

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

**FUNÇÕES DE PRODUÇÃO DAS CULTURAS DE  
MILHO E FEIJÃO ATRAVÉS DE ESTUDO  
EXPERIMENTAL E SIMULADO**

**TESE DE DOUTORADO**

**Ana Rita Costenaro Parizi**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2010**

**FUNÇÕES DE PRODUÇÃO DAS CULTURAS DE MILHO E  
FEIJÃO ATRAVÉS DE ESTUDO EXPERIMENTAL E  
SIMULADO**

**por**

**Ana Rita Costenaro Parizi**

Tese de Doutorado 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 obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola.**

**Orientador: Prof. Adroaldo Dias Robaina**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2010**

P234f

Parizi, Ana Rita Costenaro, 1983-

Funções de produção das culturas de milho e feijão através de estudo experimental e simulado / Ana Rita Costenaro Parizi. - 2010.

205 f. ; il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2010.

“Orientador: Prof. Adroaldo Dias Robaina”

1. Engenharia agrícola 2. *Zea mays*, L. 3. *Phaseolus Vulgaris* 4. Modelo de produção 5. Estratégias de irrigação 6. Simulação I. Robaina, Adroaldo Dias II. Título

CDU: 633.15/.35

Ficha catalográfica elaborada por  
Patrícia da Rosa Corrêa – CRB 10/1652  
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

---

© 2010

Todos os direitos autorais reservados a Ana Rita Costenaro Parizi. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser com autorização por escrito do autor.  
End. Eletr: [anaparizi@gmail.com](mailto:anaparizi@gmail.com)

---

**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

**FUNÇÕES DE PRODUÇÃO DAS CULTURAS DE MILHO E FEIJÃO  
ATRAVÉS DE ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULADO**

elaborada por  
**Ana Rita Costenaro Parizi**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Adroaldo Dias Robaina, Dr. (UFSM)  
Presidente/Orientador**

**Marcia Xavier Peiter  
Dra. (UFSM)**

**Marcelo Calgato  
Dr. (Embrapa)**

**Liane de Souza Weber)  
Dra. (UFSM)**

**Paulo Roberto Costa  
Dr. (CTISM - UFSM)**

Santa Maria, 28 de janeiro de 2010.

## **Ofereço**

### **Aos Meus Pais**

Que são meu “suporte” em todos os momentos de minha vida, minhas fontes de  
inspiração diária...  
Obrigada pelas oportunidades que me ofereceram, pela confiança em mim depositada ao  
longo de minha vida e principalmente pelas constantes lições de vida e exemplo de  
companheirismo, perseverança e otimismo que me movem na luta constante pela  
realização dos meus sonhos.  
Obrigada por me tornarem quem eu sou hoje!  
AMO vocês!

## **Dedico**

### **Ao meu marido Clândio**

Que como “uma coluna no templo” soube me esperar...  
Pelas tantas vezes que não pude estar ao seu lado;  
Pelas tantas vezes que me esperou chegar e pelas tantas vezes que entendeu minha  
partida...  
Pela confiança e incentivo durante mais uma etapa de minha formação.  
Obrigada por todo o apoio para que este sonho se tornasse real!  
Te AMO!

## **Minha Homenagem**

### **Às minhas irmãs Flávia e Márcia**

Pela presença constante e pelo amor incondicionável que nos torna tão unidas.  
AMO vocês!

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pelo dom da vida, que é amparo, ilumina, encoraja e mostra a direção a ser seguida, infinito em SEU AMOR.

À Universidade Federal de Santa Maria, mais especificamente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), pela oportunidade oferecida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Ao Prof. Adroaldo Dias Robaina pela oportunidade e orientação oferecidos durante cinco anos, que transformaram este período em uma grande amizade. Fica aqui o meu agradecimento por todos os ensinamentos que levarei comigo por toda a minha vida. Obrigada pela paciência, dedicação, incentivo, enfim, obrigada por fazer parte do meu crescimento profissional e pessoal. MEU RESPEITO E ADMIRAÇÃO!

A Prof<sup>a</sup> Marcia Xavier Peiter, uma das grandes responsáveis pela minha trajetória. Agradeço: pela confiança em mim depositada durante dez anos de convívio; pela oportunidade quando fui convidada a fazer parte do seu grupo ainda na graduação; por me ensinar o caminho a ser seguido; pelas lições que muitas vezes me deixavam receosa, mas que sempre superaram com um grande aprendizado. Enfim, obrigada por “abrir as portas” para que hoje eu chegasse à conclusão desta tão importante etapa de minha formação. Fica aqui, o CARINHO, o RESPEITO e ADMIRAÇÃO pela sua competência e exemplo a ser seguido.

À prof<sup>a</sup> Ayda Bochi Brum, pelo que representa para mim.

Aos membros da Comissão Examinadora, que com muita competência, dedicação e carinho auxiliaram na qualidade deste trabalho.

Aos funcionários do PPGEA, em especial ao Luiz e ao Estevão e aos funcionários do Centro de Ciências Rurais (CCR), em especial ao Ercelino, José e Vilceu, pela cordialidade e disposição.

Ao Sandro Madeira Cardinal e a sua mãe Tânia de Bem Madeira, pela oportunidade de trabalhar em sua área e auxílio durante a realização do trabalho experimental.

À Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - URI Campus de Santiago, em especial ao Prof. Olívio Bochi Brum pela disponibilidade do laboratório durante a realização do trabalho experimental.

À minha grande amiga Fátima Cibele Soares, pela presença constante, tornando-se uma “irmã de coração” pelo convívio diário durante a semana em Santa Maria, o que nos tornou uma família. Juntas lutamos, choramos e nos fortificamos para vencer as dificuldades que nos eram impostas. Obrigada pelos conselhos, incentivo, amizade e contribuição neste trabalho. Você é muito ESPECIAL em minha vida.

À minha querida amiga e colega Ana Carla dos Santos Gomes que muito me incentivou em fazer o Doutorado. Obrigada pelos conselhos, presença em todos os momentos e amizade.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Engenharia de Irrigação, em especial, a Gisele Vivan, Ricardo Schons, Adriana Gindri Salbego e Marcela Vilar Sampaio pela colaboração e amizade.

À toda minha família (tios (as), primos (as), cunhados (as)) e em especial: à minha avó Dileta, as amadas Evanir e Bete, à minha sogra Olga e às minhas cunhadas Cleide e Aline pela força, incentivo e pelo que representam para mim.

Aos meus verdadeiros amigos, que souberam entender minha ausência em muitos momentos importantes, me dando força para continuar sempre e hoje permanecem no meu “círculo” de amigos.

Enfim, agradeço à todos aqueles que me acompanharam durante estes anos e que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigada!

"COMPREENDI que viver é ser livre...  
Que ter amigos é necessário...  
Que lutar é manter-se vivo...  
Que pra ser feliz basta querer...  
APRENDI que o tempo cura...  
Que mágoa passa...  
Que decepção não mata...  
Que hoje é reflexo de ontem...  
COMPREENDI que podemos chorar sem derramar lágrimas...  
Que os verdadeiros amigos permanecem...  
Que a dor fortalece...  
Que vencer engrandece...  
APRENDI que sonhar não é fantasiar...  
Que pra sorrir tem que fazer alguém sorrir...  
Que a beleza não está no que vemos, e sim no que sentimos...  
Que o valor está na força da conquista...  
COMPREENDI que as palavras tem força...  
Que fazer é melhor que falar...  
Que o olhar não mente...  
Que viver é aprender com os erros...  
APRENDI que tudo depende da vontade...  
Que o melhor é ser nós mesmos...  
E que o SEGREDO da vida é VIVER !!!"

*(autor desconhecido)*

## RESUMO

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

### **FUNÇÕES DE PRODUÇÃO DAS CULTURAS DE MILHO E FEIJÃO ATRAVÉS DE ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULADO**

Autora: Ana Rita Costenaro Parizi  
Orientador: Adroaldo Dias Robaina  
Santa Maria, 28 de janeiro de 2010.

O desenvolvimento de modelos matemáticos pode disponibilizar uma ferramenta para estimar e entender o comportamento do sistema em face de diferentes situações, auxiliando no processo de tomada de decisão através de uma representação simplificada da realidade, permitindo simular vários cenários e estimar a repercussão de diferentes cursos de ação sobre os sistemas produtivos, auxiliando no planejamento da atividade. No caso da utilização de modelos de simulação da produção das culturas, sob diferentes estratégias de irrigação, o procedimento permite obter todas as informações possíveis, que em experimentos de campo demandariam tempo e recursos necessários para a pesquisa. Desta forma, o presente trabalho propõe uma simulação da produção das culturas de milho e feijão, levando em consideração as características de um experimento de campo e as características climáticas do ano agrícola em que o experimento foi conduzido, com o objetivo de calibrar, testar e aplicar um modelo de simulação para o ciclo das culturas do milho e do feijão na região de Santiago, RS. Como resultados experimentais, obteve-se variações no crescimento, desenvolvimento e produção das culturas de milho e feijão com a aplicação de diferentes estratégias de irrigação. O aumento nas lâminas de irrigação aumentou a produção de grãos e matéria seca das culturas em estudo. O modelo de produção aplicado foi capaz de simular adequadamente a produção de grãos e a produção de matéria seca para ambas culturas. As diferentes estratégias de irrigação simuladas pelo modelo, influenciaram nos componentes do balanço hídrico e na produtividade final das culturas em estudo. Lâminas de água de 800 mm e 500 mm acarretaram redução na produção de milho e feijão, respectivamente. A eficiência de aplicação de água a partir de 550 mm e 500 mm para o milho e o feijão, respectivamente, foi reduzida. O modelo proposto pode ser utilizado como ferramenta para o planejamento regional na implantação da cultura de milho e feijão em condições de irrigação e possibilita a identificação de estratégias de irrigação que resultem em elevadas produções de grãos, podendo ser considerado uma excelente ferramenta para previsão de rendimento das culturas em condições de irrigação. Desta forma foi possível oferecer a região em estudo dados de produtividade com a utilização da irrigação e em especial com a utilização de simulação, trazendo maior segurança para produtores e técnicos da região em futuras instalações de sistemas irrigados.

**Palavras-Chave:** *Zea mays*, L.; *Phaseolus Vulgaris*; modelo de produção; estratégias de irrigação; simulação

## ABSTRACT

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

### **FUNCTIONS OF PRODUCTION MAIZE AND BEANS CROPS, THROUGH AN EXPERIMENTAL AND SIMULATED STUDY**

Author: Ana Rita Costenaro Parizi  
Advisor: Adroaldo Dias Robaina  
Santa Maria, January 28<sup>th</sup>

The development of math models can available a tool to estimate and understand the behavior of the system in face of diferent situations, helping in the decision-making process, through a simplified representation of reality, allowing to simulate several scenes and to estimate the different action courses impact about the production systems, helping in the activity planning. In the case of use simulation models of crops production, about different irrigation strategies, the procedure allows to get all the possible informations, that in field experiments would require time and necessary features to the research. So, this work proposes a simulation of maize and beans crops production, considering a field experiment characteristics and the agricultural year climate characteristics, in which the experiment was managed, with the goal to calibrate, test and apply a simulation model to the cycle of maize and beans crops in the region of Santiago, RS. As experimental results, it was obtained variations in maize and beans crops growth, development, and production, with the apply of different irrigation strategies. The irrigation blades growth increased the grain and dry matter production of the studied crops. The production model applied could simulate properly the grain and dry matter production for both crops. The different strategies of irrigation simulated by the model, influenced the water balance components and in the final productivity of studied crops. Water blades of 800 mm e 500 mm resulted in maize and beans production decrease, respectively. The efficiency of water application from 550 mm and 500 mm to the maize and the beans have been decreased, respectively. The proposed model can be used as a tool for regional planning in the deployment of maize and beans crops in irrigated conditions and allows the identification of irrigation strategies that result in higher grain production, and could be considered an excellent tool for predicting crops yields in irrigated conditions. Thus, it was possible to offer to the studied region, yield data with the irrigation use and, especially, with the simulation use, providing greater security for producers and technicians of the region, in future installations of irrigated systems.

**Keywords:** *Zea mays*, L.; *Phaseolus Vulgaris*, production models, irrigation strategies, simulation.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.0 – Área plantada com a cultura de milho para o Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2009) – Período 2004/2007.....	34
FIGURA 2.1 – Produção de milho para o Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2009) - Período 2004/2007.....	35
FIGURA 2.2 – Área plantada com a cultura de feijão para o Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2009) - Período 2004/2007.....	40
FIGURA 2.3 – Produção de feijão para o Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2009) - Período 2004/2007.....	40
FIGURA 2.4 – Representação esquemática dos componentes do balanço de água no solo (adaptado de ROBAINA,1992).....	55
FIGURA 2.5 – Croqui da área experimental.....	79
FIGURA 2.6 – Fluxograma simplificado do modelo de extração de água (adaptado de ROBAINA, 1992).....	90
FIGURA 2.7 – Fluxograma simplificado do modelo de produção de planta (adaptado de ROBAINA, 1992).....	95
FIGURA 2.8 – Curva de retenção dos valores dos valores médios de umidade do solo para cinco camadas de solo.....	98

FIGURA 2.9 – Variação diária dos elementos agrometeorológicos durante o ciclo das culturas.....	100
FIGURA 2.10 – Correlação entre dias após a emergência (DAE) e os graus dia acumulados ( $^{\circ}\text{C}$ ) para as culturas do milho e do feijão.....	102
FIGURA 2.11 – Índice de área foliar ( $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$ ) médio para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no período para a cultura do milho.....	104
FIGURA 2.12 – Índice de área foliar ( $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$ ) médio para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no período para a cultura do feijão.....	106
FIGURA 2.13 – Matéria seca total ( $\text{kg}.\text{ha}^{-1}$ ) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no período para a cultura do milho.....	108
FIGURA 2.14 – Matéria seca total ( $\text{kg}.\text{ha}^{-1}$ ) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no período para a cultura do feijão.....	110
FIGURA 2.15 – Profundidade do sistema radicular (cm) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no período para a cultura do milho.....	113
FIGURA 2.16 – Profundidade do sistema radicular (cm) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no período para a cultura do feijão.....	115
FIGURA 2.17 – Relação entre a produção de grãos e a produção de matéria seca na cultura do milho.....	119

FIGURA 2.18 – Relação entre a produção de grãos e a produção de matéria seca na cultura do feijão.....	121
FIGURA 2.19 – Valores de índice de área foliar ( $m^2.m^{-2}$ ) medidos no experimento de campo em relação aos valores de índice de área foliar ( $m^2.m^{-2}$ ) simulados para a cultura do milho.....	122
FIGURA 2.20 – Valores de índice de área foliar ( $m^2.m^{-2}$ ) medidos no experimento de campo em relação aos valores de índice de área foliar ( $m^2.m^{-2}$ ) simulados para a cultura do feijão.....	124
FIGURA 2.21 – Valores de matéria seca total ( $kg.ha^{-1}$ ) medidos no experimento de campo em relação aos valores de matéria seca total ( $kg.ha^{-1}$ ) simulados para a cultura do milho.....	126
FIGURA 2.22 – Valores de matéria seca total ( $kg.ha^{-1}$ ) medidos no experimento de campo em relação aos valores de matéria seca total ( $kg.ha^{-1}$ ) simulados para a cultura do feijão.....	128
FIGURA 2.23 – Valores de profundidade do sistema radicular (cm) medidos no experimento de campo em relação aos valores de profundidade do sistema radicular (cm) simulados para a cultura do milho..	130
FIGURA 2.24 – Valores de profundidade do sistema radicular (cm) medidos no experimento de campo em relação aos valores de profundidade do sistema radicular (cm) simulados para a cultura do feijão..	132
FIGURA 2.25 – Programa computacional utilizado para as culturas do milho e do feijão.....	133
FIGURA 2.26 – Valores da radiação solar fotossinteticamente ativa $F = 29^{\circ} 09' 32'' S$ .....	135

FIGURA 2.27 – Valores da produção potencial diária $P_c$ ao longo do ano para a localidade $F = 29^\circ 09' 32'' S$ .....	136
FIGURA 2.28 – Valores da produção potencial diária $P_o$ ao longo do ano para a localidade $F = 29^\circ 09' 32'' S$ .....	137
FIGURA 2.29 – Valores de produção de matéria seca total ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) obtida em experimento de campo e valores de matéria seca total ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) estimados pelo modelo de produção para a cultura do milho.....	140
FIGURA 2.30 – Valores de produção de grãos ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) obtida em experimento de campo e valores de produção de grãos ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) estimados pelo modelo de produção para a cultura do milho.....	141
FIGURA 2.31 – Valores de produção de matéria seca total ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) obtida em experimento de campo e valores de matéria seca total ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) estimados pelo modelo de produção para a cultura do feijão.....	143
FIGURA 2.32 – Valores de produção de grãos ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) obtida em experimento de campo e valores de produção de grãos ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) estimados pelo modelo de produção para a cultura do feijão.....	143
FIGURA 2.33 – Relação dos valores de matéria seca total ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) obtidos pelo modelo de simulação e matéria seca total ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) obtidos no experimento – valores diários durante o ciclo da cultura do milho.....	146
FIGURA 2.34 – Relação dos valores de matéria seca total ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) obtidos pelo modelo de simulação e matéria seca total ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) obtidos no experimento – valores diários durante o ciclo da cultura do feijão.....	148
FIGURA 2.35 – Distribuição dos componentes do balanço hídrico (mm) simulados em cada estratégia de irrigação (EI) para a cultura do milho.....	151

FIGURA 2.36 – Armazenamento de água em cada estratégia de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas para a cultura do milho.....	152
FIGURA 2.37 – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) da cultura do milho.....	154
FIGURA 2.38 – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de matéria seca ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) da cultura do milho.....	155
FIGURA 2.39 – Evapotranspiração real (mm) para diferentes estratégias de irrigação (EI) e fração de chuva (%) para a cultura do milho.....	156
FIGURA 2.40 – Relação entre a eficiência de uso da água ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) obtida para produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e para produção de matéria seca ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) nas diferentes estratégias de irrigação na cultura do milho.....	158
FIGURA 2.41 – Relação entre a eficiência de aplicação de água ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) obtida para produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e para produção de matéria seca ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) nas diferentes estratégias de irrigação na cultura do milho.....	159
FIGURA 2.42 – Distribuição dos componentes do balanço hídrico (mm) simulados em cada estratégia de irrigação para a cultura do feijão.....	161
FIGURA 2.43 – Armazenamento de água em cada estratégia de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas para a cultura do feijão.....	162
FIGURA 2.44 – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de grãos da cultura do feijão.....	164

FIGURA 2.45 – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de matéria seca da cultura do feijão..	165
FIGURA 2.46 – Evapotranspiração real (mm) para diferentes estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) para a cultura do feijão.....	166
FIGURA 2.47 – Relação entre a eficiência de uso da água ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) obtida para produção de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) e para produção de matéria seca ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) nas diferentes estratégias de irrigação na cultura do feijão.....	168
FIGURA 2.48 – Relação entre a eficiência de aplicação de água ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) obtida para produção de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) e para produção de matéria seca ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) nas diferentes estratégias de irrigação na cultura do feijão.....	169
FIGURA 2.49 – Relação entre a produção de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) simuladas pelo modelo para diferentes estratégias de irrigação (EI) e o total de água aplicado (mm) para a cultura do milho.....	170
FIGURA 2.50 – Relação entre a variação da produção de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) e o total de água aplicada (mm) para a cultura do milho.....	171
FIGURA 2.51 – Relação entre a produção de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) simuladas pelo modelo para diferentes estratégias de irrigação e o total de água aplicado para a cultura do feijão.....	172
FIGURA 2.52 – Relação entre a variação da produção de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) e o total de água aplicada (mm) para a cultura do feijão.....	173

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.0 – Percentagens de irrigação em cada tratamento.....	80
TABELA 2.1 – Características físicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta – Valores médios para três repetições.....	97
TABELA 2.2 – Características físicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta – Valores médios para três repetições.....	98
TABELA 2.3 – Características químicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta – Valores médios para três repetições.....	99
TABELA 2.4 – Valores de irrigação total (mm), precipitação pluvial (mm) e total de água aplicado (irrigação e precipitação) (mm) ao longo do ciclo da cultura do milho para seis tratamentos.....	101
TABELA 2.5 – Valores de irrigação total (mm), precipitação pluvial (mm) e total de água aplicado (irrigação e precipitação) (mm) ao longo do ciclo da cultura do feijão para seis tratamentos.....	101
TABELA 2.6 – Valores dos coeficientes $a$ , $b$ e coeficiente de determinação $r^2$ da relação entre os dias após a emergência (DAE) e os graus dia acumulados ( $^{\circ}\text{C}$ ), referentes as culturas em estudo.....	102

