com e os anos sem irrigação, pois ao multiplicar a probabilidade de 90% pela probabilidade de ocorrência da irrigação ou porcentagem de anos com irrigação de 95% (Figura 7) obtém-se o valor 85,5%. Isso significa que para a probabilidade de 85,5% o valor máximo de irrigação será de 88,7 mm, durante todo cultivo, aplicados em seis vezes, nas condições especificadas. Considerando-se a ocorrência ou não da irrigação e o valor da irrigação tem-se uma distribuição do tipo mista, pois a ocorrência ou não da irrigação é uma variável aleatória discreta enquanto que o valor da lâmina de irrigação, ou seja, quanto de água será aplicado é uma variável aleatória contínua.

As estimativas de lâmina de irrigação e do número de irrigações são aproximações das necessidades de irrigação nas condições edafoclimáticas avaliadas. A recomendação quanto à adoção da prática da irrigação, bem como do nível de manejo a ser utilizado, somente deverá ser efetuada após análise detalhada de cada caso, quanto ao nível de tecnologia adotado na propriedade, tipo de solo, manejo de solo, presença ou não de camadas compactas no solo, poder de investimento do agricultor, estudo de viabilidade econômica, entre outros fatores (OLIVEIRA, 1990; DORFMAN, 1992; FRANKE, 1996).

Tabela 21 – Estimativa do número de irrigações por ano necessárias à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos, Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos, em cada manejo (M) de irrigação e época de semeadura (ES), simuladas em cada ano agrícola do período entre 1968 e 2006.

ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência			ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência		
		95%	90%	75%			95%	90%	75%
15/Ago	0,5 ²	3	3	2	01/Nov	0,5	6	5	4
	0,6 ²	5	5	3		0,6	8	7	6
	0,7 ²	8	8	5		0,7	13	11	8
	0,8	13	11	8		0,8	22	18	13
01/Set	0,5	4	3	3	15/Nov	0,5	7	6	4
	0,6 ²	6	6	4		0,6	9	8	6
	0,7	9	8	5		0,7	14	12	9
	0,8	15	12	9		0,8	23	20	14
15/Set	0,5	5	4	3	15/Jan	0,5	5	4	3
	0,6	7	6	4		0,6	9	7	4
	0,7	10	8	6		0,7	10	8	6
	0,8	16	14	10		0,8	16	13	9
01/Out	0,5	5	4	3	01/Fev	0,5 ²	3	3	3
	0,6	7	6	5		0,6	5	4	3
	0,7	11	9	7		0,7 ²	7	7	5
	0,8	19	16	11		0,8	9	7	5
15/Out	0,5 ²	7	5	3	15/Fev	0,5 ²	3	3	2
	0,6	8	7	5		0,6	4	4	3
	0,7	13	11	8		0,7	7	6	4
	0,8	20	17	12		0,8	7	6	4

1-Fração da CAD mantida pela irrigação. 2-Valores determinados pela distribuição empírica.

Tabela 22 – Estimativa do número de irrigações por ano necessárias à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos São Pedro, Venda Grande e Cerrito, em cada manejo (M) de irrigação e época de semeadura (ES), simuladas em cada ano agrícola do período entre 1968 e 2006.

ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência			ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência		
		95%	90%	75%			95%	90%	75%
15/Ago	0,5 ²	3	3	2	01/Nov	0,5	5	4	3
	0,6	3	3	2		0,6 ²	7	6	4
	0,7 ²	5	4	3		0,7 ²	11	9	5
	0,8 ²	8	7	6		0,8	18	14	9
01/Set	0,5 ²	3	3	2	15/Nov	0,5 ²	6	4	4
	0,6 ²	4	4	3		0,6 ²	7	6	5
	0,7	6	5	4		0,7	11	9	7
	0,8	10	8	6		0,8	18	15	11
15/Set	0,5 ²	4	3	2	15/Jan	0,5 ²	4	4	3
	0,6	5	4	3		0,6 ²	6	6	3
	0,7	7	6	4		0,7	8	7	5
	0,8	12	10	6		0,8	14	12	8
01/Out	0,5 ²	4	3	3	01/Fev	0,5 ²	3	3	2
	0,6	5	4	3		0,6 ²	3	3	3
	0,7	8	6	5		0,7 ²	6	6	4
	0,8	13	11	7		0,8	11	9	6
15/Out	0,5	4	3	3	15/Fev	0,5 ²	3	3	2
	0,6 ²	7	6	4		0,6 ²	4	3	2
	0,7	8	7	5		0,7 ²	6	5	3
	0,8	14	12	8		0,8	10	8	6

1-Fração da CAD mantida pela irrigação. 2-Valores determinados pela distribuição empírica.

5 CONCLUSÕES

A duração do ciclo do feijoeiro e de suas etapas é variável conforme a época de semeadura e segue a distribuição normal.

Para a probabilidade de ocorrência de 90% (em 90% dos casos) a variação da duração dos subperíodos entre as épocas de semeadura foi de sete a 23 dias para emergência-primeira folha trifoliada, de 11 a 29 dias para primeira folha trifoliada - terceira folha, de 21 a 38 dias para o subperíodo terceira folha-início da floração, entre dez e 13 dias para o intervalo de tempo entre o início da floração e o final da floração, entre 12 e 20 dias para o subperíodo entre o final da floração e o enchimento de grãos, entre 24 e 68 dias, para o subperíodo início do enchimento de grãos - maturação fisiológica, e para o ciclo completo a amplitude dos valores de duração varia entre 86 e 137 dias.

As épocas de semeadura do final da safra apresentaram a menor duração do ciclo e de seus subperíodos, enquanto que as épocas de semeadura do início da safra e da safrinha têm as maiores durações de ciclo, com maior duração dos subperíodos iniciais do ciclo nas épocas de semeadura do início da safra e nas épocas da safrinha, nos subperíodos finais do ciclo do feijoeiro.

Nos solos em que a capacidade de armazenamento de água disponível é menor, o número de anos com irrigação foi maior em relação aos demais solos e é pouco variável ao longo das épocas de semeadura.

A lâmina e o número de irrigações foram maiores nas épocas de semeadura do final da safra (15/10 a 15/11), menores na safrinha (15/01 a 15/02) e intermediários no início da safra.

As funções de distribuição gamma, log-normal, normal e Weibull podem ser utilizados para determinar a probabilidade de ocorrência de certos níveis (valores) de duração do ciclo e dos subperíodos; lâmina e número de irrigações e, ao contrário, determinar a duração, a lâmina e o número de irrigações para certos níveis de probabilidade. Para a duração dos subperíodos as funções gamma, log-normal, normal e Weibull tiveram ajuste significativo em 26%, 24%, 26% e 24% dos casos,

respectivamente, enquanto que para o ciclo total o ajuste foi em 27%, 27%, 23% e 23% dos casos, respectivamente. Para a lâmina de irrigação as fdps com ajuste estatisticamente significativo foram gamma, Weibull, log-normal, normal, e exponencial, em 25%, 23%, 22%, 21% e 9% dos casos, respectivamente, e em 27%, 25%, 22%, 12% e 14% dos casos, respectivamente, para o número de irrigações.