TABELA 2.7 – Coeficientes <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i> , <i>d</i> e coeficiente de determinação $r^2$ para a variável índice de área foliar (IAF) em cada tratamento da cultura do milho.....	103
TABELA 2.8 – Coeficientes <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i> , <i>d</i> e coeficiente de determinação $r^2$ para a variável índice de área foliar (IAF) em cada tratamento da cultura do feijão.....	105
TABELA 2.9 – Coeficientes <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i> , <i>d</i> e coeficiente de determinação $r^2$ para a variável matéria seca total (MST) em cada tratamento da cultura do milho	107
TABELA 2.10 – Coeficientes <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i> , <i>d</i> e coeficiente de determinação $r^2$ para a variável matéria seca total (MST) em cada tratamento da cultura do feijão.....	109
TABELA 2.11 – Coeficientes <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i> , <i>d</i> e coeficiente de determinação $r^2$ para a variável profundidade do sistema radicular (Prz) em cada tratamento da cultura do milho.....	111
TABELA 2.12 – Coeficientes <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i> , <i>d</i> e coeficiente de determinação $r^2$ para a variável profundidade do sistema radicular (Prz) em cada tratamento da cultura do feijão.....	114
TABELA 2.13 – Valores médios dos componentes de produção, matéria seca total e índice de colheita (IC) para a cultura do milho aos 137 DAE.....	116
TABELA 2.14 – Produção de matéria seca total ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) em cada estratégia de irrigação para a cultura do milho.....	117
TABELA 2.15 – Valores médios dos componentes de produção, matéria seca total e índice de colheita (IC) para a cultura do feijão aos 117 DAE.....	119

TABELA 2.16 – Produção de matéria seca total ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) em cada estratégia de irrigação para a cultura do feijão.....	120
TABELA 2.17 – Coeficientes $a$ , $b$ e coeficiente de determinação $r^2$ da regressão linear dos valores de IAF simulados em relação aos valores de IAF obtidos no experimento de campo para a cultura do milho.....	123
TABELA 2.18 – Coeficientes $a$ , $b$ e coeficiente de determinação $r^2$ da regressão linear dos valores de IAF simulados e dos valores de IAF obtidos no experimento de campo para a cultura do feijão.....	125
TABELA 2.19 – Coeficientes $a$ , $b$ e coeficiente de determinação $r^2$ da regressão linear dos valores de matéria seca simulados em relação aos valores de matéria seca obtidos no experimento de campo para a cultura do milho.....	127
TABELA 2.20 – Coeficientes $a$ , $b$ e coeficiente de determinação $r^2$ da regressão linear dos valores de profundidade do sistema radicular simulados e dos valores de profundidade do sistema radicular obtidos no experimento de campo para a cultura do feijão.....	129
TABELA 2.21 – Coeficientes $a$ , $b$ e coeficiente de determinação $r^2$ da regressão linear dos valores de profundidade do sistema radicular simulados e dos valores de profundidade do sistema radicular obtidos no experimento de campo para a cultura do milho.....	131
TABELA 2.22 – Coeficientes $a$ , $b$ e coeficiente de determinação $r^2$ da regressão linear dos valores de profundidade do sistema radicular simulados e dos valores de profundidade do sistema radicular obtidos no experimento de campo para a cultura do feijão.....	131

TABELA 2.23 – Radiação solar fotossinteticamente ativa $R_c$ , taxa de produção potencial nos dias claros $P_c$ e taxa de produção potencial nos dias nublados $P_o$ .....	134
TABELA 2.24 – Calibração dos valores de produção de matéria seca e de grãos obtidos após a calibração do Tratamento T0 na cultura do milho.....	138
TABELA 2.25 – Calibração dos valores de produção de matéria seca e de grãos obtidos após a calibração do Tratamento T0 na cultura do feijão.....	138
TABELA 2.26 – Comparação dos valores de produção de matéria seca total e de produção de grãos obtidos pelo modelo de produção e no experimento de campo para a cultura do milho.....	139
TABELA 2.27 – Valores do coeficiente linear $a$ , coeficiente angular $b$ , coeficiente de determinação $r^2$ e valores do teste $t$ para os coeficientes $a$ e $b$ , obtidos na comparação entre a produção de matéria seca e de grãos obtidos em experimento de campo para os diferentes tratamentos na cultura do milho.....	140
TABELA 2.28 – Comparação dos valores de produção de matéria seca total e de produção de grãos obtidos pelo modelo e no experimento de campo para a cultura do feijão.....	141
TABELA 2.29 – Valores do coeficiente linear $a$ , coeficiente angular $b$ , coeficiente de determinação $r^2$ e valores do teste $t$ para os coeficientes $a$ e $b$ , obtidos na comparação entre a produção de matéria seca e de grãos obtidos em experimento de campo para os diferentes tratamentos na cultura do feijão.....	142

TABELA 2.30 – Valores dos coeficientes obtidos na comparação entre a produção de matéria seca total obtidos em experimento de campo e através do modelo de produção, para os diferentes tratamentos na cultura do milho.....	144
TABELA 2.31 – Valores dos coeficientes obtidos na comparação entre a produção de matéria seca total obtidos em experimento de campo e através do modelo de produção, para os diferentes tratamentos na cultura do feijão.....	147
TABELA 2.32 – Valores simulados dos componentes do balanço hídrico (mm) em diferentes estratégias de irrigação para a cultura do milho.....	150
TABELA 2.33 – Total de água aplicada (irrigação e precipitação - mm), precipitação efetiva (mm), produção de grãos (kg.ha <sup>-1</sup> ) e produção de matéria seca (kg.ha <sup>-1</sup> ) obtidos na simulação de diferentes lâminas de irrigação para a cultura do milho.....	153
TABELA 2.34 – Valores eficiência de uso da água obtidos para a produção de grãos (EUA/GR), eficiência de uso da água obtidos para a produção de matéria seca (EUA/MS), eficiência de aplicação da água obtidos para a produção de grãos (EAA/GR) e eficiência de aplicação da água obtidos para a produção de matéria seca (EAA/MS) encontrados para diferentes lâminas de irrigação na simulação para a cultura do milho.....	157
TABELA 2.35 – Valores simulados dos componentes do balanço hídrico (mm) em diferentes estratégias de irrigação para a cultura do feijão.....	160
TABELA 2.36 – Total de água aplicada (irrigação e precipitação - mm), precipitação efetiva (mm), produção de grãos (kg.ha <sup>-1</sup> ) e produção de matéria seca (kg.ha <sup>-1</sup> ) obtidos na simulação de diferentes lâminas de irrigação para a cultura do feijão.....	163

TABELA 2.37 – Valores eficiência de uso da água obtidos para a produção de grãos (EUA/GR), eficiência de uso da água obtidos para a matéria seca (EUA/MS), eficiência de aplicação da água para a produção de grãos (EAA/GR) e eficiência de aplicação da água para a produção de matéria seca (EAA/MS) encontrados para diferentes lâminas de irrigação na simulação da cultura do feijão..... 167

## LISTA DE SÍMBOLOS

$+Qz$	– Ascensão capilar (mm)
$e$	– Base de logaritmos naturais
$C(\Psi)$	– Capacidade específica
$CV$	– Coeficiente de variação (%)
$Kp$	– Coeficiente do Tanque Classe A
$A, \varepsilon$	– Coeficientes obtidos por tentativa de menor erro
$\gamma$	– Coeficiente psicrométrico (0,60 mmhg/°c)
$CMF$	– Comprimento médio das folhas (cm)
$K(\theta)$	– Condutividade hidráulica do solo saturado
$\theta$	– Conteúdo em volume de água no solo (umidade volumétrica)
$\Delta e$	– Déficit de pressão de vapor da água (mbar)
$DP$	– Desvio padrão
$DAS$	– Dias após a semeadura
$DAE$	– Dias após a emergência
$dsr$	– Distribuição do sistema radicular
$-Qz$	– Drenagem profunda (mm)
$D$	– Drenagem interna (mm)
$ETo$	– Evapotranspiração (mm)
$R$	– Escoamento superficial (mm)
$ES$	– Evaporação do solo (mm)
$EUA$	– Eficiência de uso da água (kg.m <sup>-3</sup> )
$EAA$	– Eficiência de aplicação de água (kg.ha <sup>-3</sup> )
$EV$	– Evaporação (mm)
$ES_{max}$	– Evaporação máxima do solo (mm)

<i>ETr</i>	– Evapotranspiração real (mm)
<i>TR</i>	– Extração de água pelas raízes das plantas ou transpiração real (mm/dia)
<i>Ea</i>	– Fator aerodinâmico da evapotranspiração (mm)
<i>f<sub>r</sub></i>	– Fator de respiração
<i>f<sub>t</sub></i>	– Fator de influência da temperatura
<i>w</i>	– Fator de produção
<i>F</i>	– Fração do dia em que o céu está nublado
$\tau$	– Fração de energia que atinge a superfície do solo
<i>GD</i>	– Graus dia acumulado (°c)
<i>IAF</i>	– Índice de área foliar (m <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup> )
<i>IC</i>	– Índice de colheita - relação entre a matéria seca dos grãos e a matéria seca total da planta
<i>I</i>	– Irrigação (mm)
<i>LMF</i>	– Largura média das folhas (cm)
<i>f</i>	– Latitude geográfica do local (SW)
<i>MST</i>	– Matéria seca total média das plantas (kg.ha <sup>-1</sup> )
<i>PPgrão</i>	– Matéria seca média dos grãos por planta (g)
<i>NVG</i>	– Número de vagens por planta (g)
<i>NGR</i>	– Número de grãos por vagem (g)
<i>n</i>	– Número de horas de luz no dia
<i>N</i>	– Número máximo possível de horas de luz no dia
<i>NE</i>	– Número espigas por planta
<i>NGR</i>	– Número de grãos por espiga (g)
$\alpha$	– Parâmetro dependente do local e da cultura
<i>PMG</i>	– Peso médio do grão (g)
<i>PPGRÃO</i>	– Peso médio dos grãos por planta (g)
<i>g (z)</i>	– Porcentagem (%) do sistema radicular até a profundidade z
<i>P</i>	– Precipitação (mm)
<i>PMS</i>	– Produção de matéria seca (kg.ha <sup>-1</sup> )
<i>Q</i>	– Produção acumulada;
<i>q<sub>pot</sub></i>	– Produção potencial (kg.ha <sup>-1</sup> .dia <sup>-1</sup> )

$Q_{at}$	– Produção real acumulada ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ )
$P_{ms}$	– Produção de matéria seca ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ )
$z$	– Profundidade (cm)
$Pr z_{m\acute{a}x}$	– Profundidade máxima do sistema radicular (cm)
$Pr z_{sem}$	– Profundidade do sistema radicular na semeadura (cm)
$Pr z$	– Profundidade do sistema radicular (cm)
$H$	– Potencial total da água no solo
$\psi_P$	– Potencial de pressão
$\psi_g$	– Potencial gravitacional
$\psi_g$	– Potencial osmótico
$\psi_m$	– Potencial matricial
$Rc$	– Radiação fotossinteticamente ativa na ausência da atmosfera ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ )
$Rs$	– Radiação solar global média ao nível do solo ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ )
$RS$	– Radiação solar global ( $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
$Rn$	– Radiação líquida ( $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ )
$f_a$	– Relação entre a massa seca da parte aérea e massa seca da planta
$Q$	– Saldo de adiação ( $\text{cal} / \text{cm}^2 \cdot \text{dia}^{-1}$ )
$\Delta$	– Tangente à curva de saturação para a temperatura do ar ( $\text{mm Hg} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )
$TP_{m\acute{a}x}$	– Transpiração máxima ( $\text{Lt}^{-1}$ )
$Po$	– Taxa de fotossíntese para dias para dias nublados ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ )
$Pc$	– Taxa de fotossíntese para dias claros ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ )
$q$	– Taxa de produção
$q_{at}$	– Taxa de produção atual ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ )
$T$	– Temperatura média do dia ( $^\circ\text{C}$ )
$t$	– Tempo
$DPr z_{m\acute{a}x}$	– Tempo (dias) para as raízes atingirem uma profundidade a uma profundidade $Pr z_{m\acute{a}x}$
$\psi_{cc}$	– Unidade correspondente a capacidade de campo (CC)
$\psi_{pm}$	– Unidade correspondente ao murcha permanente (PMP)
$\Delta h$	– Variação da armazenagem de água (mm)

## LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE I – Valores médios do índice de área foliar ( $m^2.m^{-2}$ ) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do milho.....	201
APÊNDICE II – Valores médios do índice de área foliar ( $m^2.m^{-2}$ ) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do feijão.....	201
APÊNDICE III – Valores médios de matéria seca total ( $kg,ha^{-1}$ ) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do milho.....	202
APÊNDICE IV – Valores médios de matéria seca ( $kg,ha^{-1}$ ) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do feijão.....	202
APÊNDICE V – Valores médios de profundidade do sistema radicular (cm) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do milho.....	203
APÊNDICE VI – Valores médios de profundidade do sistema radicular (cm) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do feijão.....	203
APÊNDICE VII – Valores médios simulados do índice de área foliar ( $m^2.m^{-2}$ ) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do milho.....	203
APÊNDICE VIII – Valores médios simulados do índice de área foliar ( $m^2.m^{-2}$ ) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do feijão.....	204

APÊNDICE IX – Valores médios simulados de matéria seca ( $\text{kg,ha}^{-1}$ ) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do milho.....	204
APÊNDICE X – Valores médios simulados de matéria seca ( $\text{kg,ha}^{-1}$ ) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do feijão.....	205
APÊNDICE XI – Valores médios simulados de profundidade do sistema radicular (cm) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do milho.....	205
APÊNDICE XII – Valores médios simulados de profundidade do sistema radicular (cm) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do feijão.....	205

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>32</b>
1.1.1 Objetivo geral.....	32
1.1.2 Objetivos específicos.....	32
<b>2 DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>33</b>
<b>2.1 Revisão de Literatura.....</b>	<b>33</b>
2.1.1 A cultura do milho – Considerações gerais.....	33
2.1.2 Disponibilidade hídrica para a cultura do milho.....	35
2.1.3 A cultura do feijão – Considerações gerais.....	38
2.1.4 Disponibilidade hídrica para a cultura do feijão.....	41
2.1.5 Agricultura irrigada.....	43
2.1.6 Modelagem na agricultura.....	46
2.1.6.1 Modelagem e simulação na cultura do milho.....	49
2.1.6.2 Modelagem e simulação na cultura do feijão.....	51
2.1.6.3 Parâmetros de solo para modelagem das culturas.....	53
2.1.6.3.1 Balanço de água no solo.....	53
2.1.6.3.2 Movimento de água no solo.....	56
2.1.6.3.3 Extração de água no solo.....	59
2.1.6.4 Parâmetros de clima para modelagem das culturas.....	60
2.1.6.4.1 Temperatura.....	60
2.1.6.4.2 Radiação Solar.....	63
2.1.6.4.3 Fotoperíodo.....	65
2.1.6.5 Parâmetros de planta para modelagem das culturas.....	66
2.1.6.5.1 Índice de área foliar.....	68
2.1.6.5.2 Produção de matéria seca.....	69

2.1.6.5.3 Produção de grãos.....	72
2.1.7 Produção potencial das culturas.....	74
<b>2.2 Material e Métodos.....</b>	<b>76</b>
2.2.1 Modelo físico experimental.....	76
2.2.1.1 Descrição da cultivar de milho.....	76
2.2.1.2 Descrição da cultivar de feijão.....	77
2.2.2 Irrigação.....	77
2.2.3 Obtenção de dados básicos.....	81
2.2.3.1 Características físicas do solo.....	81
2.2.3.2 Curva característica de água no solo.....	81
2.2.3.3 Características químicas do solo.....	82
2.2.3.4 Elementos agrometeorológicos.....	82
2.2.3.5 Índice de área foliar.....	82
2.2.3.6 Matéria seca.....	83
2.2.3.7 Profundidade do sistema radicular.....	84
2.2.3.8 Componentes de produção de grãos e matéria seca total.....	84
2.2.3.9 Relação entre a produção de grãos e a matéria seca total.....	84
2.2.4 Ajuste dos dados.....	85
2.2.5 Modelo matemático.....	86
2.2.5.1 Formulação do modelo matemático.....	86
2.2.5.1.1 Fluxo de água no solo.....	86
2.2.5.1.2 Estimativa da transpiração máxima e transpiração real.....	87
2.2.5.1.3 Estimativa da evaporação máxima.....	88
2.2.5.1.4 Estimativa da distribuição do sistema radicular.....	88
2.2.5.1.5 Solução da equação numérica de Richards (1931).....	89
2.2.5.1.6 Fluxograma do modelo de extração de água.....	89
2.2.5.2 Modelo de produção.....	91
2.2.5.2.1 Previsão da produção.....	91
2.2.5.2.2 Modelo para a estimativa de produção potencial.....	91
2.2.5.2.3 Modelo para a estimativa de produção real.....	92
2.2.5.2.4 Produção de grãos.....	94
2.2.5.2.5 Fluxograma do modelo de produção da planta.....	94
2.2.6 Calibração.....	96

2.2.7 Teste do modelo.....	96
2.2.8 Aplicação do modelo.....	96
<b>2.3 Resultados e Discussão.....</b>	<b>97</b>
2.3.1 Características físicas dos solos.....	97
2.3.2 Características químicas dos solos.....	99
2.3.3 Elementos agrometeorológicos.....	99
2.3.4 Irrigações e precipitações.....	100
2.3.5 Resultados experimentais.....	101
2.3.5.1 Índice de área foliar.....	102
2.3.5.2 Matéria seca.....	107
2.3.5.3 Profundidade do sistema radicular.....	111
2.3.5.4 Componentes de produção de grãos, produção de grãos e produção de matéria seca total.....	116
2.3.6 Resultados simulados de índice de área foliar (IAF), matéria seca total (MST) e profundidade do sistema radicular (Prz).....	121
2.3.6.1 Índice de área foliar.....	122
2.3.6.2 Matéria seca.....	125
2.3.6.3 Profundidade do sistema radicular.....	129
2.3.7 Modelo de produção.....	133
2.3.7.1 Parâmetros necessários para o modelo.....	134
2.3.7.1.1 Ajustamento dos valores da radiação solar fotossinteticamente ativa nos dias claros $R_c$ em função do tempo.....	135
2.3.7.1.2 Ajustamento dos valores da taxa de produção potencial diária $P_c$ nos dias claros em função do tempo.....	136
2.3.7.1.3 Ajustamento dos valores da taxa de produção potencial diária $P_o$ nos dias nublados em função do tempo.....	137
2.3.7.2 Calibração do modelo.....	137
2.3.7.3 Teste do modelo.....	138
2.3.7.4 Aplicação do modelo de produção.....	144
2.3.7.4.1 Acúmulo de matéria seca.....	144
2.3.7.4.2 Comparação de diferentes estratégias de irrigação.....	149
2.3.7.4.3 Funções de produção.....	169
<b>3 CONCLUSÕES.....</b>	<b>174</b>

<b>3.1 Experimento de Campo.....</b>	<b>174</b>
<b>3.2 Experimento Simulado.....</b>	<b>175</b>
<b>3.3 Sugestões.....</b>	<b>177</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>178</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>200</b>

# 1 INTRODUÇÃO

As culturas de milho (*Zea mays L.*) e de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) possuem importância mundial, servindo como principal alimento na dieta da população humana e animal.

Na região fronteira-oeste do estado do Rio Grande do Sul, estas culturas são exploradas principalmente em pequenas propriedades, em especial o feijoeiro, com a utilização de baixo nível tecnológico, o que resulta em baixo rendimento de grãos. Apesar do elevado potencial produtivo das cultivares atualmente disponíveis no mercado, o rendimento médio para esta região é de 1.025 kg ha<sup>-1</sup> para a cultura do feijão e 1.571 kg ha<sup>-1</sup> para cultura do milho (EMATER, 2009).

Dentre os fatores da produção que limitam o rendimento com maior intensidade nestas culturas, destaca-se a quantidade apropriada de água. O regime pluviométrico insuficiente ou mal distribuído faz parte do cenário climático da região fronteira-oeste do Estado do Rio Grande do Sul, resultando em risco da atividade agrícola, associado a dificuldades de plantio em épocas adequadas. Para contornar este problema, a utilização da técnica da irrigação permite a suplementação de água nos períodos de estiagem, possibilitando atender as exigências hídricas durante todo o ciclo das culturas.

A irrigação tem como objetivo garantir níveis de produtividade sem flutuações significativas, garantindo a estabilidade na produção agrícola, reduzindo os riscos de investimentos para a produção causados pela deficiência hídrica, permitindo de duas a três safras por ano, dependendo da espécie cultivada. No entanto, para sua adequada utilização é necessário o conhecimento do manejo adequado do sistema, com a aplicação da quantidade necessária de água às plantas no momento correto (quando e quanto irrigar).

Na região de Santiago, RS, existe por parte dos produtores rurais, a necessidade em implantar em suas propriedades rurais sistemas de irrigação, uma vez que o Governo Federal, através de incentivos e juros baixos, expandiu linhas de crédito com financiamentos a longo prazo nesta área. Os eventos climáticos variados, tanto de escassez quanto de excesso das chuvas em períodos mal distribuídos também são fatores norteadores desta atividade, tão importante para o

desenvolvimento da metade sul. Ao mesmo tempo, o produtor mostra-se receoso uma vez que, existe uma carência de dados relativos a esta técnica, ao manejo da irrigação, necessários para a tomada de decisão tanto no âmbito de produtores quanto de técnicos. Esta região apresenta uma carência de informações quando se compara com outras regiões do RS, onde existe maior número de Universidades, órgãos de pesquisa e técnicos habilitados.

Por outro lado, novas tecnologias como a utilização de modelos de simulação de crescimento e produção de culturas, vêm sendo desenvolvidas nas últimas décadas, abrindo novos caminhos para pesquisa de planejamento e manejo de práticas agrícolas. Um modelo desta ordem visa, entre outras finalidades, buscar informações básicas das diversas interações entre a planta e o ambiente, maximizando o uso de recursos naturais de cada região, ou de uma determinada condição de cultivo. Sendo assim, pode-se definir a melhor forma de manejo da cultura, e ainda favorecer o planejamento das atividades agrícolas e da pesquisa científica.

Neste sentido, o desenvolvimento de modelos matemáticos pode disponibilizar uma ferramenta para estimar e entender o comportamento do sistema em face de diferentes situações, auxilia no processo de tomada de decisão através de uma representação simplificada da realidade, a qual permite simular vários cenários e estimar a repercussão de diferentes cursos de ação sobre os sistemas produtivos, auxiliando no planejamento da atividade.

No caso da utilização de modelos de simulação da produção das culturas, sob diferentes estratégias de irrigação, o procedimento permite obter todas as informações possíveis, que em experimentos de campo demandaria um dispendioso tempo de ensaios e medições morosas e onerosas, muitas vezes, devendo ser repetidas ao longo de vários anos.

Desta forma, o presente trabalho propõe uma simulação da produção das culturas de milho e feijão. Esta simulação leva em consideração as características climáticas do ano agrícola em estudo e de em um experimento de campo, com o objetivo de auxiliar no planejamento e tomada de decisões de manejo de estratégias de irrigação, traz maior segurança para produtores da região fronteira-oeste do Estado do Rio Grande do Sul, em especial a região de Santiago, RS.

## 1.1 Objetivos

Diante das considerações apresentadas, o presente trabalho, tem por objetivo:

### 1.1.1 Objetivo geral

Calibrar, validar e aplicar um modelo de simulação para o ciclo das culturas do milho e do feijão na região de Santiago, RS.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver procedimento experimental para geração dos dados necessários para o modelo de simulação do ciclo das culturas de milho e feijão comparando a produtividade medida no campo, com os resultados simulados através dos modelos;
- Testar o modelo calibrado para as culturas de milho e feijão, considerando diferentes lâminas de irrigação;
- Avaliar a aplicabilidade do modelo proposto como ferramenta de planejamento e de suporte à decisão em planejamentos agrícolas irrigados na região de Santiago, RS;
- Estudar a eficiência da aplicação da água sob diferentes estratégias de irrigação com a utilização de modelos matemáticos.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Revisão de literatura

O capítulo revisão de literatura traz a revisão dos principais autores que fundamentaram este trabalho, através dos quais, foi possível conhecer as formas com que os parâmetros utilizados nesta pesquisa vêm sendo conduzidos pelos autores.

#### 2.1.1 A cultura do milho – Considerações gerais

O milho (*Zea mays* L.) pertence a família Poaceae e é considerado originário de uma região tropical americana, provavelmente o México. As qualidades adaptativas da cultura foram resultantes do trabalho desenvolvido pelos indígenas americanos. Entretanto a domesticação do primitivo milho tornou-se extremamente dependente do homem (FORNASIERI FILHO, 1992).

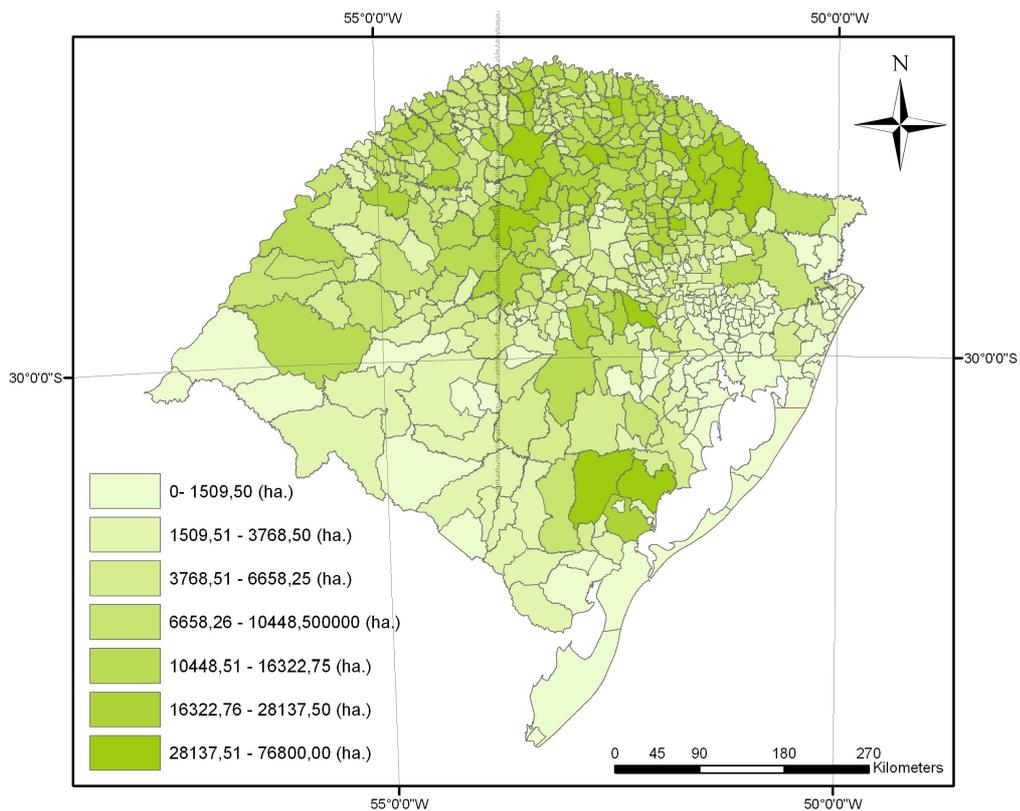
A cultura está entre as graníferas de alta importância na produção agrícola do Brasil, haja vista a significativa área cultivada e a destinação, tanto para consumo humano como animal. Representa um dos principais cereais mais cultivados em todo o mundo, fornecendo produtos largamente utilizados, para alimentação humana, animal e matérias-primas para a indústria, principalmente em função da quantidade e da natureza das reservas acumuladas nos grãos (ASSIS, 2004).

No Brasil, o cultivo de milho espalhou-se em todos os Estados do Brasil e em quase todas as propriedades agrícolas, tanto na agricultura familiar quanto na de exportação. Em termos de área semeada e de produção de grãos é o segundo cereal de maior importância no Brasil sendo que, apenas nos dois últimos anos, perdeu a primeira colocação para a cultura da soja (VILARINHO, 2005). O país com uma produtividade que vem crescendo cerca de 4% ao ano é o quarto maior

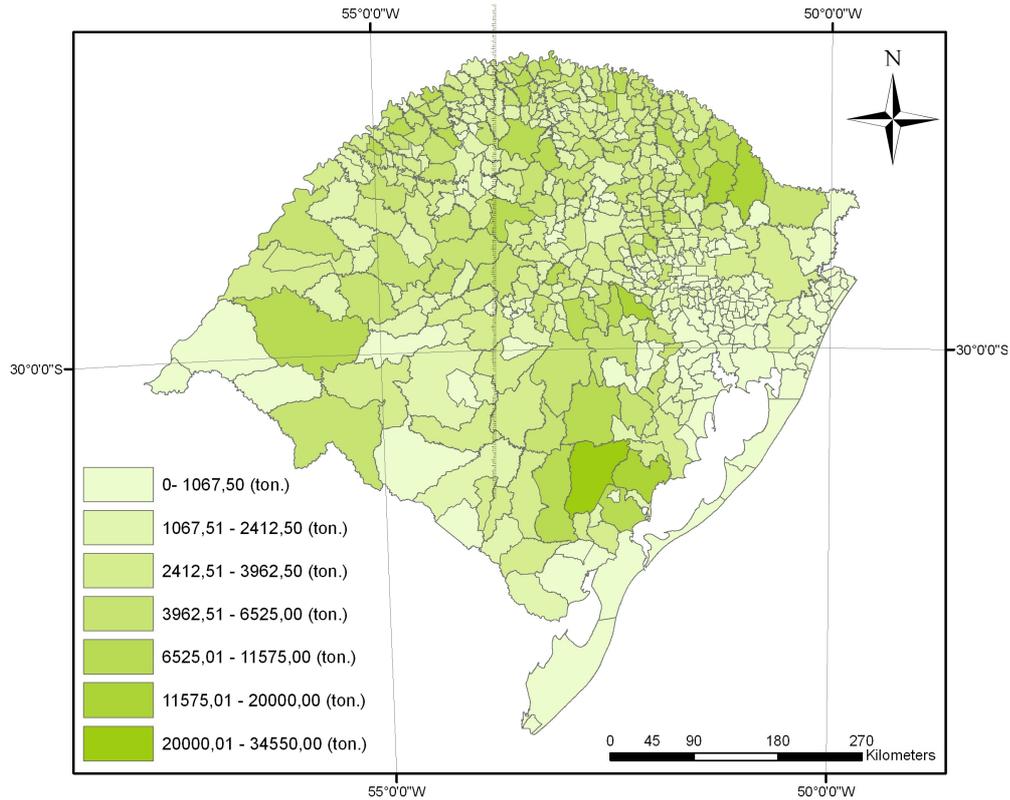
produtor de milho, superado apenas pelos Estados Unidos, China e União Européia que, juntos, representam 67% da produção mundial (AGRIANUAL, 2008).

A área plantada com a cultura de milho no Brasil na safra 2007/08 foi de 14.010.80,00 de hectares, com uma produção de 52.112.20,00 milhões de toneladas, sendo  $3.785 \text{ kg.ha}^{-1}$ , gerando uma receita bruta de R\$ 15.616.489,00 (IBGE, 2009). No Estado do Rio Grande do Sul, nesta mesma safra, a área colhida foi de 1.363.323,00 de hectares e a produção foi de 5.969.118,00 toneladas de grãos,  $4.378 \text{ kg.ha}^{-1}$ , gerando R\$ 1.676.453,00 (IBGE, 2009).

Nas Figuras 2.0 e 2.1 pode-se visualizar as áreas plantadas e a produção (toneladas) de milho no Estado do Rio Grande do Sul para o período de 2004 a 2007.



**Figura 2.0** – Área plantada com a cultura de milho para o Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2009) – Período 2004/2007.



**Figura 2.1** – Produção de milho para o Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2009) - Período 2004/2007.

### 2.1.2 Disponibilidade hídrica para a cultura do milho

A disponibilidade hídrica é um fator determinante na obtenção de elevadas produtividades da cultura do milho. Vários autores, tais como Matzenauer (1994), Bergonci et al. (2001) e Bergamaschi et al. (2004) destacam que, as oscilações nas safras de milho, das principais regiões produtoras do Brasil, estão associadas à disponibilidade de água.

No estado do Rio Grande do Sul, a disponibilidade de água às plantas é o fator que afeta o rendimento com maior frequência e intensidade (MATZENAUER, et al. 1995).

De acordo com Fancelli (2001) a cultura do milho exige de 300 a 350 mm de água para uma produção satisfatória sem uso de irrigação. Os autores ressaltam que, regiões em que as precipitações oscilem de 300 a 5000 mm anuais estão aptas para o plantio do cereal. Porém essa quantidade deve ser bem distribuída durante o

ciclo da cultura. Outros autores, tais como, Doorenbos & Kassan (1994) mencionam necessidades de 500 a 800 mm de água, dependendo do clima.

Para Matzenauer et al. (1983) o consumo hídrico da cultura, depende da população de plantas. Com 67 mil plantas por hectare, um híbrido precoce de milho necessita de uma média de 650 mm de água em todo o ciclo. No entanto, numa população de 50 mil plantas por hectare, a necessidade média é de 577 mm para todo o ciclo do milho, na mesma região. O que demonstra a necessidade de um planejamento adequado de práticas de manejo para adequar as populações de plantas às reais condições pedoclimáticas, a fim de reduzir os riscos causados por deficiência hídrica.

As maiores exigências hídricas da cultura do milho se concentram nas fases de emergência, florescimento e formação de grão. No período compreendido entre 15 dias antes e 15 dias após o aparecimento da inflorescência masculina, o requerimento de um suprimento hídrico satisfatório, aliado a temperaturas adequadas, tornam tal período extremamente crítico. Por isso a razão pela qual a fase deve ser criteriosamente planejada com o intuito de coincidir com o período estacional que apresente temperaturas favoráveis (FANCELLI, 2001).

Este autor destaca ainda, que o consumo de água médio da cultura raramente ultrapassa 2,5 mm/dia, enquanto a planta estiver com uma altura de 30 cm. O período compreendido entre o espigamento e a maturação, o consumo pode elevar-se para 5 a 7,5 mm diários. Bergamaschi et al. (1991) citam em torno de 7 mm por dia de água durante o florescimento, quando este ocorre próximo ao solstício de verão, que é o período de máxima radiação solar. Daker (1970) com observações experimentais evidenciam consumo diário próximo a 10 mm, quando as plantas encontram-se em condições de intenso calor e baixa umidade relativa do ar.

Quando a disponibilidade hídrica não é suficiente para atender a demanda da cultura, freqüentes déficits hídricos podem ocorrer. Para Matzenauer et al. (2002), a maior parte do estado do Rio Grande do Sul apresenta fortes restrições ao cultivo do milho em decorrência do deficit hídrico, que abrange toda a metade sul e o extremo oeste do Estado. Mesmo nas regiões mais ao norte, onde se encontram as áreas consideradas preferenciais pelo zoneamento climático, as médias de precipitação não atendem às necessidades da cultura, e a ocorrência de estiagens também afeta a produção, embora com menor intensidade e freqüência. Para Pereira et al. (2002) este fato deve-se por seu ciclo de desenvolvimento coincidir com os períodos em

que ocorre limitação hídrica, sofrendo déficit hídrico e, assim, perturbações fisiológicas e morfológicas que afetam o desenvolvimento das plantas e, portanto, a elaboração da biomassa vegetal.

Para Matzenauer et al. (2002), a deficiência hídrica é uma das principais causas de rendimento em milho, exercendo efeitos variados sobre a planta, dependendo do seu estágio de desenvolvimento, do nível de deficiência e da duração.

Quando a deficiência hídrica ocorrer durante o desenvolvimento vegetativo, diminui a produção de matéria seca na colheita, por reduzir o desenvolvimento da área foliar, acúmulo de matéria seca no colmo, afetando a capacidade potencial de produção. Na pré-floração, ocorre a senescência prematura das folhas levando a redução da fotossíntese, ocasionando mudanças na partição de fotoassimilados, e no posterior desenvolvimento dos órgãos reprodutores (FERREIRA et al., 2000).

Durante o crescimento vegetativo do milho, a deficiência hídrica ocasiona atraso na ocorrência de estádios fenológicos e necessidade de maior acúmulo de graus-dia para completar seu ciclo, afetando negativamente o índice de área foliar e o acúmulo de matéria seca aérea (FRANÇA et al., 1999).

Henckel (1964) afirmou que se houver deficiência hídrica uma semana após a emissão das anteras, pode ocorrer queda de 50% na produção; deficiências posteriores resultarão em danos da ordem de 25 a 30%. De acordo com Aldrich et al. (1982) dois dias de estresse hídrico no florescimento diminui o rendimento em mais de 20% e, de quatro a oito dias, em mais de 50%.

Quando o déficit hídrico ocorre durante o período crítico da cultura, a produtividade de grãos é afetada, reduzindo, principalmente, o número de grãos por espiga (MATZENAUER, 1994; BERGONCI et al., 2001). Bergonci et al. (2001), relacionando o déficit hídrico com a redução do número de grãos por espiga e por metro quadrado, concluíram que o déficit hídrico que ocorre no período vegetativo interfere pouco no rendimento, pois não afeta significativamente o número de grãos por espiga. Silva (2000) observou que o déficit, logo após o estabelecimento do número de grãos, reduziu o período de enchimento de grãos, mas não alterou a taxa de acúmulo de matéria seca.

De acordo com Pantey et al. (2000) as estratégias adaptativas das plantas de milho sob as condições de deficiência hídrica, resultam na diminuição do índice de

área foliar, e aumento do sistema radicular, diminuindo a relação copa/raiz e aumentando a eficiência no uso da água.

### 2.1.3 A cultura do feijão – Considerações gerais

A cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) pertence à família Fabaceae, sua origem até hoje, constitui fonte de divergência entre os pesquisadores. Algumas evidências levam à hipótese de que o centro de origem da planta e sua domesticação como cultura teriam ocorrido na região da Mesoamérica, por volta de 7000 anos a.C., mais especificamente no México. Supõe-se que a partir dessa região, a cultura teria, posteriormente, disseminado para toda a América do Sul. Existem ainda autores que o consideram de origem Asiática e até desconhecida (EMBRAPA, 2006).

Entre as espécies cultivadas do gênero *Phaseolus*, o feijoeiro comum é o mais plantado, sendo responsável por cerca de 95% da produção mundial de *Phaseolus* (YOKOYAMA & STONE, 2000).

A cultura apresenta grande importância econômica e social para o Brasil, destacando-se como fonte de proteína na dieta alimentar da população brasileira, sendo um prato quase obrigatório das populações rural e urbana. É cultivado nos mais variados tipos de solo, clima e sistemas de produção, tais como o cultivo solteiro, consorciado ou ainda intercalado com uma ou mais espécies (YOKOYAMA et al., 1996). O feijão representa, ainda, importante fonte de diversos nutrientes e fibra, embora sua composição possa variar de acordo com o local de plantio, fatores ambientais e com a cultivar (ARAÚJO et al., 1996).

Estimativas disponíveis pela FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura), destacam que os principais países produtores de feijão são aqueles em desenvolvimento, sendo os Estados Unidos a exceção. O maior consumo dessa leguminosa se concentra, principalmente, nesses locais de produção, sendo essa característica um fator que diminui sua comercialização internacional (EMBRAPA ARROZ & FEIJÃO, 2008).

Os cinco maiores exportadores do grão do mundo são China, Estados Unidos, Canadá, Myanmar e Argentina, que dominaram 80% de transação mundial

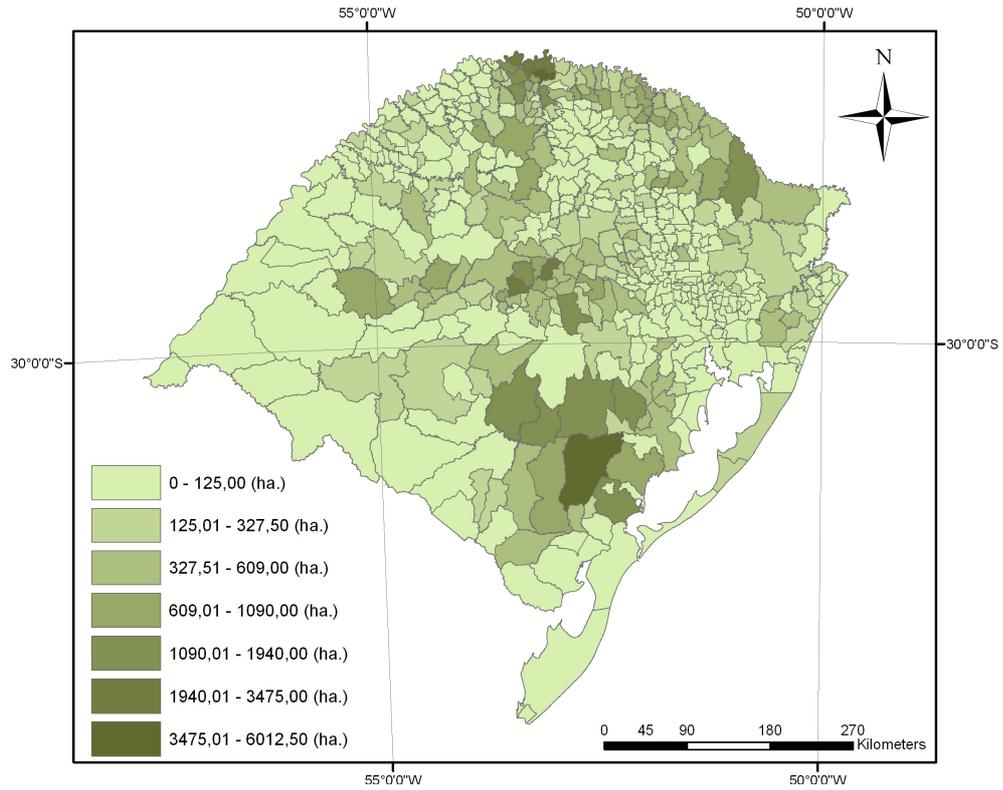
em vários anos (BELSHE et al., 2001). O Brasil e México são os dois maiores países produtores e consumidores mundiais. O Brasil exporta pequenas quantidades por ação direta de empresas exportadoras. O consumo atual de feijão no país é de cerca de 16 kg/hab/ano, existindo preferências de cor, tipo de grão e qualidade culinária em algumas regiões (EMBRAPA ARROZ & FEIJÃO, 2008).

Apesar de o Brasil ser o maior produtor mundial de feijão e a área ocupada com a cultura aumentar a cada ano, sua produção ainda está aquém do necessário para suprir a demanda interna, que teve um acréscimo de 20% em relação a safra de 2004/05. A cultura tem potencial para se tornar mais um item importante na pauta de exportações do agronegócio brasileiro. A média de produção é de 800 kg/ha, sendo que possui um potencial produtivo de 4.500 kg/ha. Países como a Argentina, que não tem tradição na cultura, exportam mais feijão do que o Brasil (CONAB, 2007).