Considerando-se os anos em que se faz necessária a irrigação e uma probabilidade de 90% de ocorrência de irrigação, a lâmina total de irrigação e o número de irrigações necessárias, para os cultivos de feijão nos solos Charrua, Ciríaco, Guassupi e Júlio de Castilhos variaram entre 42 e 107 mm, aplicados de três a seis vezes por ano de cultivo, para o manejo 0,5; variaram entre 47 e 107 mm, aplicados de quatro a oito vezes, para o manejo 0,6; variaram entre 56 e 125 mm, aplicados de seis a doze vezes, para o manejo 0,7 e variaram entre 64 e 143 mm, aplicados de seis a vinte vezes durante o ciclo de cultivo para o manejo 0,8. Dessa forma, a lâmina de água média por irrigação foi de aproximadamente 16 mm, 13 mm, 10 mm e 9 mm para os manejos 0,5; 0,6; 0,7 e 0,8, respectivamente.

Para os anos em que foi utilizada a irrigação em 90% dos casos, a lâmina de água e o número de irrigações determinados para os solos São Pedro, Venda Grande e Cerrito, variaram entre 32 e 97 mm, entre 37 e 107 mm, entre 51 e 101 mm e entre 42 e 117 mm, em três a quatro aplicações, em três a seis aplicações, entre quatro e sete vezes e entre sete e quinze aplicações para os manejos 0,5; 0,6; 0,7 e 0,8, respectivamente. A lâmina de água média requerida em cada irrigação foi de aproximadamente 18 mm para o manejo 0,5, 15 mm para o manejo 0,6, 14 mm para o manejo 0,7 e 7 mm para o manejo 0,8.

REFERÊNCIAS

- 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, 2002. **Anais...** Santa Maria; UFSM, 2002. CD-ROM.
- ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; FRIZZONE, J.A.; SENTELHAS, P.C. Simulação da precipitação diária para Parnaíba e Teresina, PI, em planilha eletrônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.2, p.271-278, 2001.
- ANDRADE, R.S. da. **Consumo relativo de água do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) no sistema de plantio direto em função da porcentagem de cobertura morta do solo**. 2001. 52f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)–Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.
- ANDREATTA, J.A. et al. Monitoramento da irrigação e da aplicação de defensivos agrícolas em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. cv. IAC-Carioca80). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 7, 1991, Viçosa, MG. **Resumos...**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/Universidade Federal de Viçosa, 1991. p.268-270.
- ARAÚJO, W.F. et al. Precipitação pluviométrica mensal provável em Boa Vista, Estado de Roraima, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.3, p.563-567, 2001.
- ASSIS, F.N. de. **Modelagem da ocorrência e da quantidade de chuva e de dias secos em Piracicaba, SP, e Pelotas, RS**. 1991. 134f Tese Doutorado (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1991.
- ASSIS, F.N.; ARRUDA, H.V.; PEREIRA, A.R. **Aplicações de estatísticas à climatologia: teoria e prática**. Pelotas: Editora Universitária, Universidade Federal de Pelotas, 1996. 161p.
- 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.
- BARGER, G.L.; THOM, H.C.S. Evaluation of drought hazard. **Agronomy Journal**, Madison, v.41, n.11, p.519-526, 1949.

- BARBANO, et al. Comparação entre valores observados e estimados de duração dos diferentes subperíodos de desenvolvimento da cultura do feijoeiro. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.1, p.103-110, 2001.
- BERGAMASCHI, H. et al. Deficiência hídrica em feijão I. Análise de crescimento e fenologia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.23, n.7, p.733-743, 1988.
- BERGAMASCHI, H. et al. Deficiência hídrica em feijoeiro. III. Evapotranspiração máxima e relação com a evapotranspiração calculada pelo método de Penman e com a evaporação do tanque "Classe A". **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.24, n.4, p.387-392, 1989.
- BERLATO, M.A.; MOLION, L.C.B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre, n.7, 1981. 96p. (Boletim Técnico – IPAGRO).
- BERLATO, M.A. As condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos da estiagem na produção agrícola. In: Bergamaschi, H. (coord.) **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. p.11-23.
- 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, 1973. 431 p. DNPEA. Boletim Técnico, nº30.
- BOTELHO, V.A.V.A.; MORAIS, A.R. de Estimativas dos parâmetros da distribuição gamma de dados pluviométricos do município de Lavras, Estado de Minas Gerais. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v.23, n.3, p.697-706, 1999.
- BURATTO, J.S. et al. Adaptabilidade e estabilidade produtiva em genótipos precoces de feijão no Estado do Paraná. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 3, p. 373-380, 2007.
- BURIOL, G.A. et al. Probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas do ar prejudiciais à fecundação das flores de arroz na região da depressão central, estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 1-9, 1998.
- 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.
- 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.

- CAMPOS, H. **Estatística experimental não-paramétrica**. Piracicaba: ESALQ, 1979. 343p.
- CARAMORI, P.H. et al. Zoneamento de riscos climáticos e definição de datas de semeadura para o feijão no Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3, (nº Especial: Zoneamento Agrícola), p.477-485, 2001.
- CARDOSO, C.D.V. **Probabilidade de ocorrência de deficiência hídrica nos solos da região Central do Estado do Rio Grande do Sul**. 2005. 162 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; MATZENAUER, R.; TRINDADE, J. K. da. Ajustes de funções de distribuição de probabilidade à radiação solar global no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.12, p.1157-1166, 2004.
- CASTELLVÍ, F.; MORMENEO, I.; PEREZ, P.J. Generation of daily amounts of precipitation from standard climatic data: a case study for Argentina. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.289, n.1-4, p.286-302, 2004.
- CASTRO, R. **Distribuição probabilística da frequência de precipitação na região de Botucatu, SP**. 1994. 101f. Dissertação Mestrado (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1994.
- 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.
- COSTA, J.G.C.; ZIMMERMANN, M.J.O. Melhoramento genético. In: ZIMMERMANN, M.J.O. et al. **Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1988. p.229-245.
- DAMÉ, R.C.F.; TEIXEIRA, C.F.A.; SOUTO, M.V. Análise de frequência dos dados de precipitação pluvial de algumas estações agroclimatológicas da região Sul do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.26, n.3, p.351-355, 1996.
- DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campinas Grande: UFPB, 1994. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 33).
- DOORENBOS, J., PRUITT, W. O. **Las necesidades de agua de los cultivos**. Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1977, 194p. (FAO Riego e Drenagem, nº 24)
- DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A.L. **Produção de feijão**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 385p.
- DOURADO NETO, D. et al. Modelo fisiológico para estimativa da produtividade da cultura de feijão. In: Congresso Nacional de Feijão, 7, 2002, Viçosa. **VII Congresso**

Nacional de Feijão: resumos expandidos. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002. v. 1. p. 66-69.

DORFMAN, R. Irrigar ou não: eis a questão! In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 9.,1991, Natal. **Anais...** Fortaleza: ABID, 1992, v.2, p. 1791-1812.

ELTZ, F.L.F.; REICHERT, J.M.; CASSOL, E.A. Período de retorno de chuvas em Santa Maria, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, n.2, p.265-269, 1992.

EMBRAPA. **Feijão: o produtor pergunta, a Embrapa responde.** Brasília. Embrapa Informação Tecnológica, 2003. 203p.

ESTEFANEL, V.; SCHNEIDER, F. M.; BURIOL, G.A. Probabilidade de ocorrência de temperaturas máximas do ar prejudiciais aos cultivos agrícolas em Santa Maria-RS, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 57-63, 1994.

ESTEFANEL, V., et al. Insolação e radiação solar em Santa Maria, RS: I – Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 20, n. 3-4, p. 203-218, 1990.

FARIA, R.T. Irrigação. In: FUNDAÇÃO DO INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ, ed. **O feijão no Paraná.** Londrina, 1989. p.145-165. (IAPAR, Circular, 63).

FARIA, R.T. et al. Crescimento e desenvolvimento do feijoeiro sob diferentes regimes térmicos e hídricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10, 1997, Piracicaba, **Anais...**, Piracicaba, SP: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1997. p.659-661.