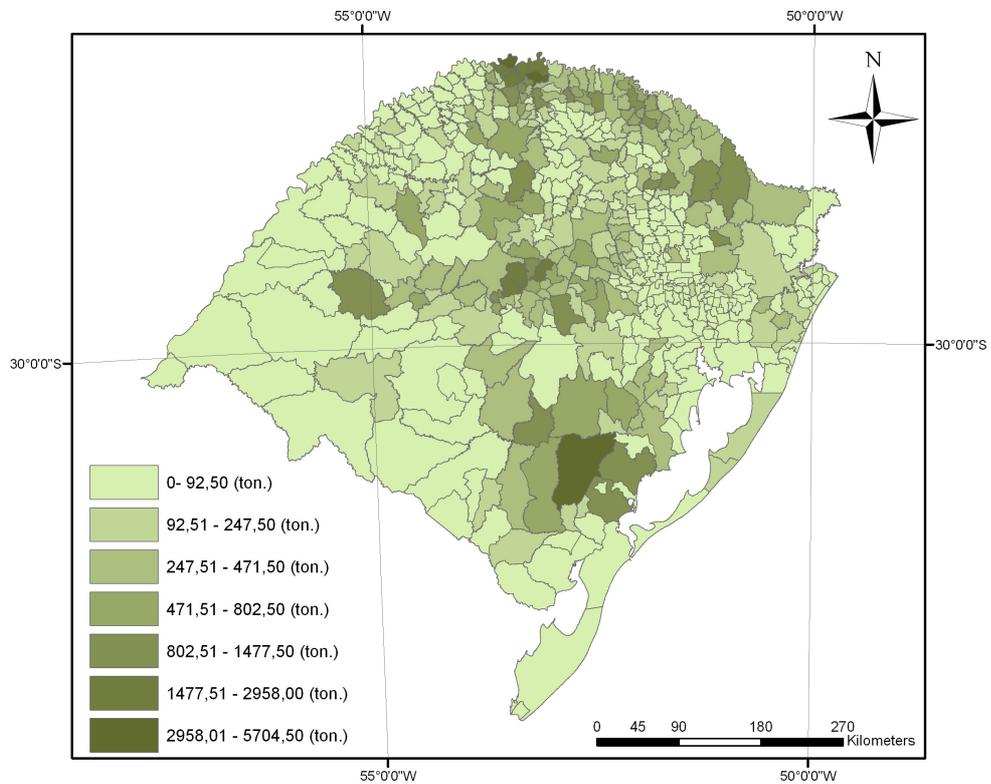
A área plantada com a cultura no Brasil na safra 2007/08 foi de 3.788.28,00 de hectares, onde foram colhidos 3.169.36 toneladas, gerando uma receita bruta de R\$ 3.880.952,00. No Estado do Rio Grande do Sul, nesta mesma safra, a área colhida foi de 117.06 de hectares e a produção foi de 474.67 toneladas de grãos, gerando R\$ 112.201,00 (IBGE, 2009).

Nas Figuras 2.2 e 2.3 pode-se visualizar as áreas plantadas e a produção (toneladas) de feijão no Estado do Rio Grande do Sul para o período de 2004 a 2007.

Os estados brasileiros maiores produtores da leguminosa são o Paraná, Minas Gerais, Bahia, São Paulo e Goiás. A primeira safra, conhecida como das águas, é plantada entre agosto e outubro e tem como principais produtores Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo e a na Bahia. Já a segunda safra é plantada de abril a junho na região Sul-Sudeste, sendo usada como rotação para as culturas de soja e milho. No Norte, Centro-Oeste e Nordeste é a primeira e única safra do ano. Vale ressaltar, que ela representa, atualmente, 50% do total anual de feijão. A última safra é plantada em junho/julho nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Bahia, sob sistema irrigado com pivô-central, atinge alta produtividade e abastece o mercado na entressafra.



**Figura 2.2** – Área plantada com a cultura de feijão para o Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2009) - Período 2004/2007.



**Figura 2.3** – Produção de feijão para o Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2009) - Período 2004/2007.

#### 2.1.4 Disponibilidade hídrica para a cultura do feijão

Dentre os fatores climáticos, a precipitação pluviométrica é uma das principais causas do insucesso na obtenção da alta produtividade de feijão. Em regiões as quais a distribuição de chuvas é irregular, podem ocorrer perdas significativas, principalmente, quando a falta ou o excesso de água ocorrem na fase mais sensível.

A disponibilidade hídrica para a cultura depende da época e local de semeadura, variedade, condições edafoclimáticas e estágio de desenvolvimento. Para Silveira & Stone (2001), as áreas aptas à produção de feijão devem apresentar precipitações anuais entre 500 mm e 1500 mm, porém, a quantidade de chuva para suprir a demanda durante o ciclo da cultura varia de 300 mm a 400 mm, dependendo da capacidade de retenção de água do solo. Doorenbos & Kassam (1979) destacam que o feijoeiro requer cerca de 1.750 kg de água para produzir 1 kg de matéria seca e grãos.

Para ciclos com duração de 60 e 120 dias as variações oscilam entre 300 e 500 mm (DOORENBOS & KASSAN, 1994). Valores inferiores foram relatados, por Faria et al.(1997) que encontrou um consumo de água entre 270 e 360 mm para ciclos de 90 dias. Bergamaschi et al. (1989); Andreatta et al. (1991); Maluf & Caiaffo (1999) 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).

Ainda outros autores, tais como, Valadão & Klar (1996) verificaram um consumo médio de 348 mm e média diária de  $3,75 \text{ mm.dia}^{-1}$  para o feijoeiro semeado em agosto, em Botucatu-SP. Guandique (1993) obteve valores totais de 190 mm e médios de  $2,1 \text{ mm.dia}^{-1}$ , para semeadura em maio, em Piracicaba, SP. Santos & André (1992) obtiveram valores de evapotranspiração de 317,3 mm para semeadura no mês de janeiro, em Piracicaba.

O consumo de água pela cultura, raramente excede 3,0 mm/dia, enquanto a planta estiver nos estádios iniciais de desenvolvimento (V1, V2 e V3). Contudo, durante o pleno desenvolvimento vegetativo (V4), florescimento (R5 e R6) e enchimento de vagens (R7 e R8), seu consumo pode se elevar para 4,0 a 4,5 mm diários podendo chegar a um consumo superior a 5,0 mm diários quando as plantas

encontram-se submetidas a condições de intenso calor e baixa umidade relativa do ar (CAIXETA, 1978).

A cultura do feijão concentra elevada porcentagem do sistema radicular na camada superficial do solo, refletindo-se em alta sensibilidade ao déficit hídrico. Em função disso, um adequado desenvolvimento das plantas está associado a distribuição regular das chuvas ou ao eficiente uso da água de irrigação (CARLESSO et al., 2007).

Analisando a disponibilidade hídrica para o feijoeiro na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, Matzenauer et al. (2002) verificaram que as deficiências hídricas no ciclo completo da cultura variaram de 38 mm a 97 mm, na média do período estudado, dependendo do local e da época de semeadura. Os autores verificaram que, em períodos quentes e secos, como no ano agrícola 1985/86, em condições de elevada demanda evaporativa da atmosfera, as deficiências hídricas no ciclo completo do feijoeiro ultrapassaram 300 mm em algumas localidades do Planalto Médio. De acordo com os autores são frequentes os déficits hídricos durante o ciclo do feijoeiro, sendo que os risco por deficiência aumentam a medida que atrasa a época da semeadura até início de novembro, caracterizando-se, portanto a época de setembro como a de menor risco a produção de feijão.

Estima-se que ocorra estresse hídrico em 60% das áreas de produção de feijão na América Latina (LAING et al., 1984). A literatura apresenta resultados distintos quanto à redução da produtividade em função do estresse hídrico nos diversos estádios de desenvolvimento. Fancelli (1992) as fases críticas de disponibilidade de água são a germinação, florescimento e enchimento de grãos. Mackay & Eaves (1962) consideram como período crítico o pré-florescimento; já Kattan & Fleming (1956) indicaram o florescimento e Doorenbos & Pruitt (1984) afirmaram que o florescimento e o aparecimento das vagens são os períodos mais críticos.

Calvache et al. (1997) observaram maior demanda de água pelo feijoeiro no subperíodo do início do florescimento ao início de enchimento de grãos, épocas de maior índice de área foliar e atividade fotossintética das plantas. Massignam et al. (1998) consideram que a suscetibilidade mais crítica do feijoeiro à deficiência hídrica ocorre aos seis dias antes até seis dias após a floração.

De acordo com Guimarães (1988), durante a fase vegetativa do desenvolvimento do feijoeiro, o déficit hídrico tem efeito indireto no rendimento de grãos, pela redução da área foliar das plantas. Se o déficit ocorrer durante a floração, provoca abortamento e queda das flores, com redução do número de vagens por planta; se ocorrer no enchimento dos grãos, prejudica a formação de sementes ou reduz seu peso.

Calvache et al. (1998) estudaram o efeito de épocas de deficiência hídrica para a cultura do feijoeiro, com o objetivo de identificar estádios da cultura de feijão que apresentam a menor sensibilidade ao estresse de água do solo, nos quais a irrigação pudesse ser omitida, sem um significativo decréscimo da produção. Os autores concluíram que a deficiência de água no solo, durante a fase de enchimento da vagem, afetou a produtividade do feijoeiro, sendo que no estádio vegetativo não reduziu a produtividade, permitindo uma economia de água de 30%.

#### 2.1.5 Agricultura irrigada

A irrigação das culturas agrícolas consiste no suprimento de água as plantas na quantidade necessária e no momento adequado para se obter, economicamente, a produção ótima e a melhor qualidade do produto. Segundo Gonzaga Neto (2000), proporciona um incremento médio de produtividade de até 200%.

Gomes (1997) destaca a irrigação como uma prática agrícola de fornecimento de água às culturas, onde e quando as chuvas, ou qualquer outra forma natural de fornecimento, não são suficientes para suprir as necessidades hídricas das plantas. Este suprimento das necessidades hídricas é o principal objetivo da irrigação, que durante o crescimento e desenvolvimento das culturas recoloca no solo as deficiências hídricas que afetam o desenvolvimento e crescimento das culturas e assim reduzindo a produtividade das safras agrícolas (MAGGI, 2003).

A irrigação representa a maneira mais eficiente de aumento da produção de alimentos, apesar do grande consumo de água. O setor agrícola é o maior consumidor de água (PAZ et al. 2000), como mostram dados de Christofidis et al. (2007), com 69% do consumo a nível mundial vindo da agricultura, de derivadas

fontes (rios, lagos e aquíferos subterrâneos) e os outros 31% são consumidos pelas indústrias e uso doméstico.

Estima-se que, a nível mundial, no ano de 2020 os índices de consumo de água para a produção agrícola sejam mais elevados na América do Sul, África e Austrália. Pode-se prever um incremento maior da produção agrícola no hemisfério Sul, especialmente pela possibilidade de elevação da intensidade de uso do solo que, sob irrigação, produz até três cultivos por ano (PAZ et al. 2000).

Para Christofidis et al. (2007) a importância da agricultura irrigada pode ser vista pelos dados da superfície agrícola mundial, colhida no ano de 2000, correspondendo a uma área da ordem de 1,5 bilhões de hectares. Desta área, cerca de 275 milhões estavam sob irrigação. A superfície produtiva agrícola sob sequeiro, em torno de 1,225 bilhões de hectares, foi responsável por 58% do total colhido, enquanto a superfície agrícola irrigada, corresponde a 18% da área total sob produção agrícola, possibilitou cerca de 42% do total colhido.

Quando se utiliza a técnica da irrigação é necessário levar em consideração a precipitação pluvial. Em algumas regiões esta é bem distribuída durante todas as estações do ano, já em outras regiões torna-se insuficiente para atender a demanda evaporativa das culturas, geralmente ocorrendo nos meses mais quentes do ano, desta forma justifica-se a utilização da irrigação (MAGGI, 2003). Quando a precipitação pluvial é levada em consideração a irrigação é chamada de complementar, pois é aplicado o total requerido pelas plantas menos o menor índice pluviométrico da região. Já quando não se considera a precipitação pluviométrica, ou esta não é disponível, a irrigação é chamada de total.

No Estado do Rio Grande do Sul, irrigações suplementares são necessárias no período primavera-verão, devido a alta demanda evaporativa que ocorre nos meses de dezembro a fevereiro, tornando-se insuficiente para atender as exigências hídricas das culturas, principalmente no sul do Estado (BERLATO, 1992).

Outra questão importante em agricultura irrigada é o manejo do sistema, sendo uma parcela que contribui significativamente para o sucesso do empreendimento. Muitos sistemas são bem dimensionados e apresentam déficit econômico em função da aplicação inadequada da água, sem consideração dos critérios de solo, planta e atmosfera que indicam o momento e a quantidade ideal da lâmina de irrigação. Lâminas excessivas, além de serem motivo de perda de água e energia, também influenciam no processo erosivo da área através do escoamento

superficial. Em contrapartida, lâminas deficitárias podem submeter as plantas a um processo de estresse que conduza a uma redução da produção final.

O momento correto de aplicar água e a sua respectiva lâmina (quando e quanto aplicar), através do manejo do solo são necessários estabelecer quando se utiliza a técnica da irrigação (BERNARDO, 1989). É necessário conhecer o comportamento da cultura em função das diferentes quantidades de água a ela fornecidas, as etapas de seu desenvolvimento de maior consumo de água e os períodos críticos, quando a falta ou excesso redundaria em quedas de produção.

Os critérios de manejo de água normalmente utilizados são, via de regra, baseados em medidas no solo, na planta e na atmosfera. Os baseados em medidas no solo se fundamentam na determinação direta ou indireta do teor de água presente no solo, enquanto os baseados em medidas na planta se estabelecem no monitoramento do potencial hídrico, da resistência estomática, da temperatura da folha por meio de termômetro infravermelho e outros; já os baseados em medidas climáticas variam desde simples medidas de evaporação de água de um tanque, como o Classe A, até complexas equações para estimativa da evapotranspiração (ROCHA et al. 2003).

Para Bernardo (2008), o quanto de água aplicar é normalmente calculado com base na quantidade de água consumida pela cultura, dividida pela eficiência de irrigação. A quantidade de água consumida pela cultura pode ser estimada por meio da evapotranspiração real ou por meio da variação do teor de água no solo. Sendo que a quantidade de água a ser aplicada por irrigação tem de ser compatível com a capacidade de retenção de água na zona radicular da cultura.

O autor ressalta que, a questão do quanto irrigar, é sem dúvida, um dos pontos mais importantes no manejo da irrigação, podendo ser determinada de diferentes modos: pela medição na deficiência de água na planta, pelo sintoma desta deficiência, pela disponibilidade de água no solo, pela evapotranspiração real, pelo turno de rega e pelo balanço de água no solo.

### 2.1.6 Modelagem na agricultura

A resposta entre as plantas e o ambiente envolve uma complexidade de processos físicos, químicos e biológicos. Com o objetivo de se obter melhor conhecimento das respostas da cultura ao ambiente, modelos de simulação são utilizados como ferramenta de grande potencial, permitindo o estudo e o entendimento do conjunto, estimando o desempenho da cultura em diferentes áreas e situações (SOLER et al., 2001).

Para um entendimento de modelos de simulação é necessário que se faça a separação dos termos: sistemas, modelos e simulação. A conceituação de cada termo é feita por Witt (1978), sendo, sistema: conjunto de componentes e suas inter-relações, que são agrupados com o objetivo de estudar alguma parte do mundo real, sendo que a seleção desses componentes depende dos objetivos do estudo; modelo: representação matemática de um sistema ou um processo, enquanto que modelagem é o processo de desenvolvimento dessa representação; simulação: inclui os processos necessários para a operacionalização do modelo ou a solução do modelo visando simular o que acontece no sistema.

De acordo com Naylor et al. (1971), o modelo, para ser útil, deve abranger dois atributos conflitantes, o realismo e a simplicidade. O modelo deve servir como uma aproximação precisa do sistema real e conter a maior parte dos aspectos importantes do mesmo. A compreensão e manipulação do modelo vão depender o seu grau de complexidade, por isso, o ideal é que os modelos não sejam tão complexos, tornando-se de fácil aplicação.

Na agricultura, a maioria dos modelos utilizados baseia-se na simulação do crescimento de plantas e na previsão de rendimento, dando ênfase a modelagem dos processos envolvidos na produção agrícola. A utilização desta técnica vem ganhando espaço, devido às inúmeras aplicações que os modelos possibilitam.

Neste sentido, a utilização da modelagem pode auxiliar no planejamento do sistema produtivo e no suporte às tomadas de decisão. O desenvolvimento de modelos e a utilização da programação podem disponibilizar uma ferramenta para estimar e entender o comportamento do sistema face à diferentes situações, auxiliando no processo de tomada de decisão através de uma representação

simplificada da realidade, a qual permite simular vários cenários e estimar a repercussão de diferentes cursos de ação sobre os sistemas produtivos.

Para Borges & Ritchie (1998), modelos podem ser utilizados para analisar os efeitos de diferentes estratégias, ajudando na determinação da melhor decisão, e apresentam uma série de vantagens para uma análise econômica, em relação aos dados provenientes de experimentação em campo. Entre essas vantagens destacam-se: um grande número de diferentes estratégias que podem ser avaliadas rapidamente e com baixo custo; cada estratégia pode ser avaliada em um amplo intervalo de condições incertas, como por exemplo, clima e dependendo do modelo de crescimento utilizado, pode-se avaliar complexas estratégias de manejo interagindo com diversas decisões como irrigação, fertilização e datas de semeadura. Pode-se ainda destacar a economia de tempo e recursos necessários para a pesquisa, mão-de-obra disponível e a resposta em curto prazo para a tomada de decisões, que em experimentos de campo implicaria em vários ensaios, tendo que ser repetidos por muitos anos.

Para Bernardes et al. (1998), a construção de modelos também se ganha com a identificação de áreas em que há escassez de informações, sugerindo prioridades de pesquisa e agregando conhecimento de forma organizada e resumida, acarretando sempre um enfoque interdisciplinar ao estudos.

A formulação de modelos compreende as fases de seleção dos parâmetros nos quais o modelo está baseado, seleção de equações para descrever os fenômenos a serem considerados, parametrização das equações com os dados disponíveis em publicações ou em resultados próprios gerados, calibração dos resultados alterando seus valores até que ocorra a concordância entre os resultados do modelo e os resultados empíricos os quais o modelo deveria reproduzir a avaliação dos resultados gerados. Essa avaliação deve ser feita comparando-se os resultados externos, como por exemplo, produtividade da cultura e seu acúmulo de matéria seca, e os resultados internos, como o balanço de água no solo, acúmulo de área foliar, com seus análogos, medidos empiricamente (VAN KEULEN et al. 1982).

A precisão dos resultados da simulação depende em grande parte da precisão com que foram avaliados os parâmetros do sistema. Vale ressaltar que, embora os modelos de simulação tenham grande aplicabilidade e custo inferior

aquele dos experimentos convencionais, eles não podem ser considerados substitutos dos experimentos, e sim uma técnica que os complementa.

Existem vários tipos de modelos, sendo os mais importantes: a) Modelos Conceituais, b) Modelos Físicos e, c) Modelos Matemáticos. Os modelos matemáticos são descrições construídas em linguagem matemática, mediante simplificações do sistema, sendo representados por: componentes, variáveis, parâmetros e relações funcionais (NAYLOR et al, 1977 apud PESSOA et al, 1997).

Os modelos matemáticos podem ser classificados em função de sua estrutura, como: (i) mecanísticos, (ii) correlacionais ou estatísticos e (iii) empíricos, ou ainda, em função da avaliação da incerteza, sendo: (i) determinísticos e (ii) estocásticos.

Os modelos matemáticos mecanísticos, segundo Costa (1997), são aqueles baseados na descrição do processo que ocorre no sistema real considerado, ou seja, existe a tentativa de se considerar os princípios físicos e biológicos que ocorrem no sistema. Para tanto, esses modelos procuram descrever as ocorrências a partir dos processos anteriores, muitas vezes utilizando submodelos empíricos. Como restrição, cita-se a dificuldade na obtenção dos dados necessários para o seu desenvolvimento; por outro lado, apresentam pouca restrição à extrapolação geográfica e temporal dos resultados.

Os modelos empírico-estatísticos pretendem, com base em séries históricas de dados meteorológicos e dados de rendimento das culturas, estimar o comportamento das culturas; portanto, a validade dos resultados destes modelos dependem da representatividade dos dados utilizados, o que dificulta sua extrapolação (BAIER, 1979).

Os modelos matemáticos empíricos são baseados na interação quantitativa entre os elementos considerados, ou seja, os resultados não se baseiam na explicação dos fenômenos envolvidos. Normalmente, tais modelos fundamentam-se na análise de regressões e, via de regra, requerem grande número de dados para o seu desenvolvimento. Portanto, como os modelos empíricos não consideram o entendimento do sistema, apresentam restrições à extrapolação de seus resultados (COSTA & BARROS, 2001).

Este autor define ainda os modelos determinísticos, nos quais as respostas, ou os resultados são fornecidos sem nenhum grau de probabilidade; e os modelos estocásticos que apresentam um grau de probabilidade associado a sua resposta.

### 2.1.6.1 Modelagem e simulação na cultura do milho

Para a cultura do milho vários modelos desenvolveram-se para simular o crescimento, desenvolvimento e produtividade.