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**, Santa Maria, v.10, n.2, p.341-349, 2002.

FRANKE, A.E. **Avaliação econômica da irrigação, sob condições de risco, nas condições edafoclimáticas do Planalto Médio e Missões, RS.** 1996. 116f. Tese (Doutorado em Hidrologia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

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

GONÇALVES, S.L. et al. Probabilidade de ocorrência de temperaturas superiores a 30°C no florescimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L), cultivado na safra das águas no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v.5, n.1, p.99-107, 1997.

GU, W. et al. Analysis of genes controlling photoperiod sensitivity in common bean using DNA markers. **Euphytica**, Netherlands, v.102, n.1, p.125-132, 1998.

GUIMARÃES, C.M. Efeitos fisiológicos do estresse hídrico. In: ZIMMERMANN, M.J.O. et al. **Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1988. p.157-174.

GUIMARÃES, C.M. et al. Uso de microlisímetros na determinação da evapotranspiração do feijoeiro da seca. In: I REUNIÃO NACIONAL DA PESQUISA DE FEIJÃO, 1982, Goiânia. **Anais...** Goiânia: EMBRAPA-CNPAF, 1982, p. 133-137.

GUTIERREZ, A.P. et al. A model of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) growth types I-III: factors affecting yield. **Agricultural Systems**, Oxford, v.44, p.35-63, 1994.

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

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.

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

KELLING, C.R.S. **Efeito da disponibilidade de água no solo sobre os componentes do balanço hídrico e o rendimento do feijoeiro**. Santa Maria, 1995, 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)–Universidade Federal de Santa Maria, 1995.

KORNEGAY, J. et al. Inheritance of photoperiod response in andean and mensoamerican common bean. **Crop Science**, Madison, v.33, n.2, p.977-984, 1993.

LYRA, G.B. et al. Regiões homogêneas e funções de distribuição de probabilidade da precipitação pluvial no Estado de Táchira, Venezuela. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.2, p.205-215, 2006.

MACK, H.J.; VARSEVELD, G.H. Response of bush snap beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to irrigation and plant density. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v.107, n.2, p.286-290, 1982.

MACHADO, F.P. **Contribuição ao estudo do clima do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro: Serviço gráfico do Instituto Nacional Brasileiro de Geografia e Estatística. 1950.

MALUF, J.R.T.; CAIAFFO, M.R.R. Zoneamento agroclimático da cultura de feijão no Estado do Rio Grande do Sul: recomendações de períodos favoráveis de semeadura por região agroecológica. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 6., 1999, Salvador, BA. **Resumos...**, Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. p.455-458.

MALUF, J.R.T. et al. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura de feijão no Rio Grande do Sul. . **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3 (nº Especial: Zoneamento Agrícola), p.468-476, 2001.

MARQUES, S.J.; SAAD, J.C.C.; MOURA, M.V.T. de. Modelo Iterativo para Estimativa da Evapotranspiração de Referência Provável. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.52, n.2, p.221-225, 1995.

MASSIGNAM, A.M. et al.. Ecofisiologia do feijoeiro. II - Redução do rendimento pela ocorrência de altas temperaturas no florescimento. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.1, p.41-45, 1998.

MATZENAUER, R., MALUF, J.R.J; BUENO, A.C. Evapotranspiração da cultura do feijoeiro e relação com a evapotranspiração do tanque classe "A". **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.4, n.2, 1998.

MATZENAUER, R.; MALUF, J.R.J.; BUENO, A.C. Relações entre a evapotranspiração máxima do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) com a evapotranspiração de referência e com a radiação solar global. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.2, p.173-178, 1999.

MATZENAUER, R. et al. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura do feijoeiro na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.5, p.1363-1369, 2004.

MEDEIROS, G.A. et al. Crescimento vegetativo e coeficiente de cultura do feijoeiro relacionados a graus-dia acumulados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.9, p.1733-1742, 2000.

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

MOREIRA, J.A.A.; SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F. Irrigação. In: ARAÚJO, R.S. et al.. (Ed.). **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Potafós, 1996. p. 465-522.

MOREIRA, J.A.A. **Estudo da tensão da água do solo para as culturas do feijão, milho e trigo, cultivadas em plantio direto, visando a irrigação por aspersão**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999.

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

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. **Balanço hídrico diário do solo simulado para diferentes épocas de semeadura do milho em Santa Maria, RS.** 2003. 73f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

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.

OLIVEIRA, D. de, VILLA NOVA, N.A. Evapotranspiração máxima e lâminas de irrigação necessárias para o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) no Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia.** Santa Maria, v.4, n.1, p.29-36, 1996.

PALYNCHUK, B.; GUO Y. Threshold analysis of rainstorm depth and duration statistics at Toronto, Canada. **Journal of Hydrology, Amsterdam,** v.348, p. 535-545, 2008.

PERAZA, J.E.S. **Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul.** 2003. 117 f. 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.

PIRES, R.C.M. et al. Profundidade do sistema radicular das culturas de feijão e trigo sob pivô central. **Bragantia,** Campinas, v.50, n.1, p.153-162, 1991.

POMPEU, A.S. Feijão. In: FURLANI, A.M.C.; VIÉGAS, G.P. **O melhoramento de plantas no Instituto Agrônômico.** Campinas: Instituto Agrônômico, 1993, v.1, p.111-155.

RIBEIRO, A.M.; LUNARDI, D.M.C. A precipitação mensal provável para Londrina – PR, através da função gamma. **Energia na Agricultura,** Botucatu, v.12, n.4, p.37-44, 1997.

RIBEIRO, N.D. et al. Variabilidade genética para ciclo em feijão dos grupos preto e carioca. **Revista Brasileira de Agrociência,** Pelotas, v. 10, n. 1, p. 19-29, 2004.

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

SAAD, J.C.C. **Estudo das distribuições de frequência da evapotranspiração de referência e da precipitação pluvial para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação.** 1990. 124p. Dissertação Mestrado (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1990.

SAAD, J.C.C.; SCALOPPI, E J. Análise dos principais métodos climatológicos para estimativa da evapotranspiração. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E

- DRENAGEM, 8., 1988, Florianópolis, **Anais...** Florianópolis: ABID, 1988. v.2, p.1037-1052.
- SANTOS, R.Z.; ANDRÉ, R.G.B. Consumo de água nos diferentes estádios de crescimento da cultura do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, n.4, p.543-548, 1992.
- SEDIYAMA, G.C. et al. Simulação de parâmetros climáticos para a época de crescimento das plantas. **Revista Ceres**, Viçosa, v.25, n.141, p.455-466, 1978.
- SILVA, J.G. da; SENTELHAS, P.C. Diferença de temperatura mínima do ar medida no abrigo e na relva e probabilidade de sua ocorrência em eventos de geada no Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.1, p.9-15, 2001.
- SILVA, W.L.C. et al. Subsídios para dimensionamento de sistemas de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., Florianópolis, 1988. **Anais...**, Florianópolis, ABID, 1988. p. 535-553. v.1.
- SILVA, J.C. da et al. Avaliação do uso da soma térmica para estimar as diferentes fases fenológicas e ciclo total de três cultivaras de feijoeiro. In: X REUNIÓN ARGENTINA Y IV LATINOAMERICANA DE AGROMETEOROLOGÍA. **Acta...**, Mar del Plata, Argentina, 2004. CD-ROM sem paginação.
- SILVA, J.C. da. **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) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- 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.
- SOUSA, S.A.V. de; FRIZZONE, J.A. Comparação entre a função normal e triangular para simulação do déficit de evapotranspiração. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 255-263, 1997.
- STEINMETZ, S. **Evapotranspiração máxima no cultivo de feijão de Inverno**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1984.
- STONE, L.F.; PEREIRA, A.L. Sucessão de arroz-feijão irrigados por aspersão: efeitos de espaçamento entre linhas, adubação e cultivar no crescimento, desenvolvimento radicular e consumo d'água do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.6, p.939-954, 1994.
- STONE, L.F.; SILVA, S.C. da. **Uso do tanque Classe A no controle da irrigação do feijoeiro no sistema plantio direto**. Pesquisa em foco. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, n.25, 2p. 1999.

- STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. da. **Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação**. Goiânia: Embrapa, CNPAF, APA, 1995. 49p. (Embrapa, Documentos, 55).
- STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. da. Irrigação por aspersão nas culturas do feijoeiro e do arroz de terras altas. **Item**, Belo Horizonte, v.58, p.28-36, 2003.
- THOM, H.C.S. A note on the gamma distribution. **Monthly Weather Review**, Washington, v. 86, p. 117-122. 1958.
- THORNTON, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology, [S.L.], v. 3, n. 10, 1955. 104p
- VAREJÃO SILVA, M.A. **Meteorologia e climatologia**. BRASÍLIA: INMET, Gráfica e Editora Stilo, 2000. 532p.
- VIEIRA, H.J., MASSIGNAM, A.M. Bioclimatologia da cultura do feijão. In: EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E DIFUSÃO DE TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA. **A cultura do feijão em Santa Catarina**. Florianópolis: EPAGRI, 1992.
- WALLACE, D.H. et al. Photoperiod, temperature, and genotype interaction effects on days and nodes required for flowering of bean. **American Society for Horticultural Science Journal**, Washington, v.116, p.534-543, 1991.
- WALLACE, D.H.; YAN, W.K. **Whole system plant physiology-breeding for plant maturity, adaptation, and yield**. Wallingford, Oxon, UK: CAB International, 1998.
- WANG, J.Y. A critique of the heat unit approach to plant response studies. **Ecology**, Washington, v.41, n.4, p.785-790, 1960.
- WILKS, D.S. Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.93, n.3, p.153-169, 1999.
- WHITE, J.W.; KORNEGAY, J.; CAJIAO, C. Inheritance of temperature sensitivity of the photoperiod response in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Euphytica**, Dordrecht, Netherlands, v.91, n. 1, 5-8, 1996.
- WUTKE, E.B. et al. Estimativa de temperatura base e graus-dia para feijoeiro nas diferentes fases fenológicas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 55-61, 2000

APÊNDICES

APÊNDICE A – Análise de variância da duração do ciclo total e dos subperíodos em função das épocas de semeadura (ES)

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F
----- Ciclo Total -----				
ES	9	71540,32	7948,925	129,13*
Erro	370	22775,54	61,55551	
Total	379	94315,87		
----- Semeadura - Primeira Folha trifoliada -----				
ES	9	4534,076	503,7863	76,82*
Erro	370	2426,5	6,558108	
Total	379	6960,576		
----- Primeira Folha trifoliada - Terceira folha trifoliada -----				
ES	9	5807,582	645,2868	105,51*
Erro	370	2262,974	6,116145	
Total	379	8070,555		
----- Terceira folha trifoliada - Início da floração -----				
ES	9	6910,108	767,7898	127,57*
Erro	370	2226,868	6,018563	
Total	379	9136,976		
----- Início da floração - Início da formação de vagens -----				
ES	9	429,2	47,68889	20,11*
Erro	370	877,4211	2,371408	
Total	379	1306,621		
----- Início da formação de vagens - Início do enchimento de grãos -----				
ES	9	954,4316	106,048	23,00*
Erro	370	1706	4,610811	
Total	379	2660,432		
----- Início do enchimento de grãos - Maturação Fisiológica -----				
ES	9	26425,88	2936,209	87,33*
Erro	370	12439,91	33,62138	
Total	379	38865,79		

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro.

APÊNDICE B – Análise de variância da lâmina de irrigação e do número de irrigações em função do tipo de solo, do manejo de irrigação, das épocas de semeadura (ES) e suas interações.

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F
----- Lâmina de irrigação -----				
Solo	5	104017,3	20803,5	24,00*
Manejo	3	184884,4	61628,1	71,09*
ES	9	783430,2	87047,8	100,41*
Solo x Manejo	15	26588,2	1772,5	2,04*
Solo x ES	45	39372,1	874,9	1,01 ^{ns}
Manejo x ES	27	48549,1	1798,1	2,07*
Solo x Manejo x ES	135	34136,0	252,9	0,29 ^{ns}
Erro	5998	5200026,0		
Total	6237	6421003,4		
----- Número de irrigações -----				
Solo	5	2897,3	579,5	91,86*
Manejo	3	11889,1	3963,0	628,25*
ES	9	3367,6	374,2	59,32*
Solo x Manejo	15	1409,0	93,9	14,89*
Solo x ES	45	879,8	19,6	3,10*
Manejo x ES	27	1457,5	54,0	8,56*
Solo x Manejo x ES	135	547,6	4,06	0,64 ^{ns}
Erro	5998			
Total	6237			

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não significativo.

APÊNDICE C – Funções de distribuição de probabilidades (fdp), Gamma, log-normal (Lnorm) e Weibull (Weib), selecionadas para determinar a lâmina anual de irrigação, para os grupamentos de solos, Oásis e São Gabriel; Santa Maria, para os diferentes manejos (M) de irrigação e para as épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.

M ¹	ES	fdp	Escalar	Forma	M ¹	ES	fdp	Escalar	Forma
Oásis e São Gabriel					Santa Maria				
0,7	01/09	Gamma	13,5569	3,8076	0,8	15/08	Gamma	15,1026	2,9151
0,8		Gamma	19,4356	2,8250	0,8	01/09	Gamma	17,1902	2,7998
0,8	15/09	Gamma	23,0575	2,6127	0,7	15/09	Gamma	16,0362	3,3631
0,8	01/10	Gamma	20,0634	3,2838	0,8		Gamma	23,0450	2,2966
0,5	15/10	Lnorm	3,7964	0,4313	0,7	01/10	Gamma	17,9226	2,5957
0,7		Gamma	21,1120	2,9583	0,8		Gamma	20,3939	2,4853
0,8		Gamma	21,7413	3,2344	0,5		Gamma	11,6242	3,7268
0,5	01/11	Lnorm	3,8897	0,4513	0,7	15/10	Lnorm	3,6648	0,6674
0,7		Gamma	23,7557	2,9331	0,8		Gamma	26,2091	2,0288
0,8		Gamma	20,9728	3,7855	0,6		Gamma	15,0551	3,4936
0,5	15/11	Gamma	14,2014	3,9918	0,7	01/11	Gamma	18,4204	3,0093
0,6		Gamma	17,3991	3,1134	0,8		Gamma	24,0424	2,2968
0,7		Gamma	22,8309	2,8311	0,5	15/11	Gamma	11,4047	3,4674
0,8		Gamma	22,1790	3,5718	0,6		Gamma	13,8535	3,8109
0,5	Gamma	8,8276	3,9847	0,7	Gamma		19,3543	2,6414	
0,6	15/01	Gamma	11,7157	3,2885	0,8	Gamma	24,0884	2,4507	
0,7		Gamma	18,6155	2,4573	0,5	15/01	Gamma	8,6410	3,4620
0,8		Gamma	24,6443	1,9829	0,6		Gamma	12,3974	2,6682
0,6	01/02	Gamma	7,3029	4,4793	0,7		Gamma	12,0044	3,1317
0,7		Gamma	16,7254	2,1917	0,8	Gamma	18,1297	2,6668	
0,6	15/02	Gamma	7,6273	3,6525	0,6		Gamma	7,7268	3,3691
0,7		Gamma	13,4409	2,1099	0,7	01/02	Gamma	8,5199	3,5827
0,8		Gamma	16,9679	1,9117	0,8		Weib	39,7355	1,6789
					0,7	15/02	Gamma	7,8111	3,4136
					0,8		Gamma	14,7316	1,8992

1 – Fração da CAD, mantida pelo manejo da irrigação.