O modelo CERES-Maize está agrupado em um Sistema de Suporte à Decisão para Transferência de Tecnologia (DSSAT) e tem sido amplamente utilizado em todo o mundo. Ele considera o processo do balanço de água no solo, a interceptação da radiação pelo dossel, a produção de matéria seca e a partição da biomassa (KINIRY et al., 1997). Sua versão 3.1 enseja ao usuário obter o desempenho espacial das simulações e das análises dos resultados (THORNTON et al., 1997).

A utilização deste modelo vem sendo difundida em vários trabalhos. Freitas et al. (2004) realizaram a simulação da produtividade do milho pelo modelo CERES-Maize em função da lâmina e da uniformidade de água, onde compararam os dados simulados pelo modelo com os dados coletados de experimento de campo. Os tratamentos consistiram de cinco lâminas de água aplicadas com duas uniformidades, alta uniformidade (< 80%) e baixa uniformidade (< 70 %). O modelo simulou consistentemente a produtividade, o IAF e a matéria seca para a maioria dos tratamentos, sendo que subestimou a produtividade da cultura nos tratamentos com déficit acentuado e nos tratamentos em que houve aplicação de lâmina superior a adequada, o modelo simulou valores superiores aos experimentais.

Com o objetivo de se conhecer as características genéticas desejáveis das cultivares e as épocas de semeadura que proporcionassem a melhor performance da cultura durante o período da entressafra, Soler et al. (2001) simularam o crescimento e desenvolvimento do milho “safrinha” com o modelo CERES-Maize, sob condições de sequeiro e de irrigação em duas regiões do Estado de São Paulo, Ribeirão Preto e Manduri, a fim de se avaliar o efeito de diferentes características agrônomicas e fisiológicas da cultura possíveis de melhoramento genético, foram alterados os coeficientes genéticos considerando-se diferentes condições de manejo e a variabilidade climática das regiões estudadas.

Assis et al. (2006) utilizaram um modelo estocástico para estimar a produtividade potencial da cultura do milho em Piracicaba, SP, utilizando dados de temperatura e radiação solar média diária. Os autores concluíram que distribuições

normal, triangular simétrica e triangular assimétrica podem ser utilizadas para a estimativa do rendimento de milho.

Já Wolschick et al. (2007) utilizaram o modelo mecanístico para simular o crescimento e desenvolvimento da cultura do milho em Viçosa, MG. O modelo foi testado utilizando dados experimentais de área, senescência foliar e matéria seca dos órgãos da planta, obtidos em lisímetros. O modelo estimou adequadamente os valores de índice de área foliar durante todo o ciclo da cultura e acúmulo de matéria seca nas folhas, caules e raízes, durante o estágio vegetativo, apesar de não estimar bem a variação no acúmulo de matéria seca nos grãos. O valor de matéria seca final nos grãos foi superior apenas 9,8% ao valor observado experimentalmente.

Costa & Barros (2001) também utilizaram modelo mecanístico de simulação do crescimento, desenvolvimento e rendimento para a cultura do milho em Pernambuco, PE. O modelo foi baseado em dados meteorológicos para estimar a produção de matéria seca, índice de área foliar e rendimento da cultura, sendo testado com dados obtidos em experimentos de campo. O modelo mostrou-se adequado na simulação do índice de área foliar, acúmulo de massa seca do caule, das folhas, das raízes, da matéria seca total e do rendimento da cultura, obtendo um ajustamento de 88% entre os dados simulados e observados no que se refere ao rendimento de grãos. Através da análise de sensibilidade, encontrou-se alta sensibilidade aos parâmetros de eficiência fotossintética e respiração de manutenção.

Figueredo Júnior (2004) propôs um modelo mecanístico para a estimativa do rendimento de grãos de milho para o estado de São Paulo com base nos valores mensais de temperatura, radiação solar e chuva; foi possível identificar as restrições quanto à deficiência hídrica, temperatura, radiação solar, rendimento potencial e rendimento de grãos de milho espacializadas, segundo os municípios paulistas.

Peiter & Chaudhry (1998) utilizaram o modelo de simulação de Stockle & Campbell (1985) para simular a previsão de produção de milho submetido a diferentes níveis de manejo de irrigação. Os autores concluíram que o modelo apresentou uma aceitável estrutura de rotinas para a previsão da produção da matéria seca total de milho quando a cultura foi submetida a diferentes níveis de manejo de rega, podendo ser utilizado para avaliação das conseqüências produtivas e econômicas.

### 2.1.6.2 Modelagem e simulação na cultura do feijão

Uma ferramenta importante para descrever o processo evolutivo da cultura do feijoeiro é a construção de modelos matemáticos e a simulação dos mesmos. Isto possibilita o estudo de sistemas reais complexos, os quais exigem modelos com integração coerentes, banco de dados contendo informações experimentais e edafo-climáticas, além da previsão do potencial genético de cada variedade, isto é, permite-se prever as produtividades de variedades previamente calibradas em ensaios de campo em alocações em vários ambientes.

Alguns modelos que vêm sendo estudados podem ser descritos à seguir:

O modelo CROPGRO pertence ao programa DSSAT e simula o crescimento diário de uma leguminosa. Este modelo foi criado incorporando características do SOYGRO (WILKERSON et al. 1983, 1985), PNUTGRO (BOATE et al., 1987) e BEANGRO (HOOGENBOOM et al., 1990, 1994). Vários trabalhos vêm utilizando este modelo, tais como: Oliveira (2007) que utilizou para estimar a data de semeadura e a produtividade do feijoeiro em Viçosa, MG. Dalacort et al. (2005) utilizaram o modelo na determinação das melhores épocas de semeadura da cultura do feijão para a região de Maringá, Estado do Paraná. Bastos et al. (2002) adaptaram o modelo CROPGRO para a simulação do crescimento de plantas de feijão caupi. Após calibração, esses autores avaliaram a capacidade do modelo em simular a fenologia, a produtividade de grãos e os componentes de produção sob diferentes práticas de manejo para o Piauí. Heinmann et al. (2000) também avaliaram o manejo da irrigação, do feijoeiro sob pivô central, usando simulações com esse modelo. Mais tarde, Heinmann (2000) determinou a necessidade de irrigação pela cultura do feijoeiro no nordeste da Bacia do Rio Tibagi, no Estado do Paraná, utilizando o CROPGRO associado a um sistema de informações geográficas para regionalizar as informações.

De acordo com Faria et al. (1997), o modelo BEANGRO V 2.02 (HOOGENBOOM et al., 1994) constituiu-se de um modelo mecanístico e determinístico que simula, entre vários parâmetros, a duração dos estágios vegetativos e reprodutivos, acúmulo de biomassa e produção de grãos para uma cultivar específica, em função de diferentes tipos de solo, condições climáticas e práticas de manejo. Faria et al. (1997) obtiveram coeficientes genéticos para duas

cultivares de feijoeiro, utilizando o modelo BEANGRO para testar sua performance em simular a fenologia, produção de matéria seca e grãos da cultura sob diferentes condições ambientais em Londrina, PR.

O modelo ISAREG desenvolvido por Teixeira & Pereira (1992) foi utilizado para simular o balanço hídrico do solo para o planejamento de irrigação para uma dada combinação de clima-cultura-solo e para avaliação de projetos de irrigação já estabelecidos. Jobim (2007) utilizou o modelo para quantificar a demanda de irrigação suplementar e o rendimento de grãos de feijão ocorridos na safra e safrinha.

Robaina (1992) fez estudo experimental e de simulação numérica da aplicação de água na produção da cultura do feijoeiro, onde estudou a eficiência da aplicação de água sob diferentes estratégias de irrigação com a utilização de modelos matemáticos, adequando uma metodologia para ser utilizada no gerenciamento de áreas irrigáveis, em especial naquelas com disponibilidade de água limitada.

Rosse & Vencovsky (2000) avaliaram um modelo de regressão não-linear aplicado ao estudo da estabilidade fenotípica de genótipos de feijoeiro no estado do Paraná. Plá & Lopes (1998) estimaram o crescimento e a produtividade da cultura do feijão em diferentes regiões de Minas Gerais, por meio do modelo matemático-fisiológico desenvolvido por Miglioranza (1992).

Pimenta et al. (1999) desenvolveram um modelo matemático para estimar o acúmulo de matéria seca no feijoeiro cultivar IAC-Carioca. Para calibrar o modelo foram utilizados dados de um experimento conduzido na ESALQ, USP, em Piracicaba, através de coletas para análise de crescimento (estádios fenológicos V3, V4, R5, R7 e R8 – Fancelli, 1992) e colheita (estádio fenológico R9 – Fancelli, 1992). O modelo do co-seno foi proposto para prever a variação temporal diária da massa de matéria seca relativa total ( $Wr_t$ ) da parte aérea da planta e massa de matéria seca de folha. Os autores concluíram que o modelo sugerido pode ser utilizado para representar a variação temporal do acúmulo de matéria seca, bem como para prever as épocas do florescimento e do ponto de maturidade fisiológica da cultura de feijão.

### 2.1.6.3 Parâmetros de solo para modelagem das culturas

O solo é um sistema complexo, constituído de materiais sólidos, líquidos e gasosos (REICHARDT, 1990). Sua principal função é servir de sustentação para a planta e suprir o requerimento das mesmas, quanto à água, nutrientes, calor e ar. A fase sólida é constituída principalmente pelas partículas que compõem a matriz do solo, tais como, partículas minerais e orgânicas de diferente composição mineralógica e química; a fase líquida é constituída principalmente pela água e a fase gasosa pelo ar e vapor de água (CARLESSO & ZIMMERMANN, 2000).

Estes autores destacaram que, a inter-relação das partículas do solo em função do tamanho, da disposição e da forma dessas partículas, juntamente com a fase líquida do solo, determina a retenção de água e a composição do ar do solo, ocasionando o movimento de água no solo e a extração pela planta.

A máxima produtividade, devido aos fatores de solo, é atingida, quando ocorre um equilíbrio entre as fases, sólida, líquida e gasosa.

Em termos de modelagem dos parâmetros de solo para o crescimento, desenvolvimento e produção das culturas, destacou-se alguns processos, escritos a seguir.

#### 2.1.6.3.1 Balanço de água no solo

O conhecimento de como as plantas utilizam a água no solo e de como respondem aos níveis de armazenagem a partir do balanço hídrico, pode ser uma saída viável para o estabelecimento de estratégias eficazes de manejo visando ao melhor uso possível das reservas de água no solo pelas culturas. O movimento cíclico da água na lavoura começa com a sua penetração no solo por meio da infiltração, continua com seu armazenamento temporário na zona do sistema radicular e termina com sua remoção do solo por meio da drenagem, da evaporação e da absorção pelas raízes (HILLEL, 1970).

De acordo com Libardi (1995), para se efetuar o balanço hídrico de uma cultura é necessário, contabilizar as entradas de água no solo via precipitação

pluvial ou irrigação, a partir da sua infiltração na superfície, e as saídas, representadas pela drenagem interna, evapotranspiração e deflúvio superficial num volume de solo, com base na configuração do sistema radicular da cultura em estudo, em determinado período de tempo; se a quantidade de água que entra no tempo considerado for maior que a quantidade que sai durante o mesmo período, o saldo será positivo e, caso contrário, será negativo. Tanto o saldo positivo como o negativo serão medidos pela variação de armazenagem de água no perfil do solo no período considerado.

A equação que representa matematicamente o balanço hídrico de uma cultura é dada por:

$$\Delta h = P + I \pm D - ETo \pm R \quad [2.0]$$

Onde:  $\Delta h$  é a variação da armazenagem de água;  $P$  é a precipitação;  $I$  é a irrigação;  $D$  é a drenagem interna;  $ETo$  é a evapotranspiração e  $R$  é o escoamento superficial.

Os componentes do balanço hídrico são expressos em dimensões lineares (L), normalmente em milímetros (mm) de água, e estão representadas esquematicamente na Figura 2.4.

Ainda, para uma descrição quantitativa da variação do conteúdo da água no solo utiliza-se universalmente a equação da conservação de massa, expressa em Rose (1966), por:

$$AS = P + I - R - (ES + TR) \pm Qz \quad [2.1]$$

Na qual, segundo Ferraz (1972), a variação da quantidade de água ( $\Delta h$ ) em um solo cultivado, é determinada pela soma algébrica das quantidades recebidas nos processos de precipitação ( $P$ ), de irrigação ( $I$ ) e ascensão capilar ( $+ Qz$ ) e perdas nos processos de escoamento superficial ( $R$ ), evaporação do solo ( $ES$ ), extração de água pelas raízes das plantas ou transpiração real ( $TR$ ) e drenagem profunda ( $Qz$ ).

Os componentes  $P$ ,  $I$ ,  $R$  e  $ES$  são governadas pelas condições da atmosfera e parcialmente pelas condições da superfície do solo.

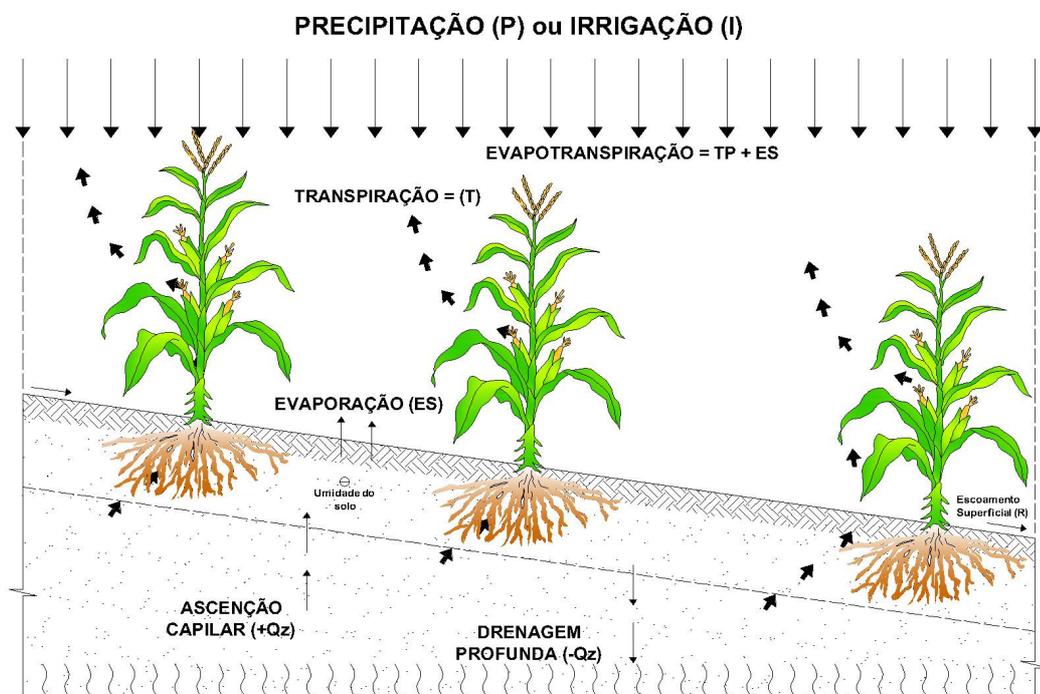
As componentes  $\pm Q_z$ , que não ocorrem simultaneamente, são determinadas pelas características internas do solo e pelo contorno inferior do volume de solo.

A componente  $TR$  é regida pelas condições da atmosfera, capacidade da planta na extração da água e condições físicas e hidráulicas do solo.

A variação do conteúdo da água no solo, durante um intervalo de tempo  $dt$ , em um volume de solo, compreendido entre os planos horizontais  $Z_0$  e  $Z_1$ , pode ser determinado integrando-se as variações de umidade ( $d\theta$ ) em relação à profundidade e ao tempo:

$$AS = \int_{t_1}^{t_2} \int_{z_0}^{z_1} (d\theta / dt) \cdot dz \cdot dt \quad [2.2]$$

Onde:  $\theta$  é o conteúdo em volume de água no solo (umidade volumétrica),  $t$  o tempo,  $z$  a profundidade e os subscritos 0 e 1, representam a superfície do solo e a profundidade do solo considerada para o balanço hídrico, respectivamente.



**Figura 2.4** – Representação esquemática dos componentes do balanço de água no solo (adaptado de ROBAINA, 1992).

O solo funciona como um reservatório de água e seu limite máximo de retenção após drenagem livre é a capacidade de campo ( $C_c$ ) e o limite mínimo, o ponto de murcha permanente (PMP) (MANTOVANI et al.,2006). O conceito de balanço hídrico avalia o solo como um reservatório fixo, no qual a água armazenada até o máximo da capacidade de campo, somente será removida pela ação das plantas (THORNTHWAITE, 1948).

#### 2.1.6.3.2 Movimento de água no solo

O movimento da água no solo pode ocorrer por influência de diferentes forças. Em solos muito saturados e com presença de pequenos canais a água pode escoar com certa facilidade, movimentada basicamente pelas forças gravitacionais (percolação). Para solos apenas saturados a tensão superficial da água contida nesses pequenos canais poderá exceder a força gravitacional e provocar movimentos ascendentes (capilaridade). Em solos não saturados as forças gravitacionais e a tensão superficial não são significativas para o movimento da água, porque não há massa suficiente para preencher os canais. A água acaba sendo então absorvida pelas partículas de solo e também passando de partícula para partícula, devida à diferença de teor de umidade entre elas. Esse processo é chamado de difusão. O potencial matricial é o resultado da ação das forças capilares e de adsorção, devido à interação entre a água e as partículas sólidas, que é função da matriz do solo. Estas forças atraem e "fixam" a água no solo, diminuindo sua energia potencial com relação à água livre. São fenômenos capilares que resultam da tensão superficial da água e de seu ângulo de contato com as partículas sólidas. Cada solo apresenta uma relação entre a umidade volumétrica e o potencial matricial, característica determinada pela textura e estrutura do solo (REICHARDT, 1990).

A água no estado líquido move-se sempre que existirem diferenças de potencial hidráulico  $H$  nos diferentes pontos dentro do sistema. Este movimento dá-se no sentido de decréscimo do potencial  $H$  isto é, a água sempre se move de pontos de maior potencial para pontos de menor potencial (REICHARDT, 1990).

O potencial total da água no solo pode ser separado em diversos componentes, pela expressão (REICHARDT, 1990):

$$H = \psi_p + \psi_g + \psi_{os} + \psi_m \quad [2.3]$$

Em que  $H$  é o potencial total da água no solo,  $\psi_p$  o potencial de pressão,  $\psi_g$  o potencial gravitacional,  $\psi_{os}$  o potencial osmótico, e  $\psi_m$  o potencial matricial.

Na equação (2.3) todos os componentes têm dimensão linear (L).

Salienta-se ainda que,  $\psi_p$  e  $\psi_m$  não ocorrem simultaneamente e que para a maioria dos solos não salinos, o  $\psi_{os}$  desprezado, reduzindo-se a equação (2.3) para:

$$H = \psi_p + \psi_g + \psi_m \quad [2.4]$$

A componente de pressão só é considerada para pressões relativas, positivas, (solo saturado) e para pressões relativas negativas (tensões), considera-se a componente matricial.

$$H = \psi_m + z \quad [2.5]$$

Sendo  $z$  a coordenada vertical de posição (componente gravitacional), medida a partir de uma referência de posição, normalmente a superfície do solo, e  $\psi_m$  é medida por meio de tensiômetros no campo, e instrumentos de pressão e/ou tensão em laboratório.

A equação para determinação do fluxo de água através de um meio poroso saturado, desenvolvida por Darcy apud Libardi (1995), pode ser escrita na forma unidimensional como:

$$q_s = -k_s \frac{\partial H}{\partial z} \quad [2.6]$$

Na qual  $q_s$  é o fluxo de água em condição de solo saturado ( $LT^{-1}$ )  $H$  o potencial total da água no solo (L) e  $z$  a coordenada de posição (L).

Para fluxo não saturado, essa propriedade se torna função da unidade volumétrica ( $\theta$ ) do solo, de modo que a equação (2.6) é reescrita.

$$q = -k(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \quad [2.7]$$

Sendo que o fluxo da água em condições de solo não saturado,  $K(\theta)$  a condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica ( $\theta$ ) e  $\frac{\partial H}{\partial z}$  gradiente de potencial total da água no solo na direção vertical  $z$ .

Além da equação de Darcy, o fluxo da água através de um meio poroso deve obedecer também a Lei de Conservação da Massa, expressa pela equação da continuidade na forma unidimensional, por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad [2.8]$$

Em  $t$  é o tempo ( $T$ )

Se a equação (2.7), for substituída na (2.8), obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right] \quad [2.9]$$

Que com o auxílio da equação (2.5) produz:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(\theta) \left( \frac{\partial H}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad [2.10]$$

Conhecida como equação de Richards, expressa na forma unidimensional vertical.

Para a solução da equação (2.8), deve-se conhecer a relação funcional entre potencial matricial ( $\psi_m$ ) e umidade volumétrica ( $\theta$ ), conhecida como curva característica da água no solo (RICHARDT, 1985) e a relação funcional da condutividade hidráulica  $K(\theta)$  e a umidade ( $\theta$ ) ou potencial matricial ( $\psi_m$ ).

### 2.1.6.3.3 Extração de água no solo

De acordo com Dalmago (2004), a extração de água do solo é o processo que resulta da interação de fatores do sistema solo-planta-atmosfera. Por isso a separação da contribuição de cada componente do conjunto é muito difícil, pois, além de atuarem ao mesmo tempo, são interdependentes em maior ou menor grau, de acordo com a escala de variação de um ou de outro fator.