APÊNDICE D – Funções de distribuição de probabilidades (fdp), exponencial (Exp), Gamma, log-normal (Lnorm) e normal (Norm) selecionadas para determinar a lâmina anual de irrigação, para os solos Vacacaí, Alto das Canas e Cambaí, para os diferentes manejos (M) de irrigação e para as épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.

M ¹	ES	Fdp	Escalar	Forma	M ¹	ES	Fdp	Escalar	Forma
Vacacaí					Alto das Canas e Cambaí				
0,8	15/08	Gamma	22,7230	2,1716	0,7	15/08	Exp	46,8757	
0,7	01/09	Gamma	13,7055	3,6344	0,8		Gamma	22,9354	2,2707
0,8		Gamma	31,1920	1,6992	0,6	01/09	Gamma	15,3850	3,0968
0,6		Lnorm	3,6817	0,7418	0,7		Gamma	24,1440	2,2175
0,7	15/09	Gamma	32,3738	1,4991	0,8		Gamma	22,3611	2,7530
0,8		Gamma	31,2463	1,7336	0,6	15/09	Gamma	16,4454	3,2290
0,5		Norm ²	47,9161	29,7872	0,7		Gamma	20,8649	2,6838
0,6	01/10	Gamma	16,2051	2,9422	0,8		Gamma	26,7083	2,4781
0,7		Gamma	15,3324	3,2361	0,6	01/10	Gamma	11,9836	4,7769
0,7	15/10	Gamma	18,4117	2,7195	0,7		Gamma	15,8005	4,0880
0,5		Norm ²	49,4800	20,6143	0,8		Gamma	22,0388	3,3874
0,6	01/11	Lnorm	3,7131	0,6991	0,6	15/10	Gamma	13,8510	4,1823
0,7		Gamma	20,6368	2,5921	0,7		Gamma	24,2500	2,6779
0,8		Gamma	22,9742	2,8389	0,8		Gamma	28,9635	2,6853
0,5	15/11	Gamma	17,0126	2,1511	0,5	01/11	Lnorm	3,7718	0,5818
0,6		Gamma	20,5671	2,2064	0,6		Gamma	20,5818	2,8783
0,7		Gamma	20,6389	2,7006	0,7		Gamma	18,8590	3,8450
0,8		Gamma	23,3222	2,7789	0,5	15/11	Gamma	17,2996	3,2078
0,5	15/01	Lnorm	3,0908	0,7390	0,6		Gamma	19,8430	2,9908
0,6		Norm ²	33,7126	16,4475	0,7		Gamma	17,0062	4,1318
0,7		Gamma	17,8544	2,1120	0,8		Gamma	24,5822	3,2600
0,8		Gamma	24,3875	1,7455	0,5	15/01	Gamma	11,9366	2,6873
0,5	01/02	Lnorm	2,7976	0,7037	0,6		Gamma	19,5204	2,0089
0,6		Gamma	9,3381	2,2799	0,7		Gamma	18,2448	2,4031
0,7		Gamma	19,1900	1,6598	0,8		Gamma	22,5156	2,2478
0,8		Gamma	18,7877	2,0537	0,5	01/02	Gamma	8,2252	3,4139
0,8	15/02	Gamma	17,7626	1,6932	0,6		Gamma	17,1530	1,9194
					0,7		Weib	41,5419	1,6464
					0,8		Gamma	20,9459	1,9935
					0,6	15/02	Gamma	11,4592	2,1447
					0,7		Gamma	16,6258	1,7449
					0,8		Gamma	20,5324	1,6945

1-Fração da CAD mantida pela irrigação. 2-Os parâmetros da função normal são média e desvio-padrão, ao invés de escalar e forma.

APÊNDICE E – Estimativa da lâmina bruta máxima de irrigação (mm) necessária à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos, Alto das Canas e Cambaí, em cada manejo (M) de irrigação e cada época de semeadura (ES), simuladas em todos os anos agrícolas do período entre 1968 e 2006.

ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)			ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)		
		95%	90%	75%			95%	90%	75%
15/Ago	0,5 ²	72,3	72,3	36,4	01/Nov	0,5	113,2	91,6	64,3
	0,6 ²	86,7	86,5	60,7		0,6	125,8	106,1	77,7
	0,7	140,4	107,9	65,0		0,7	142,0	122,1	92,9
	0,8	118,7	98,3	69,5		0,8	165,1	141,3	106,8
01/Set	0,5 ²	72,6	72,6	64,4	15/Nov	0,5	114,3	97,0	72,1
	0,6	99,1	83,9	62,1		0,6	124,7	105,4	77,6
	0,7	123,0	101,6	71,6		0,7	135,0	116,6	89,5
	0,8	132,5	111,3	81,0		0,8	164,3	139,7	104,0
15/Set	0,5 ²	101,4	72,7	71,0	15/Jan	0,5	69,5	58,3	42,3
	0,6	109,1	92,7	69,0		0,6	92,9	76,2	52,8
	0,7	121,4	101,8	73,8		0,7	98,2	81,7	58,3
	0,8	146,9	122,5	87,8		0,8	115,7	95,8	67,6
01/Out	0,5 ²	107,9	107,3	61,4	01/Fev	0,5	56,8	48,5	36,3
	0,6	106,0	92,3	72,1		0,6	79,1	64,7	44,4
	0,7	124,5	107,4	82,4		0,7	80,9	68,9	50,7
	0,8	151,4	129,0	96,6		0,8	99,1	81,3	56,2
15/Out	0,5 ²	108,8	107,8	71,2	15/Fev	0,5 ²	37,2	36,4	35,7
	0,6	111,0	95,9	73,7		0,6	57,0	47,0	32,9
	0,7	140,9	118,1	85,6		0,7	71,9	58,3	39,4
	0,8	168,6	141,4	102,5		0,8	87,0	70,4	47,3

1-Fração da CAD mantida pela irrigação. 2-Valores determinados pela distribuição empírica.

APÊNDICE F – Estimativa da lâmina bruta máxima de irrigação (mm) necessária à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos, Oásis e São Gabriel, em cada manejo (M) de irrigação e cada época de semeadura (ES), simuladas em todos os anos agrícolas do período entre 1968 e 2006.

ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)			ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)		
		95%	90%	75%			95%	90%	75%
15/Ago	0,5 ²	82,3	65,4	41,2	01/Nov	0,5	102,7	87,2	66,3
	0,6 ²	99,3	70,5	66,1		0,6 ²	112,1	104,5	81,9
	0,7 ²	101,0	99,5	61,0		0,7	147,2	124,2	91,2
	0,8 ²	107,2	96,8	68,3		0,8	156,2	134,1	101,9
01/Set	0,5 ²	82,7	82,7	41,7	15/Nov	0,5	109,9	94,7	72,4
	0,6 ²	96,2	97,1	66,3		0,6	112,5	95,3	70,6
	0,7	101,4	87,1	66,2		0,7	137,9	116,1	84,8
	0,8	117,2	98,7	72,1		0,8	158,3	135,4	102,1
15/Set	0,5 ²	82,9	82,9	41,2	15/Jan	0,5	68,3	58,8	44,9
	0,6 ²	82,7	67,7	66,0		0,6	78,8	67,0	50,0
	0,7 ²	110,6	96,5	73,7		0,7	101,8	84,8	60,7
	0,8	131,6	110,2	79,6		0,8	116,2	95,2	65,8
01/Out	0,5 ²	83,0	81,4	41,3	01/Fev	0,5 ²	55,1	52,8	40,2
	0,6 ²	113,5	98,1	64,9		0,6	61,6	53,4	41,4
	0,7 ²	123,4	118,2	75,1		0,7	84,5	69,8	49,0
	0,8	134,8	114,6	85,5		0,8 ²	91,8	70,3	64,1
15/Out	0,5	90,5	77,4	59,6	15/Fev	0,5 ²	53,1	41,4	40,3
	0,6 ²	113,0	108,8	71,8		0,6	55,3	47,4	35,8
	0,7	131,6	111,1	81,7		0,7	66,1	54,5	38,0
	0,8	144,5	122,7	91,4		0,8	78,1	63,8	43,8

1-Fração da CAD mantida pela irrigação. 2-Valores determinados pela distribuição empírica.

APÊNDICE G – Estimativa da lâmina bruta máxima de irrigação (mm) necessária à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para o solo Santa Maria, em cada manejo (M) de irrigação e cada época de semeadura (ES), simuladas em todos os anos agrícolas do período entre 1968 e 2006.

ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)			ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)		
		95%	90%	75%			95%	90%	75%
15/Ago	0,5 ²	82,7	62,1	41,4	01/Nov	0,5 ²	91,3	81,6	41,6
	0,6 ²	66,5	65,7	34,1		0,6	105,8	90,3	67,9
	0,7 ²	100,3	52,2	51,3		0,7	116,2	98,3	72,4
	0,8	93,2	78,6	57,7		0,8	125,5	104,0	73,6
01/Set	0,5 ²	82,9	82,9	61,5	15/Nov	0,5	79,7	68,0	51,1
	0,6 ²	101,1	96,6	65,0		0,6	103,7	89,0	67,7
	0,7 ²	102,6	99,2	51,4		0,7	111,3	93,3	67,5
	0,8	103,0	86,7	63,2		0,8	131,5	109,5	78,3
15/Set	0,5 ²	83,0	82,6	82,2	15/Jan	0,5	60,3	51,5	38,7
	0,6 ²	98,6	90,4	64,5		0,6	71,8	60,2	43,6
	0,7	109,6	93,4	69,8		0,7	77,9	66,1	49,0
	0,8	120,2	99,7	70,6		0,8	105,0	88,0	63,8
01/Out	0,5 ²	91,3	81,6	41,6	01/Fev	0,5 ²	40,7	40,6	30,0
	0,6 ²	99,2	97,4	55,7		0,6	52,9	45,1	33,7
	0,7	101,9	85,2	61,5		0,7	60,9	52,1	39,3
	0,8	112,4	93,8	67,2		0,8	76,4	65,3	48,3
15/Out	0,5	85,6	73,4	55,6	15/Fev	0,5 ²	40,8	40,3	30,0
	0,6 ²	120,8	87,9	46,6		0,6 ²	40,7	35,5	32,6
	0,7	117,0	91,8	61,2		0,7	54,0	46,0	34,5
	0,8	125,6	103,1	71,5		0,8	67,5	55,1	37,8

1-Fração da CAD mantida pela irrigação. 2-Valores determinados pela distribuição empírica.

APÊNDICE H – Estimativa da lâmina bruta máxima de irrigação (mm) necessária à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para o solo Vacacaí, em cada manejo (M) de irrigação e cada época de semeadura (ES), simuladas em todos os anos agrícolas do período entre 1968 e 2006.

ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)			ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)		
		95%	90%	75%			95%	90%	75%
15/Ago	0,5 ²	51,8	51,8	51,5	01/Nov	0,5	83,4	75,9	63,4
	0,6 ²	83,9	41,8	41,7		0,6	129,4	100,4	65,7
	0,7 ²	96,4	64,1	63,6		0,7	117,2	98,0	70,7
	0,8	114,1	94,1	66,1		0,8	139,1	117,1	85,6
01/Set	0,5 ²	52,1	52,1	51,5	15/Nov	0,5	84,8	70,0	49,0
	0,6 ²	83,8	81,9	54,8		0,6	104,4	86,3	60,7
	0,7	99,1	84,8	64,1		0,7	120,6	101,2	73,4
	0,8	132,5	107,2	72,1		0,8	139,1	116,9	85,2
15/Set	0,5 ²	101,6	80,8	51,4	15/Jan	0,5	74,2	56,7	36,2
	0,6	134,6	102,8	65,5		0,6	60,8	54,8	44,8
	0,7	126,4	101,1	66,5		0,7	87,9	72,4	50,6
	0,8	134,5	109,0	73,6		0,8	105,5	85,5	57,8
01/Out	0,5	96,9	86,1	68,0	01/Fev	0,5	52,2	40,4	26,4
	0,6	100,6	84,9	62,4		0,6	48,5	40,2	28,4
	0,7	101,9	86,6	64,5		0,7	80,2	64,8	43,4
	0,8 ²	141,5	132,4	70,0		0,8	90,8	74,6	51,9
15/Out	0,5 ²	121,6	83,1	51,8	15/Fev	0,5 ²	50,5	20,7	19,9
	0,6 ²	120,3	103,4	49,0		0,6 ²	40,7	40,6	28,6
	0,7	108,1	90,8	65,9		0,7 ²	45,5	44,9	37,3
	0,8	136,6	112,2	77,9		0,8	75,3	60,9	40,9

1-Fração da CAD mantida pela irrigação. 2-Valores determinados pela distribuição empírica.

APÊNDICE I – Funções de distribuição de probabilidades (fdp), exponencial (Exp), Gamma, log-normal (Lnorm), normal (Norm) e Weibull (Weib), selecionadas para determinar o número de irrigações por ano, para os grupamentos de solos, Oásis e São Gabriel; Santa Maria, para os diferentes manejos (M) de irrigação e para as épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.

M ¹	ES	fdp	Escalar	Forma	M ¹	ES	fdp	Escalar	Forma
Oásis e São Gabriel					Santa Maria				
0,7	01/09	Gamma	0,6317	3,4193	0,8	15/08	Norm	2,7059	1,4476
0,8		Gamma	1,2762	2,6586	0,8	01/09	Gamma	1,0471	2,7589
0,7	15/09	Weib	2,6580	1,8696	0,7	15/09	Gamma	0,6579	3,5766
0,8		Gamma	1,4425	2,7506	0,8		Gamma	1,3339	2,5217
0,6	01/10	Gamma	0,4759	3,9691	0,7	01/10	Gamma	0,8108	2,7749
0,7		Gamma	0,9156	2,9595	0,8		Gamma	1,6290	2,1486
0,8		Gamma	1,8544	2,4838	0,7	15/10	Gamma	1,2659	2,0430
0,7	15/10	Gamma	1,4056	2,2562	0,8		Weib	4,3489	1,2806
0,8		Gamma	2,2132	2,3721	0,6	Gamma	0,7792	2,7721	
0,5	01/11	Lnorm	0,3877	0,5282	0,7	01/11	Gamma	1,4340	2,1401
0,6		Lnorm	0,6009	0,6369	0,8		Lnorm	1,1523	0,7991
0,7		Gamma	1,5525	2,3618	0,6	Gamma	0,7405	3,3761	
0,8		Gamma	2,1424	2,8384	0,7	15/11	Gamma	1,5201	2,1284
0,7	15/11	Gamma	1,5490	2,5649	0,8		Gamma	2,5587	2,0844
0,8		Gamma	2,3419	2,9314	0,7	15/01	Gamma	0,8665	3,2000
0,6	15/01	Exp	2,0455		0,8		Gamma	1,8086	2,6494
0,8		Gamma	2,4446	1,8664	0,7	01/02	Gamma	0,5018	4,0762
0,8	01/02	Gamma	1,6436	2,3749					
0,7	15/02	Gamma	0,6067	3,3552					
0,8		Gamma	1,3511	2,3990					

1-Fração da CAD mantida pela irrigação.