Os hábitos radiculares são modificados por diversos fatores, ligados ao solo, a planta e ao próprio clima. Porto (1993) cita que a quantidade de água do solo utilizada pelas plantas depende de quatro fatores: (i) da demanda evaporativa da atmosfera; (ii) da habilidade da planta em regular o fluxo de água através do sistema radicular até a parte aérea; (iii) da exploração das reservas de água do subsolo pelo sistema radicular e (iv) da condutividade hidráulica do solo.

De acordo com Ludlow & Muchow (1990) a redução no conteúdo de água no solo causa significativa variação na distribuição e desenvolvimento radicular, podendo mudar o período de disponibilidade e a quantidade de água disponível para as plantas. Desta forma, a extração de água é influenciada pela distribuição geométrica das raízes viáveis e da disponibilidade de água no solo, sendo que nem toda a água que o solo armazena é disponível as plantas (CARLESSO, 1995).

A planta determina a velocidade de extração de água do solo, a qual é variável ao longo do tempo em função do crescimento da área foliar e do sistema radicular. Já, o controle da taxa de extração é feito pela demanda evaporativa da atmosfera, que é função das condições meteorológicas, as quais apresentam grande variabilidade espaço-temporal (DENMEAD & SHAW, 1962; FORSYTHE, 1967).

O modelos utilizados para descrever a dinâmica da água no contato solo-raiz e absorção pelas plantas, podem ser classificados segundo Zhuang et al. (2001) em duas categorias. O modelo microscópico, que considera o fluxo individual das raízes, dando ênfase ao efeito das propriedades do solo na absorção de água e o modelo macroscópico, em que o conjunto do sistema radicular é considerado como fator de extração de umidade de cada ponto da zona radicular.

Para Kramer & Boyer (1995), nos dois casos, o controle da absorção de água é realizado pela taxa de transpiração, que tende a ser semelhante à absorção, principalmente nas altas taxas, quando a água para o crescimento pode ser

desconsiderada (BRUNINI & THURTELL, 1998). Porém, o aumento da taxa de transpiração reduz a eficiência de extração de água pelas raízes, devido aos elevados gradientes de potencial formados entre camadas de solo e entre o solo e as raízes condição que é verificada em alta demanda evaporativa da atmosfera (DENMEAD & SHAW, 1962).

#### 2.1.6.4 Parâmetros de clima para modelagem das culturas

O ambiente juntamente com o componente genético, são os grandes responsáveis pelas mudanças fisiológicas e morfológicas das plantas, como crescimento, floração e senescência (HERMES et al., 2001).

De acordo com Fancelli & Dourado Neto (2000), os processos de fotossíntese, respiração, transpiração e evaporação, são funções diretas de energia disponível no ambiente, comumente designada por calor, ao passo que o crescimento, desenvolvimento e translocação de fotoassimilados encontram-se ligados à disponibilidade hídrica do solo, sendo que seus efeitos são mais pronunciados em condições de altas temperaturas onde a taxa de evapotranspiração é elevada.

Dentre os vários fatores envolvidos na produção de milho e feijão, o clima é praticamente incontrolável e pode influenciar sobremaneira na produtividade. As respostas interativas entre clima e planta necessitam ser adequadamente conhecidas e estudadas, para que se tenha o menor risco possível de insucesso.

##### 2.1.6.4.1 Temperatura

A temperatura do ar é um dos fatores determinantes nas mudanças dos estádios de desenvolvimento das plantas, sendo que para diversas espécies de interesse agrícola, a temperatura do ar é o principal elemento do ambiente condicionante do desenvolvimento, interferindo tanto na emissão de folhas quanto na mudança dos estádios fenológicos (HERMES et al., 2001).

Segundo Barbano et al. (2001), a temperatura influencia os processos fisiológicos dos vegetais, interferindo em cada subperíodo do ciclo dos vegetais. As plantas apresentam uma temperatura mínima abaixo da qual interrompem as suas atividades fisiológicas, uma faixa satisfatória de temperatura para o seu desenvolvimento adequado e uma temperatura máxima efetiva acima da qual a taxa respiratória supera a produção de fotoassimilados.

Para o desenvolvimento ideal da cultura do milho, as condições térmicas ideais são: (i) na ocasião da semeadura, inferior a 10°C e superior a 40°C (FANCELLI & DOURADO NETO 2000), sendo a temperatura ótima nesta fase fica entre 18 e 20°C (DOORENBOS & KASSAM, 1994); (ii) durante o crescimento e desenvolvimento das plantas, a temperatura do ar deverá girar em torno de 25°C, sendo que a floração necessita de temperaturas médias superiores a 26°C, o que acelera o desenvolvimento dessa fase, sendo que inferiores a 15,5 °C retarda a floração. Cada grau acima da temperatura média de 21,1, nos primeiros 60 dias após a semeadura, pode acelerar o florescimento dois a três dias. Temperaturas acima de 33 °C durante a polinização reduzem sensivelmente a germinação do grão de pólen; (iii) na fase de maturação, redução da temperatura abaixo de 15°C ocasiona retardamento na maturação do grão (FANCELLI & DOURADO NETO, 2000).

Em regime de elevadas temperaturas diurnas (superior a 35°C) e noturnas (superior a 24°C), a taxa de acúmulo de matéria seca nos grãos e a duração do período de enchimento são reduzidos (AFUAKWA et al., 1984). Muchow (1990) relata que o aumento da taxa de crescimento e a diminuição na duração do período de enchimento de grãos são causados pelo aumento da temperatura. De acordo com Didonet et al. (2002), quando os grãos de milho experimentam altas temperaturas durante a fase de acumulação de massa seca, a taxa efetiva de crescimento do grão é alta, resultando normalmente em grãos mais pesados. Ao contrário, quando a acumulação de massa seca nos grãos ocorre em temperaturas mais amenas, a taxa de crescimento efetiva do grão é menor, resultando em grãos mais leves. A elevação da temperatura contribui para a redução da taxa fotossintética líquida em função do aumento da respiração, interferindo diretamente na produção (FANCELLI & DOURADO NETO, 2000).

O método mais satisfatório para determinar as etapas de desenvolvimento da cultura leva em consideração as exigências calóricas ou térmicas, designadas como

unidades calóricas ( $^{\circ}\text{C}$ ), unidades térmicas de desenvolvimento (U.T.D.) ou graus-dia (GD) (FANCELLI & DOURADO-NETO, 1997). Estima-se a soma das unidades diárias de calor, a partir da emergência para o material genético atingir um determinado estágio, pela diferença entre a temperatura média diária e as temperaturas base mínima ou máxima exigidas pela espécie vegetal.

Para Prett (1992), o método dos graus-dia baseia-se na premissa de que uma planta necessita de uma certa quantidade de energia, representada pela soma de graus térmicos necessários, para completar determinada fase fenológica ou mesmo o seu ciclo total.

Tollenaar et al. (1979) verificaram que a caracterização da taxa de desenvolvimento no milho baseada na temperatura acumulada resultou da necessidade de se determinar a adaptabilidade dos genótipos para determinados locais e para prever as datas de floração e de colheita. As aplicações dos sistemas de unidades térmicas mais comuns pressupõe uma relação linear entre a taxa de desenvolvimento da planta e a temperatura acima de uma base específica.

A cultura de milho apresenta as seguintes exigências térmicas (GD), expressas em  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}$ , para o florescimento: (i) híbridos tardios: GD superior a  $890^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}$ ; (ii) híbridos precoces: superior a  $831^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}$  e inferior  $890^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}$ , e (iii) híbridos superprecoces: inferior a  $830^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}$  (FANCELLI & DOURADO-NETO, 1997).

Para Gadiolli et al. (2000) o conhecimento das exigências térmicas, desde a emergência ao ponto de maturidade fisiológica, é fundamental para a previsão da duração do ciclo da cultura em função do ambiente. Essas informações, associadas ao conhecimento da fenologia da cultura, podem ser utilizadas no planejamento para definição da época de semeadura, da utilização de insumos (fertilizantes, inseticidas, fungicidas e herbicidas, principalmente), da época de colheita (colheita de grãos ou momento de corte de milho para silagem).

Para o feijoeiro, a faixa de temperatura do ar ideal está próxima de  $29^{\circ}\text{C}$ , durante o dia, e de  $21^{\circ}\text{C}$  durante a noite (EMBRAPA, 2003). Maluf et al. (2001) coloca que, a temperatura média do ciclo ideal entre  $20$  e  $22^{\circ}\text{C}$ , sendo a temperatura ótima igual a  $21^{\circ}\text{C}$  e a temperatura máxima média do ciclo não pode ser superior a  $24^{\circ}\text{C}$ . Valores de temperatura máxima do ar entre  $30$  e  $40^{\circ}\text{C}$  causam danos às plantas (GONÇALVES et al., 1997; CARAMORI et al., 2001).

Dependendo do tempo em que a temperatura permanecer acima de  $30^{\circ}\text{C}$ , do valor máximo atingido e do número de dias consecutivos em que ocorrer essa

condição, os danos observados podem ser mais severos (BARBANO et al., 2001). Assim, sob condições de alta temperatura do ar, têm sido observadas reduções entre 30,7 e 75,5% na produtividade de grãos de feijão (MODA-CIRINO & FONSECA JÚNIOR (2001); AGUIAR & MODA-CIRINO (2002a); AGUIAR; MODA-CIRINO, (2002b).

Os principais danos causados por temperaturas do ar elevadas são: abortamento de flores e vagens, redução do número de grãos por vagem, crescimento vegetativo exagerado e grãos com menor massa seca, os quais afetam diretamente a produtividade (EMBRAPA, 2003).

Muitos autores, tais como Portes (1996), Gonçalves et al. (1997), Didonet; Madriz, (2002), Didonet et al. (2002), relatam que a alta temperatura do ar talvez seja o fator ambiental que exerça maior influência sobre a abscisão de flores e de vagens, o não-enchimento adequado de grãos, o vingamento e a retenção final de vagens no feijão, sendo também responsável pela redução do número de sementes por vagem e pela menor massa de sementes. Nos estádios de pré-floração (R5) e enchimento de vagens (R8), o feijão é mais afetado pela alta temperatura (SHONNARD e GEPTS, 1994). Mariot (1989) destaca que, normalmente, a taxa de abscisão dos órgãos reprodutivos atinge de 50 a 70% do total de flores abertas.

#### 2.1.6.4.2 Radiação solar

De acordo com Kunz et al. (2007), para o desenvolvimento e o crescimento vegetal na agricultura, a radiação solar é fundamental, uma vez que os processos fotossintéticos são dependentes desta. França et al. (1999) citam, que a quantidade de radiação incidente e a proporção da quantidade interceptada pelas plantas são determinantes fundamentais do rendimento.

A radiação solar intervém diretamente sobre o crescimento e o desenvolvimento da planta e indiretamente pelos efeitos no regime térmico, sendo fundamental à produção de biomassa. A luz é um dos mais importantes fatores determinantes da produtividade fotossintética da planta (ORTOLANI & CAMARGO, 1987).

Do total de radiação que chega na superfície do dossel de uma cultura, parte é refletida, parte é absorvida e parte é transmitida, atingindo o solo com diferentes níveis energéticos, que variam conforme a estrutura do dossel (NORMAN; e CAMPBELL, 1989).

O desenvolvimento da cultura do milho é muito afetado pela quantidade de radiação solar. As maiores produtividades são alcançadas em condições de altas radiações, em virtude de pertencer ao grupo de plantas "C4", o que lhe confere alta produtividade biológica (FANCELLI & DOURADO NETO, 2000). A cultura está entre as plantas que possuem maior eficiência de uso da radiação solar, com valor médio entre 64,5 a 69  $\text{mmol mol}^{-1}$ , enquanto outras espécies C4 apresentam valores em torno de 52,6 a 60,4  $\text{mmol mol}^{-1}$ . Esta maior eficiência é atribuída à anatomia foliar, por apresentar menor área entre as nervuras, o que previne a perda de CO<sub>2</sub> para o meio (HATTERSLEY, 1984).

A capacidade da planta em produzir matéria seca está diretamente relacionada com a energia luminosa disponível e com a capacidade de aproveitamento dessa energia. A eficiência da interceptação da radiação solar, depende da idade da planta, da arquitetura foliar, do arranjo espacial de plantas, e da população empregada, ao passo que a eficiência de conversão, depende principalmente da temperatura, do estado nutricional, e do equilíbrio hídrico das plantas (FIGUEIREDO JÚNIOR, 2004).

Uma relação ( $r^2 = 0,78$ ) entre a disponibilidade de radiação solar durante o período de crescimento e o rendimento final foi mostrada por Jong et al. (1982), sendo mais críticos os períodos reprodutivos e de enchimento de grãos. Vários autores, tais como Earley et al. (1966), mostraram que o decréscimo na radiação solar disponível às plantas de milho afetam o desenvolvimento das espigas, o número de grãos por espiga e o peso dos grãos.

A eficiência do uso da radiação interceptada, as condições de temperatura e status fisiológicos da cultura no período após o pendoamento determinarão as taxas de crescimento dela, o número potencial de grãos e conseqüentemente o potencial produtivo da planta (ANDRADE et al. 1993a, 1993b; OTEGUI & BOMNHOMME et al. 1998).

O feijoeiro, quando exposto à baixa quantidade de radiação solar apresenta decréscimo no índice de área foliar (IAF), o que contribui para uma menor área de interceptação de energia e interfere no metabolismo fisiológico da planta. Por outro

lado, em condições de exposição à alta radiação solar, os índices de área foliar são maiores, o que não significa que haverá aumento no rendimento da cultura, pois a produção de grãos está diretamente relacionada à eficiência fotossintética da cultivar (DIDONET & SILVA, 2004).

Portes e Silveira (1982) demonstraram que a diminuição de 100%; 79% e 6% da radiação fotossinteticamente ativa proporcionou decréscimo significativo do número de vagens e rendimento de grãos por planta de feijão comum das cultivares Gordo, Iguacu, Rico-23 e Carioca. Para Dionet & Silva (2004), quanto maior for a radiação solar disponível da emergência ao início do florescimento, maior será o número de vagens por unidade de área.

Regiões que apresentam valores de radiação solar entre  $13 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  e  $22 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  são consideradas ideais para o desenvolvimento do feijoeiro. Para esses autores, em condições de radiação solar acima de  $35 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , a taxa de fotossíntese do feijoeiro é praticamente constante (DIDONET & SILVA, 2004).

#### 2.1.6.4.3 Fotoperíodo

Fotoperíodo é definido como o tempo, durante as 24 horas do dia, em que o sol brilha (OMETTO, 1981). Além disso, o fotoperíodo também pode ser definido como o tempo em horas entre o nascer e o pôr do sol (GOUDRIAAN & Van LAAR, 1994). O fotoperíodo, em um determinado lugar é determinado pela latitude local, sendo a principal variável associada à influência da data de semeadura sobre a maturação.

Para Cruz et al. (2008) o fotoperíodo está entre os componentes climáticos que afetam a produtividade do milho, sendo representado pelo número de horas de luz solar, o qual é um fator climático de variação sazonal, mas que não apresenta muita variação de ano para ano.

Estes autores destacam ainda que, o milho é considerado uma planta de dias curtos, embora algumas cultivares tenham pouca ou nenhuma sensibilidade às variações do fotoperíodo. Um aumento do fotoperíodo faz com que a duração da etapa vegetativa aumente e proporcione também um incremento no número de

folhas emergidas durante a diferenciação do pendão e do número total de folhas produzidas pela planta.

Por ser uma planta de dias curtos, a ocorrência de dias longos, pode aumentar sua fase vegetativa e seu número de folhas. No entanto, em trabalhos recentes, foi demonstrado, que respostas ao fotoperíodo somente ocorrem em latitudes superiores a 33°C (FANCELLI & DOURADO NETTO, 1996).

Kiniry et al. (1983b) observaram que o milho é sensível ao fotoperíodo no período de quatro a oito dias antes da iniciação da inflorescência masculina, e também quando aproximadamente 30 a 50% do número total de folhas estão visíveis (TOLLERNAR & HUNTER, 1983). O período até a emissão da inflorescência masculina tem sido usado para estimar a área foliar total (HESKETH & WARRINGTON, 1989).

De acordo com Silva (2008), apesar de não haver comprovação científica, quanto a influência do fotoperíodo na duração do ciclo do feijoeiro, para cultivares utilizadas no Brasil, há provas desta influência na cultura.

Kornegay et al. (1993); White et al. (1996), citados por Silva (2008), verificaram, que conforme o genótipo, o ciclo do feijoeiro pode ser influenciado pela variação do fotoperíodo. A partir disso, classificaram o feijão conforme a resposta ao fotoperíodo em três grupos: neutro, intermediário e sensível, considerando a cultura como planta de dia curto.

Outros autores citados por Silva (2008), tais como Wallace e Yan (1998) criaram um modelo matemático baseado na interação genótipo x temperatura x fotoperíodo para calcular a duração dos subperíodos.

#### 2.1.6.5 Parâmetros de planta para modelagem das culturas

A vida de qualquer organismo começa por meio de um processo reprodutivo. Esse processo é seguido por um desenvolvimento vegetativo, incluindo o crescimento e a formação dos órgãos e, em seguida ocorre novamente o evento da reprodução originando a nova geração (LARCHER, 2000).

O crescimento é um aumento irreversível de tamanho, sendo consequência não apenas da divisão celular, mas, também, da distensão celular. Já o

desenvolvimento de uma planta é entendido como as modificações observadas na forma, bem como o estado de complexidade. Trata-se de um fenômeno qualitativo e ocorre ao mesmo tempo que o crescimento, se constitui em uma série de fenômenos que vão acontecendo enquanto a planta cresce e que culminam com a sua maturidade. O estudo sobre o crescimento e desenvolvimento vegetal é de suma importância para o manejo adequado uma vez que, estes processos estão associados às condições bióticas e abióticas que lhes são oferecidos.

Para Lucchesi (1987), um vegetal de interesse econômico como uma planta de cultivo anual em crescimento, apresenta diferentes fases. No início, como depende de reservas continuadas nas sementes, o crescimento é lento; posteriormente, após o desenvolvimento o sistema radicular e a emergência das folhas, a planta tem um rápido crescimento através da retirada de água e de nutrientes do substrato onde está e através de sua atividade fotossintética. Após atingir o tamanho definitivo, entra na fase de senescência, que resulta em um decréscimo no acúmulo de matéria seca.

A pequena taxa de crescimento inicial é atribuída ao menor número de células, à menor área foliar disponível para a interceptação da radiação solar e fotossíntese e, talvez, à maior percentagem de fotoassimilados destinada às raízes. Com o crescimento das plantas aumentam as regiões meristemáticas, e mais folhas estarão presentes para agir como fonte. Então, cada planta será capaz de capturar e utilizar mais energia, com este aumento de tamanho (CHARLES-EDWARDS, 1982).

Gregory (1926), citado por Lucchesi (1987), destaca que um vegetal anual, em condições ecológicas adequadas, ocupa, no período total de crescimento, em termos de porcentagem, 10 para germinar, 6 para emergir, 51 no grande período de crescimento, 15 para reprodução, 8 na maturação e 10 na colheita.

Portanto, durante o seu desenvolvimento, o vegetal ocupa, nas diferentes fases, diferentes períodos de crescimento e, conseqüentemente, seria de fundamental importância o conhecimento dos principais fatores externos e da própria planta, que poderiam afetar cada uma das fases até o final do ciclo da mesma (LUCCHESI, 1987).

#### 2.1.6.5.1 Índice de área foliar

De acordo com Muller et al. (2005) o índice de área foliar (IAF) pode ser definido como a razão entre a área foliar de uma população de plantas e a área de solo por ela ocupada. Para Pereira & Machado (1987), o IAF representa a capacidade que a comunidade tem para explorar o espaço disponível. A variação temporal da área foliar em geral aumenta até um limite máximo, no qual permanece por algum tempo, decrescendo em seguida, devido à senescência das folhas velhas. Como a fotossíntese depende da área foliar, o rendimento da cultura será maior quanto mais rápido a planta atingir o índice de área foliar máximo e quanto mais tempo a área foliar permanecer ativa.

O IAF ideal para a cultura do milho, situa-se ao redor de 5, no entanto, pode variar em função da variedade e do ambiente entre 3 e 8 (ANDRADE, 1991).

Para Warrington & Kanemasu (1983a) o desenvolvimento da folha do milho, caracterizados pela taxa de produção de novas folhas, pelo número total de folhas produzidas e pela duração da área fotossinteticamente ativa, é um importante processo no sistema de produção. A área foliar determina a quantidade de radiação interceptada e conseqüentemente, o crescimento, o desenvolvimento e a produção final da cultura (SINCLAIR, citado por DWYER & STEWART, 1986 e GUINSCHEM et al. 2001). Fatores como forma, densidade populacional e espaçamento entre linhas, afetam a distribuição da área foliar no dossel das plantas (STEWART et al., 2003).

A cultura do milho, a exemplo de outras gramíneas que não produzem afillhos, apresenta um aumento exponencial do IAF no período de instalação da cultura, linear e positivo até o pendoamento, seguido de uma variação linear e levemente negativa até o início da rápida senescência das folhas, quando o coeficiente é menor (MULLER et al., 2005).