APÊNDICE J – Funções de distribuição de probabilidades (fdp), Gamma, Weibull (Weib) e log-normal (Lnorm) selecionadas para determinar o número de irrigações por ano, para os solos Vacacaí, Alto das Canas e Cambai, para os diferentes manejos (M) de irrigação e para as épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano do período entre 1968 e 2006.

M ¹	ES	Fdp	Escalar	Forma	M ¹	ES	Fdp	Escalar	Forma
Vacacaí					Alto das Canas e Cambai				
0,8	01/09	Gamma	1,2838	2,4147	0,7	15/08	Weib	2,6557	1,7831
0,8	15/09	Gamma	1,6909	2,0699	0,6	01/09	Gamma	0,4869	3,8512
0,7	01/10	Gamma	1,0076	2,4613	0,8		Gamma	1,6569	2,9136
0,8		Gamma	2,2441	1,9367	0,6	15/09	Gamma	0,6781	3,1765
0,7	15/10	Gamma	1,7371	2,0888	0,7		Gamma	1,2554	2,4669
0,8		Weibull	4,8897	1,2503	0,8		Gamma	2,0933	2,5273
0,8	01/11	Weibull	5,8432	1,3304	0,5	01/10	Gamma	0,4893	3,6784
0,7	15/11	Gamma	2,2817	2,1440	0,7		Gamma	1,3812	2,7829
0,6		Gamma	0,5842	3,8517	0,8		Gamma	2,7892	2,3250
0,7	15/01	Gamma	1,6080	2,2877	0,5	15/10	Gamma	0,5783	3,4582
0,8		Gamma	2,9949	1,6580	0,7		Gamma	1,9468	2,1519
0,8	01/02	Gamma	1,8699	2,2129	0,8		Gamma	3,1652	2,2457
0,7	15/02	Gamma	0,8738	2,5273	0,6	01/11	Gamma	1,1278	2,6602
0,8		Gamma	1,9080	1,9093	0,7		Gamma	1,6687	2,8799
					0,8		Gamma	3,1710	2,5063
					0,5	15/11	Gamma	0,7854	3,5012
					0,6		Gamma	1,3128	2,7507
					0,7		Gamma	1,5824	3,5185
					0,8		Norm	8,8718	4,9267
					0,5	15/01	Gamma	0,4975	4,0203
					0,7		Lnorm	1,0858	0,7284
					0,8		Gamma	3,0642	1,9394
					0,8	01/02	Gamma	2,0663	2,3771
					0,6	15/02	Lnorm	0,4457	0,4817

1-Fração da CAD mantida pela irrigação.

APÊNDICE K – Estimativa do número de irrigações por ano necessárias à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos, Alto das Canas e Cambaí, em cada manejo (M) de irrigação e época de semeadura (ES), simuladas em cada ano agrícola do período entre 1968 e 2006.

ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)			ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)		
		95%	90%	75%			95%	90%	75%
15/Ago	0,5 ²	2	2	1	01/Nov	0,5 ²	6	4	3
	0,6 ²	4	3	3		0,6	7	5	4
	0,7	5	4	3		0,7	10	9	6
	0,8 ²	8	8	6		0,8	18	15	11
01/Set	0,5 ²	3	2	2	15/Nov	0,5	6	5	4
	0,6	4	3	2		0,6	8	7	5
	0,7 ²	7	5	4		0,7	11	10	7
	0,8	10	9	6		0,8	17	15	12
15/Set	0,5 ²	3	3	2	15/Jan	0,5	4	3	3
	0,6	4	4	3		0,6 ²	6	6	4
	0,7	7	6	4		0,7	10	8	5
	0,8	12	10	7		0,8	14	12	8
01/Out	0,5	4	3	2	01/Fev	0,5 ²	3	2	2
	0,6 ²	6	4	4		0,6 ²	4	4	3
	0,7	8	7	5		0,7 ²	6	6	4
	0,8	15	12	9		0,8	11	9	7
15/Out	0,5	4	3	3	15/Fev	0,5 ²	3	3	2
	0,6 ²	7	6	4		0,6	3	3	2
	0,7	10	8	6		0,7 ²	6	6	3
	0,8	16	13	9		0,8	10	8	6

1-Fração da CAD mantida pela irrigação. 2-Valores determinados pela distribuição empírica.

APÊNDICE L – Estimativa do número de irrigações por ano necessárias à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para os solos Oásis e São Gabriel, em cada manejo (M) de irrigação e época de semeadura (ES), simuladas em cada ano agrícola do período entre 1968 e 2006.

ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)			ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)		
		95%	90%	75%			95%	90%	75%
15/Ago	0,5 ²	2	2	1	01/Nov	0,5	4	3	2
	0,6 ²	3	2	2		0,6	5	4	3
	0,7 ²	4	4	3		0,7	8	7	5
	0,8 ²	7	6	4		0,8	13	11	8
01/Set	0,5 ²	2	2	1	15/Nov	0,5 ²	4	4	3
	0,6 ²	3	3	2		0,6 ²	5	5	4
	0,7	4	4	3		0,7	9	7	5
	0,8	7	6	4		0,8	15	12	9
15/Set	0,5 ²	2	2	1	15/Jan	0,5 ²	3	2	2
	0,6 ²	3	2	2		0,6	6	5	3
	0,7	5	4	3		0,7 ²	7	6	4
	0,8	9	7	5		0,8	11	9	6
01/Out	0,5 ²	3	2	1	01/Fev	0,5 ²	2	2	1
	0,6	4	3	2		0,6 ²	3	3	2
	0,7	6	5	4		0,7 ²	5	4	4
	0,8	10	9	6		0,8	9	7	5
15/Out	0,5 ²	3	3	2	15/Fev	0,5 ²	2	2	1
	0,6 ²	5	5	3		0,6 ²	3	3	2
	0,7	7	6	4		0,7	4	4	3
	0,8	12	10	7		0,8	7	6	4

1-Fração da CAD mantida pela irrigação. 2-Valores determinados pela distribuição empírica.

APÊNDICE M – Estimativa do número de irrigações por ano necessárias à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para o solo Santa Maria, em cada manejo (M) de irrigação e época de semeadura (ES), simuladas em cada ano agrícola do período entre 1968 e 2006.

ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)			ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)		
		95%	90%	75%			95%	90%	75%
15/Ago	0,5 ²	2	2	1	01/Nov	0,5 ²	3	3	2
	0,6 ²	2	2	1		0,6	5	4	3
	0,7 ²	4	2	2		0,7	7	6	4
	0,8	5	5	4		0,8	12	9	5
01/Set	0,5 ²	2	2	2	15/Nov	0,5 ²	3	3	2
	0,6 ²	3	3	2		0,6	5	4	3
	0,7 ²	4	4	2		0,7	8	6	4
	0,8	6	5	4		0,8	12	10	7
15/Set	0,5 ²	2	2	2	15/Jan	0,5 ²	3	3	2
	0,6 ²	3	3	2		0,6 ²	4	4	3
	0,7	5	4	3		0,7	6	5	4
	0,8	7	6	4		0,8	10	9	6
01/Out	0,5 ²	3	2	1	01/Fev	0,5 ²	3	2	2
	0,6 ²	4	3	2		0,6 ²	3	3	2
	0,7	5	4	3		0,7	4	3	3
	0,8	8	7	5		0,8 ²	7	6	5
15/Out	0,5 ²	4	2	2	15/Fev	0,5 ²	2	2	2
	0,6 ²	4	4	2		0,6 ²	3	3	2
	0,7	6	5	3		0,7 ²	4	3	3
	0,8	10	8	6		0,8 ²	7	6	4

1-Fração da CAD mantida pela irrigação. 2-Valores determinados pela distribuição empírica.

APÊNDICE N – Estimativa do número de irrigações por ano necessárias à cultura do feijão, com diferentes probabilidades de ocorrência, para o solo Vacacaí, em cada manejo (M) de irrigação e épocas de semeadura (ES), simuladas em cada ano agrícola do período entre 1968 e 2006.

ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)			ES	M ¹	Probabilidade de ocorrência (%)		
		95%	90%	75%			95%	90%	75%
15/Ago	0,5 ²	1	1	1	01/Nov	0,5 ²	4	3	3
	0,6 ²	2	1	1		0,6 ²	5	5	3
	0,7 ²	3	3	2		0,7 ²	11	9	5
	0,8 ²	5	5	3		0,8	13	11	7
01/Set	0,5 ²	1	1	1	15/Nov	0,5 ²	4	3	3
	0,6 ²	2	2	2		0,6 ²	6	6	4
	0,7 ²	4	3	2		0,7	11	9	7
	0,8	7	6	4		0,8 ²	14	14	9
15/Set	0,5 ²	2	2	1	15/Jan	0,5 ²	4	4	2
	0,6 ²	4	3	2		0,6	4	4	3
	0,7 ²	5	4	3		0,7	8	7	5
	0,8	8	7	5		0,8	13	10	7
01/Out	0,5 ²	3	2	2	01/Fev	0,5 ²	3	2	2
	0,6 ²	4	4	2		0,6 ²	3	3	2
	0,7	6	5	3		0,7 ²	6	5	3
	0,8	10	9	6		0,8	10	8	6
15/Out	0,5 ²	4	3	2	15/Fev	0,5 ²	2	2	2
	0,6 ²	4	4	3		0,6 ²	4	3	2
	0,7	8	7	5		0,7	5	4	3
	0,8	12	10	6		0,8	9	7	5

1-Fração da CAD mantida pela irrigação. 2-Valores determinados pela distribuição empírica.

ANEXOS

ANEXO A – Breve descrição das principais características dos solos estudados, conforme Cardoso (2005).

Alissolos:

Os Alissolos, comuns na região da Depressão Central, são medianamente profundos a profundos, originados principalmente de siltitos e arenitos, de textura média. Ocorrem em relevo suavemente ondulado ocupando coxilhas em cotas intermediárias entre Argissolos Vermelhos em cotas mais altas e Planossolos nas várzeas.

São solos com acidez elevada na maior parte do perfil, estabelecendo uma condição de baixa fertilidade química e elevada toxidez por alumínio para as plantas que possuem sistema radicular profundo, o que condiciona a concentração das raízes no horizonte A. A profundidade do sistema radicular da vegetação nativa nos diferentes solos depende também da altura do lençol freático e sua flutuação em função das condições de disponibilidade hídrica e profundidades físicas do solo e do material mineral da rocha matriz.

Já as limitações físicas relacionam-se com a drenagem imperfeita e susceptibilidade à erosão. Problemas com a drenagem resultam em encharcamento do solo em períodos de chuva prolongados, sendo este outro fator que limita o aprofundamento e manutenção do sistema radicular além do horizonte A.

Classe: Alissolo Hipocrômico argilúvico típico (APt 2)

Unidade de mapeamento: Santa Maria.

Antiga classificação: Brunizem Hidromórfico textura média.

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 espessarênico), ou só mudança abrupta (abruptico). 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 700m, ocupando a maior área territorial do RGS.

Classe: Argissolo vermelho-amarelo alumínico alissólico (PVAa 1).

Unidade de mapeamento: Oásis.

Antiga classificação: Laterítico Bruno Avermelhado distrófico húmico textura argilosa.

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 típico (PVAa 3).

Unidade de mapeamento: Júlio de Castilhos.

Antiga classificação: Podzólico Vermelho Amarelo álico textura argilosa.

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 – PVd 2

Unidade de mapeamento: São Pedro.

Antiga classificação: Podzólico Vermelho Amarelo textura média.

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 100cm, 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.

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 133cm 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 (30-60cm), 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 (MTf).

Unidade de mapeamento: Ciríaco.

Antiga classificação: Brunizem avermelhado raso textura argilosa.

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).

Classe: Chernossolo Argilúvico órtico saprolítico (MTo1).

Unidade de mapeamento: Venda Grande.

Antiga classificação: Brunizem raso.

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 75cm de profundidade (BRASIL, 1973).

Classe: Chernossolo Háplico órtico típico (MXo1).

Unidade de mapeamento: Vila.

Antiga classificação: Brunizen Avermelhado textura argilosa.

A vegetação natural se apresenta como mata em galerias já totalmente modificadas pelo uso agrícola intenso. As raízes, segundo Brasil (1973) são classificadas como “abundantes” no horizonte A até 30 cm, “poucas” de 30 a 60cm no horizonte AB e “escassas” no horizonte B de 60 até 99 cm de profundidade.

Latossolo

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

Classe: Latossolo Vermelho Distrófico Argissólico (LVd1).

Unidade de mapeamento: Cerrito.

Antiga classificação: Laterítico Bruno Avermelhado Distrófico textura argilosa.

As raízes apresentam-se “abundantes” no horizonte A até 35 cm e de 35 a 60cm no horizonte AB e são “comuns” de 60 a 94cm 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: Luvissole Crômico órtico típico (TCo).

Unidade de mapeamento: Cambai.

Antiga classificação: Brunizem Avermelhado raso textura argilosa.

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 40cm, “poucas” de 40 a 67cm no horizonte B e “raras” na profundidade de 67 a 85cm no horizonte BC.

Classe: Luvissole Hipocrômico órtico típico (TPo2).

Unidade de mapeamento: Piraí.

Antiga classificação: Brunizem Hidromórfico textura argilosa.

Sob condições naturais predomina a vegetação de gramíneas. As raízes apresentam-se “abundantes” no horizonte A até 45 cm, de 45 a 65cm no horizonte B são “comuns” e de 65 a 80cm no horizonte C aparecem como “raras”.

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 Chernozênico (RLe1).

Unidade de mapeamento: Charrua.

Antiga classificação: Litólico Eutrófico textura média.

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 Distrófico típico (RLd3)

Unidade de mapeamento: Guassupi

Antiga classificação: Litólico Distrófico textura média

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 a suave ondulado. São adequados para o cultivo de arroz irrigado, milho, soja e pastagens.

Classe: Planossolo Hidromórfico Eutrófico Arênico (SGe1).

Unidade de mapeamento: Vacacaí.

Antiga classificação: Planosol textura média.

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 (SXe1).

Unidade de mapeamento: São Gabriel.

Antiga classificação: Planosol textura argilosa.

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 55cm no horizonte BC e ainda como “poucas” na profundidade de 55 a 68cm no horizonte C.