Manfron et. al. (2003) desenvolveu um modelo para estimar o IAF conhecendo-se a estatura média das plantas. A variação temporal do IAF foi descrita em função da soma térmica. O IAF apresentou uma variação temporal descrita por uma função quadrática. Após ter atingido um ponto máximo de  $7,50 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ ;  $6,90 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  e  $7,10 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  para os híbridos F-5013, BR-206; P-4071, respectivamente, ocorreu decréscimo devido à senescência e queda de folhas.

No feijoeiro, o rendimento em grãos depende do IAF no florescimento. Um maior crescimento dos ramos resultará em aumento de área foliar, em maior interceptação de luz e, portanto, em maior produtividade, tanto de matéria seca quanto de grãos (JONES, 1971 & WHITE, 1988).

Bascur et al. (1985) destaca, que durante seu desenvolvimento, a atividade fotossintética aumenta com o crescimento da área foliar, até a sua expansão máxima. A redução na disponibilidade de água no solo para as plantas acelera a senescência das folhas, para reduzir o consumo de água (DAVIES & ZANG, 1991), podendo paralisar o crescimento foliar, causando efeito indireto no rendimento de grãos, pela redução da área foliar fotossinteticamente ativa (FANCELLI & DOURADO NETO, 1991; GUIMARÃES, 1996).

Gomes et al. (2000) em condições de irrigação, obtiveram valores máximos de IAF de  $7 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  para a cultivar Negro Argel,  $6,8 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  para a cultivar Carioca e  $8,6 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  para a cultivar A 320. Rubin (2003) trabalhando com a cultivar FT-Nobre em Santa Maria, RS, utilizando dois manejos de água (irrigado e com déficit), encontrou maiores valores de IAF de  $4,66 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  e  $4,09 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  para as plantas irrigadas e submetidas a déficit hídrico, respectivamente.

Outros autores, como Alvim & Alvim (1969) observaram valores de IAF de 1,4 a  $7,6 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  e Portes (1996) relatou valores experimentais de IAF variando de 0,75 a  $2,20 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  e de 0,80 a  $4,0 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ , respectivamente, durante o ciclo de cultivares de feijoeiro Carioca e Aporé.

#### 2.1.6.5.2 Produção de matéria seca

A produtividade biológica é comumente determinada pela produção de matéria seca total da planta, a qual está estritamente relacionada aos processos de fotossíntese e de respiração durante as fases vegetativa e reprodutiva das culturas (FANCELLI & DOURADO-NETO, 1999).

A fotossíntese é o processo através do qual as plantas transformam a energia solar em energia química, sendo que as plantas são transformadoras primárias de energia solar e a sua eficiência é fator determinante na produtividade agrícola (SANTOS & CARLESSO, 1998).

A respiração pode ser dividida, teoricamente, em respiração de crescimento e de manutenção. A respiração relacionada ao crescimento corresponde à quantidade de carboidratos necessária para suprir energia às reações de síntese de nova fitomassa, enquanto a respiração de manutenção corresponde à quantidade de carboidratos necessária para suprir energia aos processos biológicos e bioquímicos da planta sem haver, no entanto, crescimento (TAIZ & ZEIGER, 1991).

A captação de energia luminosa durante o crescimento das plantas e a redução do CO<sub>2</sub> atmosférico, através do processo fotossintético, resulta na formação de compostos orgânicos essenciais ao acúmulo de sua biomassa, bem como à formação de novos tecidos. Portanto, a quantidade de biomassa produzida pelas culturas pode ser definida através de uma estrutura fisiológica simples, baseada na quantidade de radiação solar interceptada e na sua eficiência de conversão em matéria seca (GARCIA et al., 2003).

Para Charles-Edwards (1982) nos estádios iniciais das culturas, o acúmulo de matéria seca por dia é baixo. Porém, à medida que a planta cresce o ganho de biomassa por dia aumenta e tende a se estabilizar ao final do ciclo. Garcia et al. (2003) citam que a variação temporal do acúmulo de biomassa seca pode ser representada por uma curva do tipo sigmoide.

Gomide et al. (2003) descreve este processo observando um crescimento exponencial lento, seguido de uma fase de ganhos lineares e finalmente, uma etapa onde os incrementos de biomassa decrescentes. Para estes autores, este modelo de curva decorre do balanço entre disponibilidade e demanda de carbono experimentado pela planta.

Todo e qualquer fator que interfira na fotossíntese irá afetar o acúmulo de matéria seca. Fatores como nutrição mineral, radiação e disponibilidade hídrica, interferem significativamente na fotossíntese. Dentre estes, a disponibilidade de água desempenha papel preponderante, pois, além de propiciar a entrada de CO<sub>2</sub>, ela promove o resfriamento do vegetal, interferindo, desta forma, na taxa de fotossíntese e de respiração (CHARLES-EDWARDS, 1982).

Para Castro & Kluge (1999) estima-se que 90% da matéria seca provenha da fixação de CO<sub>2</sub>. Os autores destacam que a cultura do milho é extremamente eficiente na transformação de energia luminosa e de carbono proveniente de CO<sub>2</sub> em carbono orgânico pela fotossíntese.

De acordo com Salisbury (1992), o milho, por ser uma planta tipo C4, apresenta características fisiológicas favoráveis no que se refere a conversão de carbono mineral (representado pelo gás carbônico da atmosfera) em compostos orgânicos como carboidratos. Isto ocorre porque no processo fotossintético, destas plantas, o CO<sub>2</sub> é continuamente concentrado nas células da bainha vascular das folhas e, em seguida, redistribuído para posterior utilização.

Este autor relata ainda, que a principal diferença fisiológica entre as plantas que apresentam fotossíntese C3 e C4 está relacionada ao processo de fotorrespiração. As plantas de fotossíntese C3 perdem 20 a 50% do carbono fixado devido a fotorrespiração, enquanto as plantas com fotossíntese C4, como o milho, não apresentam perdas mensuráveis de CO<sub>2</sub>.

O feijoeiro produz nos primeiros 20 dias após a emergência (DAE) apenas 5% da fitomassa seca total. Entre o 30 e 50 DAE, as plantas crescem rapidamente, diminuindo a taxa de crescimento a partir desse ponto. A diminuição brusca na fitomassa aos 50 DAE é devido à senescência das plantas (HAAG et al., 1967; MAFRA et al., 1974).

A produção de hastes é fundamental para garantir uma melhor distribuição das folhas para maior interceptação de radiação solar; já a de folhas apresenta importância prática devido à correlação com alguns processos importantes, bem como permite verificar alguns critérios de aferição de manejo (FANCELLI, 1994).

Segundo Gomes et al. (2000), o acúmulo preferencial de matéria seca é nas folhas, depois nos ramos, seguindo-se os legumes, seguindo uma tendência de translocação. Outro fato que concorre para isso é a intensificação da senescência de folhas a partir do florescimento.

A densidade de semeadura (BRANDES et al., 1972), a época de plantio (XAVIER, 1976) e o manejo da irrigação (TELES NETO, 2001) são fatores relevantes quando se analisa o crescimento do feijoeiro, sendo encontradas máximas taxas de acúmulo de matéria seca entre 30 e 50 DAE.

A análise da variação temporal do acúmulo de biomassa pode ser utilizada como instrumento visando a descrição clara do padrão de crescimento da planta ou de partes dela, permitindo comparações entre situações distintas, podendo ser aplicada às mais diversas modalidades de estudos (LIEDGENS, 1993).

### 2.1.6.5.3 Produção de grãos

A produção de grãos da cultura do milho é função direta de uma série de caracteres que são denominados de componentes de produção, como é o caso da prolificidade ou número de espigas por planta, peso médio do grão, número de fileiras de grãos na espiga e número de grãos por fileira, comprimento e diâmetro da espiga e profundidade do grão, que se refere à diferença entre os valores dos diâmetros de espiga e de sabugo (BENTO, 2006).

O rendimento do milho é caracterizado pelo número de espigas por planta e pelo número de grãos por espiga, sendo estes os principais componentes da produção. Segundo Cirilo & Andrade (1994ab) o número de grãos por espiga no milho dependerá das condições fisiológicas da planta no florescimento; no entanto, as condições climáticas durante o período de enchimento de grãos podem afetar a produção e a alocação de fotoassimilados para a formação dos grãos. Já o número de espigas por planta de milho é determinado, geralmente, pelo suprimento de carboidratos e nitrogênio próximo ao florescimento (LAFITTE & EDMEADES, 1995).

De acordo com Dourado Netto et al. (2002) o número de grãos por planta é influenciado por eventos ocorridos entre a emissão da quarta e da décima folha, além daqueles evidenciados no florescimento (fecundação). O maior número de grãos possíveis é função da população e do número de espigas por planta (prolificidade). A quantidade de fotoassimilados disponíveis para esses grãos é um importante fator para o rendimento. Autores como Tolenaar & Daynard (1978) e Schoper et al. (1982) destacam que o rendimento de grãos é limitado, principalmente pela capacidade de suprimento de assimilados pela fonte produtora, enquanto outros (MAGALHÃES & JONES, 1990a, 1990b) consideram a capacidade dos grãos em armazenar os fotoassimilados disponíveis como causa limitante ao rendimento de grãos.

Em média, o desenvolvimento do grão se completa cerca de 50 a 55 dias após a fertilização. Esse período pode variar entre cultivares e dentro de uma mesma cultivar, sendo que, os fatores ambientais também induzem pequenas variações. A relação fonte-dreno da planta pode determinar a duração desse período, ou seja, a quantidade de fotoassimilados disponíveis (fonte) e a capacidade da espiga (dreno) em acomodar esses fotoassimilados. Para Magalhães; Jones

(1990a, 1990b) a capacidade dos grãos (dreno) em alocar e utilizar o fotoassimilados produzidos (fonte) e as inter-relações entre esses fatores determinam o potencial de rendimento da cultura do milho.

Os componentes primários de produção da cultura do feijão compreendem: número de plantas por área, número de vagens por planta (ou área), número de grãos por vagem e peso do grão. Este conjunto de caracteres tem mostrado diferenças de resultados para cada cultivar. Os resultados de várias pesquisas mostraram que os caracteres apresentaram efeitos diretos positivos sobre a produção de grãos por planta, sendo considerados como os mais importantes na seleção de plantas para aumento da produção de grãos (OLIVEIRA et al., 2003). O número de plantas por área é o que apresenta maior possibilidade de controle através do manejo; o número de grãos por planta ou área é o componente mais importante quando se busca aumentos no rendimento de grãos. Isto se deve a grande faixa de variação que pode ser obtida neste componente. A quantidade de grãos é dependente da quantidade de flores produzidas e fixadas durante o período reprodutivo da cultura.

A cultura do feijoeiro, em virtude do crescimento da haste principal e dos ramos laterais, quanto maior o crescimento dos ramos maior a área foliar, maior interceptação de luz e, conseqüentemente, maior a produtividade de fitomassa seca e de grãos (JONES, 1971). O número de ramos laterais e suas características influenciam diretamente a arquitetura da planta e o potencial de rendimento de grãos, conforme observado por Santos & Araújo (2000).

Rezende et al. (2002) testando uniformidade de aplicação de água para a cultivar de feijão lapar, encontraram médias de número de vagens por planta igual a 10, número de grãos por vagem de 6,1 e massa do grão de 0,22 g.

De acordo com Donald & Hamblin (1976), o rendimento de grãos das culturas, ou o índice de colheita (IC), pode ser definido como o produto do número de grãos por planta, a população de plantas por área e a massa de cada grão, no caso de rendimento de grãos, ou o produto acima dividido pelo total de matéria seca produzida, no caso do IC.

O índice de colheita (IC) e produtividade de grãos se refere à fração de matéria seca do órgão de interesse (grãos) colhida, em relação à matéria seca total. Conforme dados relatados por Doorenbos & Kassam (1994), o índice de colheita do milho (grãos) varia de 0,35 a 0,65, e o valor de 0,5 é considerado satisfatório. Para

Mundstock & Silva (1989), as variações observadas no índice de colheita das cultivares de milho, estão diretamente associadas a capacidade de cada genótipo de translocar os fotoassimilados para os grãos. De acordo com Snyder & Carlson (1984) o índice de colheita do feijoeiro varia de 0,39 a 0,58, dependendo da cultivar plantada.

### 2.1.7 Produção potencial das culturas

Para Wolschick et al. (2007) as plantas apresentam órgãos especializados (raízes e órgãos aéreos) para explorar as condições ambientais. Os órgãos aéreos utilizam a energia solar para realização da fotossíntese e produção de metabólitos, enquanto as raízes ancoram as plantas no solo e absorvem água e nutrientes minerais da solução do solo que, juntamente com os metabólitos, serão utilizados para o desenvolvimento e o crescimento das plantas.

Para estes autores, os fatores de produção que se encontram acima da superfície do solo, como luz, temperatura e dióxido de carbono não são controláveis sob condições de campo, enquanto os fatores que se encontram abaixo da superfície do solo, como água e nutrientes, podem ser alterados por meio de irrigações e adubações. Nos modelos de produção potencial da cultura considera-se que a planta cresce sob nenhuma restrição hídrica ou nutricional e que os fatores de produção aéreos definem o crescimento e a produção das plantas.

A produção potencial das culturas é definida por vários autores. Villa Nova; Barbieri (1991) colocam, que em condições sem falta de água ou nutrientes, e sem ocorrência de pragas ou doenças, a produção vegetal é chamada de produção potencial, e é, para uma dada variedade, determinada apenas pelos fatores climáticos radiação solar, fotoperíodo e temperatura do ar.

Para Doorenbos & Kassam (1994) entende-se por produção potencial de uma cultura por unidade de área obtida por um genótipo amplamente conhecido e bem adaptado ao respectivo ambiente, em condições (durante todo o ciclo) de adequado suprimento de água e nutrientes, e sem sofrer limitações por fatores externos tais como pragas e doenças.

Affholder et al. (1997) definem ainda que a produção potencial como aquela que é obtida considerando-se os fatores do meio físico sobre os quais não se tem possibilidade de ação, principalmente os relacionados ao clima; os outros fatores determinantes (fertilidade do solo, material genético etc.) são fixados em níveis não limitantes. Estes autores também confirmam que em geral, somente alguns fatores climáticos são levados em consideração no cálculo da produção potencial, principalmente em função de sua variabilidade na região específica que está sendo estudada.

## 2.2 Material e Métodos

Este capítulo diz respeito à descrição do modelo físico experimental, abordando os dados de solo, clima e planta coletados ao longo do ciclo das culturas de milho e feijão e os valores de produção de grãos e matéria seca coletados ao final do ciclo das mesmas.

Descreve também o modelo matemático utilizado para a simulação da produção das culturas em estudo, levando em consideração os dados obtidos no experimento de campo, necessários para calibração e teste do modelo matemático. Além da aplicação do modelo para outras condições não contempladas no campo.

### 2.2.1 Modelo físico experimental

O experimento foi conduzido no município de Santiago, RS (29°09'50" de latitude sul e 54°51'32" de longitude oeste) em área experimental da Fazenda Liberdade localizada no 4º distrito Tupantuba.

O modelo físico utilizado para calibrar e testar o modelo matemático foi constituído de seis estratégias de irrigação nas culturas de milho e feijão, distribuídas em sistema de irrigação por aspersão convencional.

#### 2.2.1.1 Descrição da cultivar de milho

Foi utilizada a cultivar de milho (*Zea mays*, L.) Pioneer 32R22 desenvolvido pela Pioneer Sementes onde foram utilizadas as práticas culturais no que se refere ao preparo do solo, adubação (conforme recomendação de fertilidade do solo para o Estado do Rio Grande do sul, Comissão...,2004), época de semeadura, controle de pragas e doenças.

A semeadura foi realizada no mês de dezembro/2008, utilizando-se uma população de plantas de 72.000 plantas/ha. No sulco de plantio foram incorporados

350 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato triplo (SFT), em formulação comercial. Como adubação de cobertura aplicou-se 86 kg.ha<sup>-1</sup> de nitrogênio (N), parcelada em duas aplicações, sendo aos 30 dias após a emergência (DAE) e aos 45 DAE.

### 2.2.1.2 Descrição da cultivar de feijão

Foi utilizada a cultivar de feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris*, L.) IPR88 Uirapuru desenvolvido pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), onde foram utilizadas as práticas culturais no que se refere ao preparo do solo, adubação (conforme recomendação de fertilidade do solo para o Estado do Rio Grande do sul, Comissão...,2004), época de semeadura, controle de pragas e doenças.

A semeadura foi realizada no mês de dezembro/2008, utilizando-se uma população de plantas de 240.000 plantas/ha. No sulco de plantio foram incorporados 250 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato triplo (SFT), em formulação comercial. Como adubação de cobertura aplicou-se 50 kg.ha<sup>-1</sup> de nitrogênio (N), parcelada em duas aplicações, sendo aos 30 dias após a emergência (DAE) e aos 45 DAE.

### 2.2.2 Irrigação

Utilizou-se um sistema de aspersão convencional, constituído por uma linha principal medindo 60 m e sete linhas laterais fixas medindo 24 m cada uma, ambos de PVC e diâmetro de 50 mm. O espaçamento das linhas laterais foi de 12 m, interligadas com engate rápido. Os aspersores foram conectados a essas linhas com espaçamento de 12 m e altura de 1,5 m para a cultura do feijão (em relação ao solo) 2 m para a cultura do milho (em relação ao solo).

Os aspersores utilizados foram da marca NAAN, modelo 5022, giro completo, os quais apresentavam diferentes bocais para cada linha lateral, sendo: 4,0 mm x 2,5 mm; 3,5 mm x 2,4 mm; 3,2 mm x 2,5 mm; 3,0 mm x 2,5 mm; 2,8 mm x 2,3 mm e 2,5 mm x 2,5 mm, com a finalidade de distribuir diferentes lâminas de irrigação.

Na figura 2.5 pode-se observar a distribuição do sistema de irrigação nas culturas de milho (variedade Pioneer 32R22), soja 1\* (variedade de soja AL 55), soja 2\* (variedade de soja CODETEC 219) e feijão (variedade IPR88 Uirapuru).

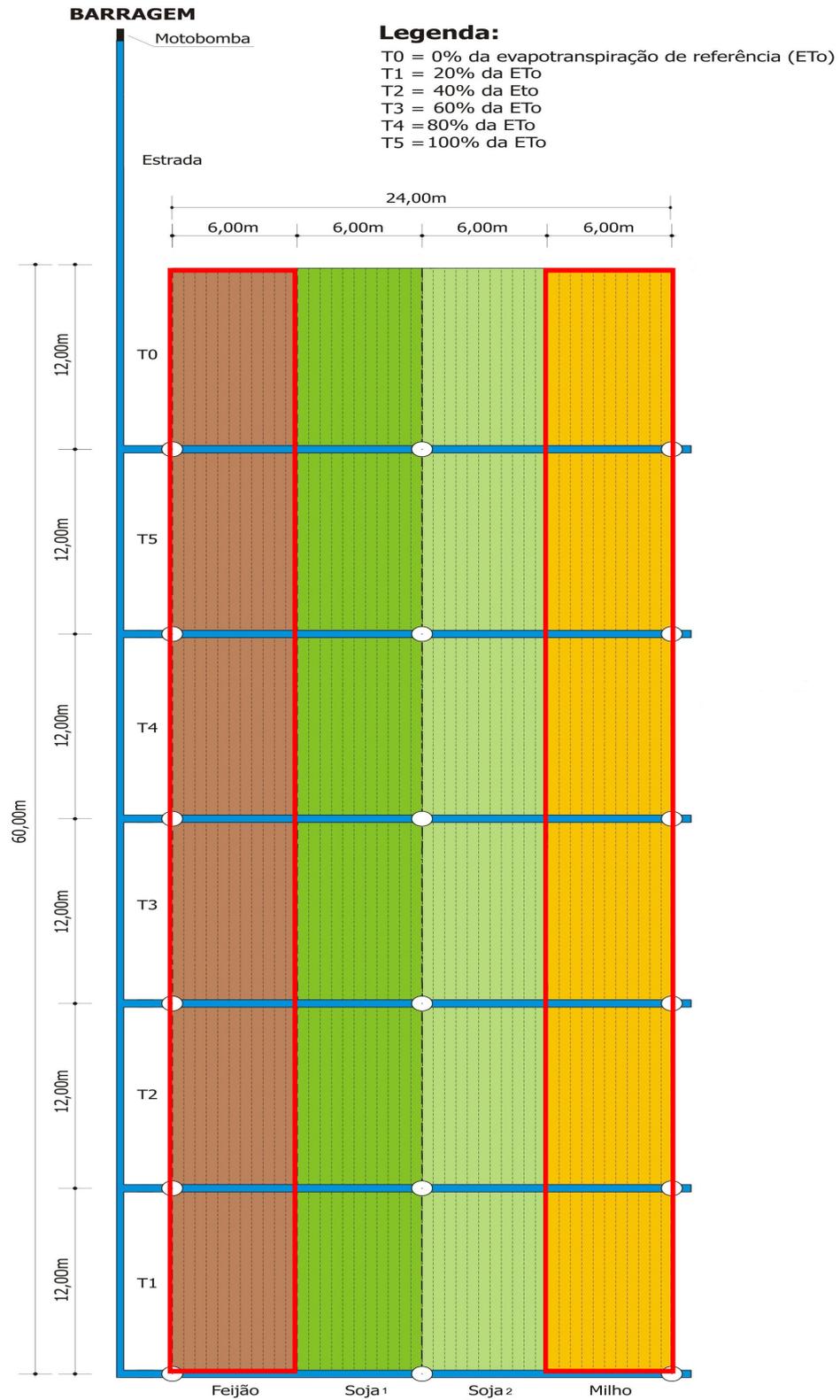
As irrigações foram aplicadas com base nas leituras diárias de evaporação do Tanque Classe A. Para a obtenção das lâminas de irrigação foi aplicada a seguinte fórmula:

$$E_{to} = K_p \cdot EV \quad [2.11]$$

Em que:  $E_{to}$ , é a evapotranspiração (mm);  $EV$  é a evaporação do Tanque Classe A e  $K_p$  é coeficiente do tanque.

O manejo da irrigação utilizado foi baseado no turno de rega prefixado, com intervalo de 7 dias entre as irrigações quando não ocorria precipitação pluviométrica.

As estratégias de irrigação aplicadas ao longo do ciclo da cultura foram efetuadas com base nos dados coletados do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC).



**Figura 2.5** – Croqui da área experimental.

\* As variedades de soja 1 e 2, foram utilizadas para outra pesquisa.

A lâmina de água aplicada foi calculada, a partir da vazão média amostrada, e a lâmina de água coletada por meio dos volumes coletados nos pluviômetros e somados à quantidade de água evaporada.

Os coletores foram colocados em toda a área, sendo que o volume coletado representou a precipitação. A evaporação de água foi quantificada por um pluviômetro de volume inicial conhecido, sendo que, no final do teste, foi feita a leitura no mesmo pluviômetro, em que a diferença correspondeu à evaporação durante a realização dos testes. Esta diferença foi acrescida à leitura dos pluviômetros.

Os volumes coletados nos pluviômetros foram convertidos em lâminas d'água, onde o volume aplicado em 1 hora foi de 3,68 mm. A partir deste dado, regularam-se os registros, para que distribuíssem lâminas de 20, 40, 60, 80 e 100% da Eto (Figura 4.0). Desta forma definiu-se os tratamentos conforme:

**Tabela 2.0** – Percentagens de irrigação em cada tratamento.

<b>Tratamento</b>	<b>mm/h</b>	<b>% de irrigação</b>
T0	0	0
T1	0,735	20
T2	1,470	40
T3	2,205	60
T4	2,940	80
T5	3,676	100

Com base nisso, quando realizaram-se as irrigações. O sistema permaneceu ligado durante o tempo necessário para que a Eto medida no Tanque Classe "A" fosse repostada 100%, diferenciando desta forma os tratamentos.

### 2.2.3 Obtenção de dados básicos

#### 2.2.3.1 Características físicas do solo

As amostras para a determinação das características físicas do solo foram retiradas em uma trincheira aberta na área experimental.

Para a caracterização física do solo no qual o experimento foi conduzido, foram coletadas amostras nas profundidades de 20 a 120 cm, em intervalos de 20 cm e em número de três por profundidade, as quais foram analisadas no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Em cada um dos pontos de amostragem foram coletadas amostras deformadas para a determinação da densidade de partícula, e as amostras indeformadas para determinação da densidade do solo, microporosidade, porosidade total e curva característica de água no solo.

Para determinação da densidade de partícula foi utilizado o método do balão volumétrico. Para a densidade do solo as amostras foram coletadas em anel de 6x3 cm (84,82 cm<sup>3</sup> de volume) e determinadas pelo método do anel volumétrico. Anéis de mesmo volume foram usados para determinação da microporosidade, porosidade total e curva característica de água no solo. As amostras de solo indeformadas foram saturadas, pesadas e colocadas em mesa de tensão à -6 kPa durante 72 horas, para determinação da microporosidade. Posteriormente as amostras foram secas em estufa por 24 horas e pesadas, para determinar a umidade. A porosidade total foi obtida pela umidade de saturação. A macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

#### 2.2.3.2 Curva característica de água no solo

Para a elaboração da curva característica das diferentes profundidades do solo, foram utilizados equipamentos padrão do Laboratório de Física dos Solos da UFSM. As amostras foram saturadas por 48 horas e submetidas aos potenciais de -1

e -6 kPa em mesa de tensão, -33 e -100 kPa em panela de pressão, e -500 e -1500 kPa no medidor de potencial WP4.

A relação entre a umidade volumétrica ( $\theta$ ) e o potencial matricial ( $h$ ) foi descrita pelo modelo de Brooks & Corey (1964).

#### 2.2.3.3 Características químicas do solo

As amostras para a determinação das características químicas foram retiradas em profundidades de 10 cm e 30 cm da área experimental, conforme critério de Comissão... (2004) para amostragem de solo sob sistema de plantio direto em culturas de grãos.

As análises foram efetuadas com amostras deformadas de solo. A adubação do solo foi feita com base nos resultados da análise química do solo processada no Laboratório Central de Análises de Solos do Departamento de Solos da UFSM.

#### 2.2.3.4 Elementos agrometeorológicos

Os dados relativos às condições climáticas foram obtidos em uma estação climatológica automática localizada a 200m da área experimental, aproximadamente. Os elementos meteorológicos determinados diariamente foram a precipitação pluvial (mm), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa do ar (%), radiação solar ( $\text{w.m}^{-2}$ ), fotoperíodo (horas) e velocidade do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ ).

#### 2.2.3.5 Índice de área foliar

As determinações de área foliar foram realizadas utilizando-se cinco plantas por tratamento, tendo início aos sete dias após a emergência (DAE), sendo realizadas em períodos semanais durante todo o ciclo da cultura.

A área foliar das plantas foi calculada através do produto das medidas de comprimento e maior largura de cada folha, multiplicada pelo coeficiente de 0,75 (STICKLER et al., 1961).

Para a cultura de feijão, as medidas foram feitas em nove folhas.planta<sup>-1</sup>, sendo três folhas na parte inferior do dossel, três folhas na parte intermediária e três folhas na parte superior do dossel. Adotou-se este sistema devido haver uma maior uniformidade das folhas.

Para a cultura do milho as medidas foram feitas em todas as folhas das plantas.

A estimativa do índice de área foliar foi determinada através da média do comprimento médio das folhas (CMF), largura média das folhas (LMF), fator de correção de 0.75, número de folha/planta e número de plantas/metro quadrado, sendo:

$$IAF = \frac{(CMF \times LMF) \times 0.75 \times n^{\circ}.folhas / planta \times n^{\circ}.plantas / m^2}{10000} \quad [2.12]$$

#### 2.2.3.6 Matéria seca

As determinações referentes à matéria seca também foram realizadas em período semanal, com início aos sete DAE durante todo do ciclo da cultura. Foram coletadas 5 plantas de cada tratamento (amostragem destrutiva).

As plantas foram separadas, identificadas em folha, colmo e órgãos reprodutivos (cultura do milho) e folha, haste e órgãos reprodutivos (cultura do feijão) e colocadas em estufa a 60°C durante 72 horas (tempo suficiente para obtenção da massa constante) e posterior pesagem.

### 2.2.3.7 Profundidade do sistema radicular

Durante o ciclo das culturas realizaram-se medidas de profundidade do sistema radicular em períodos de 11, 25, 53, 79, 86 e 137 dias após a emergência (DAE) para a cultura do milho e 11, 25, 53, 79, 86 e 117 DAE para a cultura do feijão. Para a determinação das medidas, realizou-se em cada tratamento, a abertura de trincheiras na lateral de plantas (três em cada tratamento), escolhidas aleatoriamente as quais eram retiradas (após a abertura da trincheira) de forma que o sistema radicular fosse preservado.

### 2.2.3.8 Componentes de produção de grãos e matéria seca total

Foram utilizadas para as determinações dez plantas de cada tratamento ao final do ciclo das culturas. As plantas foram cortadas rente ao solo e separadas em diversas partes, à seguir foram identificadas e secas em estufa a 60°C durante 72 horas (tempo suficiente para obtenção da massa constante) e posterior pesagem.

Para a cultura do milho, foram determinados o número de plantas por metro quadrado (*NPM*), número médio de espigas por planta (*NEP*), número médio de grãos por espiga (*NGE*), peso médio dos grãos (*PMG*) e matéria seca total (*MST*).

Para a cultura do feijão foram determinados o número de plantas por metro quadrado (*NPM*), número médio de vagens por planta (*NVP*), número médio de grãos por vagem (*NGV*), peso médio dos grãos (*PMG*) e matéria seca total (*MST*).

### 2.2.3.9 Relação entre a produção de grãos e a matéria seca total

A produção de grãos está relacionada com a matéria seca total. Sendo expressa por:

$$\text{Pr odução de grãos (kg / ha)} = \text{MST} \cdot \text{IC}$$

[2.13]

Em que:  $MST$  é a matéria seca total ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) e  $IC$  é o índice de colheita.

A produção econômica se refere a parte do valor econômico da produção de matéria seca e esta, à matéria seca total. A relação entre produção de grãos e a matéria seca total é o índice de colheita.

O modelo computacional de produção precisa desta informação (índice de colheita) para transformar matéria seca total produzida em grãos. Portanto, será determinado o modelo de correção entre os dois elementos de produção.

Para estimar a produção de grãos foi utilizada a expressão:

$$\text{Produção de grãos (kg / ha)} = \frac{MST \cdot IC}{0,87} \quad [2.14]$$

Para estimar a matéria seca total foi utilizada a seguinte expressão:

$$\text{Produção de matéria seca (kg / ha)} = 10 \cdot MST \cdot N \cdot \text{plantas} / \text{m}^2 \quad [2.15]$$

Em que:  $MST$  é a matéria seca total média das plantas (g).

#### 2.2.4 Ajuste dos dados

Foi utilizado o programa computacional *Table Curve 2D v.2.03* (Jandel Scientific) para encontrar o modelo de melhor ajuste entre os dados de índice de área foliar e o acúmulo térmico ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$ ); matéria seca e  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$  e profundidade do sistema radicular e  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$ .

Os critérios para o ajuste do melhor modelo foram: (i) a pressuposição de que o crescimento das plantas, quantificado em índice de área foliar, acúmulo de matéria seca e profundidade do sistema radicular no tempo, siga uma curva sigmóide; (ii) os valores dos coeficientes da regressão não linear; (iii) menor número de parâmetros do modelo; (iv) análise da dispersão dos pontos no gráfico.

A produção de grãos em função da produção de matéria seca nas diferentes lâminas de irrigação também foi ajustada no programa computacional *Table Curve* 2D v.2.03 (Jandel Scientific).

### 2.2.5 Modelo matemático

O modelo matemático do sistema levou em consideração as características do solo, da atmosfera e da planta para acompanhar a extração de água no solo e a resposta da produção da cultura sob diferentes estratégias de irrigação.

O sistema solo-planta-atmosfera e o manejo de irrigação foram tratados como partes inter-relacionados e devido a esta interação, o modelo pode ser visualizado em dois componentes básicos: o fluxo de água no solo e a resposta da produção da planta.

O fluxo de água no solo consistiu na variação do conteúdo da água no solo devido aos processos de entrada no solo ( $P$ ,  $I$  e  $+Qz$ ) e de saída ( $ES$ ,  $TR$  e  $-Dz$ ) (balanço hídrico). A resposta da cultura consistiu na produção de grãos e matéria seca sob diferentes estratégias de irrigação utilizadas.

A otimização da eficiência de aplicação de água foi determinada quando a relação entre a produção e a água extraída foi máxima, o que indicou indiretamente o melhor manejo de irrigação para as culturas de milho e de feijão.

#### 2.2.5.1 Formulação do modelo matemático

##### 2.2.5.1.1 Fluxo de água no solo

Um conjunto de equações não lineares para fluxo de água no solo foi resolvido numericamente pelo método das diferenças finitas com o auxílio de funções ajustadas das características físico hídricas do solo.

Foi utilizada a equação de Richards (1931) para descrever as variações no conteúdo de água no solo, incluindo o termo representativo da transpiração  $TR(z, t)$  ou extração de água pelas raízes.

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} C(\psi) = \frac{\partial}{\partial z} k(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} + k(\psi) - TR(\psi, z, t) \quad [2.16]$$

Em que:  $C(\psi)$ , é a capacidade específica, representada pela derivada da umidade em função da pressão  $\frac{\partial \theta}{\partial \psi}$  e  $TR(z, t)$  é a transpiração da planta na profundidade  $z$  e no tempo  $t$ .

#### 2.2.5.1.2 Estimativa da transpiração máxima e transpiração real

A evapotranspiração máxima ( $ET_{max}$ ) foi obtida através da seguinte expressão:

$$Et_{max} = Kc + ETo \quad [2.17]$$

Em que:  $Kc$ , se refere aos valores dos coeficientes de cultura, obtidos de acordo com Klar (1991) e a  $ETo$ , se refere a evapotranspiração, obtida pelo método de Penman

$$(ETP = \frac{(\Delta / \gamma) \cdot (Q / 59) + Ea}{\Delta / \gamma + 1}).$$

A transpiração da planta foi estimada por:

$$TR(\psi) = TP_{máx} \cdot f[\psi(z, t)] \cdot dsr(z, t) \quad [2.18]$$

Em que:  $TP_{máx}$ , é a transpiração máxima ( $Lt^{-1}$ );  $\theta(z, t)$  é uma função da umidade na

profundidade  $z$  e no tempo  $t$ , definida por  $f(\psi(z, t)) = \frac{\psi(z, t) - \psi_{pm}(z)}{\psi_{cc}(z) - \psi_{pm}(z)}$ ,  $\psi_{cc}(z)$  e

$\psi_{pm}(z)$  são as unidades correspondentes a capacidade de campo e ao ponto de

murcha permanente na camada  $Z$  e  $dsr(z, t)$  é a função de distribuição do sistema radicular.

### 2.2.5.1.3 Estimativa da evaporação máxima

A evaporação do solo pode ser expressa diretamente por (RITCHIE, 1972):

$$ES_{max} = \tau \cdot \left[ \left( \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \right) \right] \cdot \frac{Rn}{59} \quad [2.19]$$

Em que:  $\tau$  é a fração de energia que atinge a superfície do solo e relaciona-se com o índice de área foliar, segundo Ritchie (1972) através de  $\tau = e^{-0.398 \cdot IAF}$  ( $e$  = base de logaritmos naturais = 2,718),  $ES_{max}$ , é a evaporação máxima do solo (mm);  $Rn$ , é a radiação líquida (cal/cm<sup>2</sup>/dia), estimada a partir da equação global.

### 2.2.5.1.4 Estimativa da distribuição do sistema radicular

O conhecimento do comportamento do sistema radicular em relação a profundidade e ao tempo, é necessário para simular a extração de água pela planta.

Para a estimativa da distribuição do sistema radicular foi utilizada a expressão:

$$DSR(z, t) = \frac{g(z)}{\int_0^{Prz} g(z)} \quad [2.20]$$

Em que:  $g(z)$  é a porcentagem (%) do sistema radicular até a profundidade  $z$ . O valor da função  $g(z)$  foi calculado pela equação  $g(z) = [c \cdot (2 \cdot z - Prz) + Prz] / Prz^2$ , sendo  $c$  uma constante (- 0,8, conforme PERROCHET, 1987);  $Prz$ , é a profundidade efetiva do sistema radicular, sendo

calculada por  $Pr z = a + \frac{b}{1 + \left(\frac{x}{c}\right)^d}$ , sendo  $Pr z$ , a profundidade das raízes (cm) a um

determinado tempo  $t$  após a emergência (DAE).

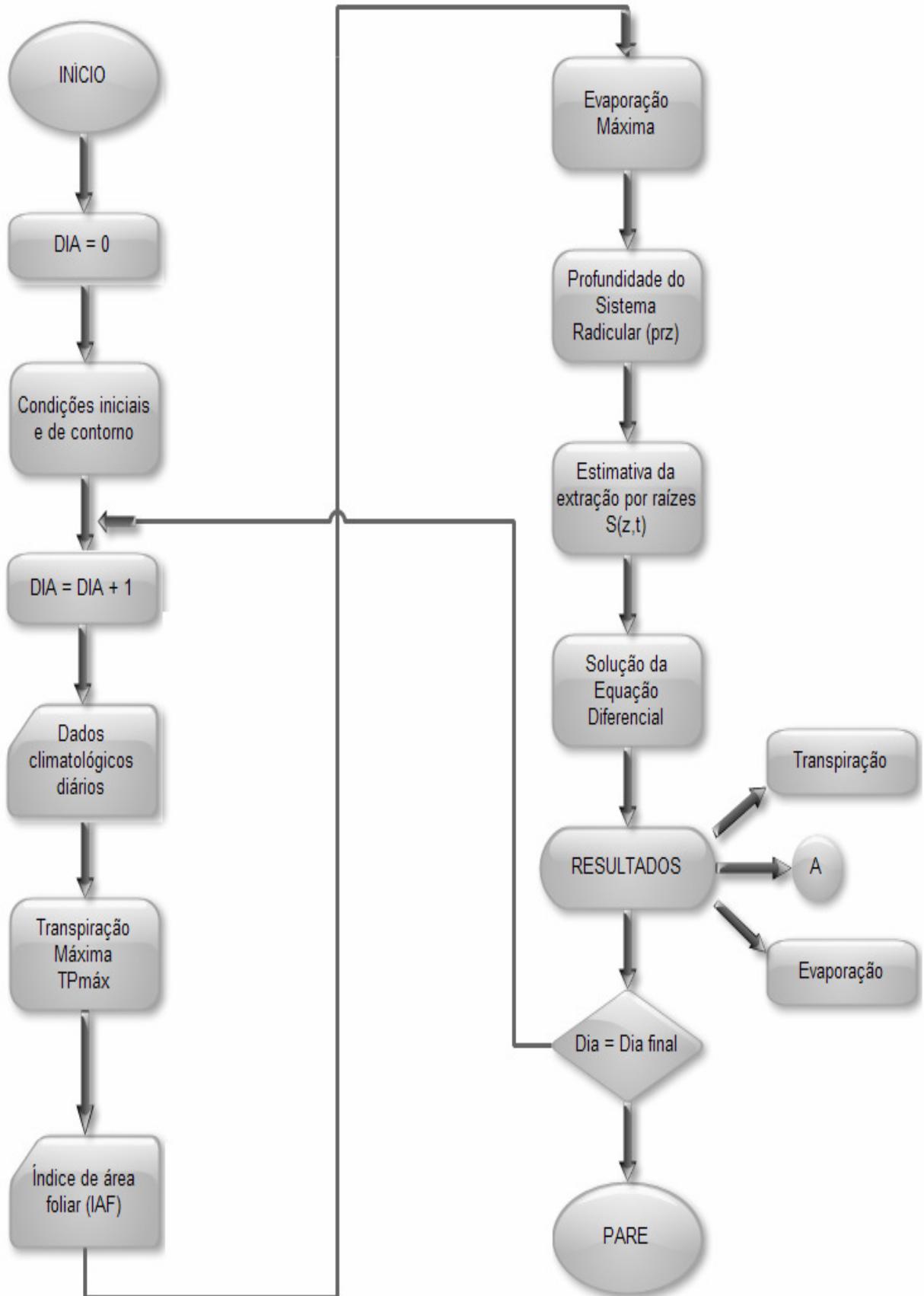
#### 2.2.5.1.5 Solução da equação numérica de Richards (1931)

A solução da equação 4.7 permite o cálculo da variação do conteúdo de água no solo devido a ação dos componentes do balanço hídrico da cultura em estudo. Para a solução desta equação foi utilizado o método das diferenças finitas, descrito em Robaina (1992).

#### 2.2.5.1.6 Fluxograma do modelo de extração de água

A Figura 2.6 representa o fluxograma simplificado do modelo para simular a extração de água e as variações do seu conteúdo no solo.

Como componentes básicos do fluxograma tem-se: a leitura dos dados e condições iniciais, a leitura dos dados diários de entrada, estimativa da evaporação e transpiração máximas (condição de contorno superior), estimativa da profundidade e estimativa do sistema radicular, leitura da condição de contorno inferior, solução da equação diferencial com estimativa da extração da água pelas raízes e a impressão dos valores diários de saída,  $\theta(z, t)$ ,  $TR(\theta)$ ,  $q(o, t)$  e  $q(L, t)$ ; o termo  $q(o, t)$  sendo a evaporação do solo e  $q(L, t)$  a drenagem ou ascensão capilar na profundidade considerada para balanço da água no solo.



**Figura 2.6** – Fluxograma simplificado do modelo de extração de água (adaptado de ROBAINA, 1992).

## 2.2.5.2 Modelo de produção

### 2.2.5.2.1 Previsão da produção

A previsão de produção foi feita em função do incremento de matéria seca, quantificado em base horária pelo modelo. Foram calculados a partir dos dados experimentais os índices de colheita.

De acordo com Robaina (1992), o modelo de produção pode ser separado em dois sub-modelos.

### 2.2.5.2.2 Modelo para a estimativa de produção potencial

Segundo Doorenbos & Kassam (1994) a taxa de produção potencial ( $Pms$ ) para um dia qualquer é expressa por:

$$Pms = (F \cdot Po + (1 - F) \cdot Pc) \quad [2.21]$$

Em que:  $Pms$ , é a produção de matéria seca ( $kg \cdot ha^{-1} \cdot dia^{-1}$ );  $F$ , é a fração do dia em que o céu está nublado;  $Po$ , a taxa de fotossíntese para dias para dias nublados e  $Pc$  é a taxa de fotossíntese para dias claros, ambos expressos em  $kg \cdot ha^{-1} \cdot dia^{-1}$  e funções da latitude do local e da época do ano.

Segundo De Wit (1965), o valor de  $F$  é determinado por:

$$F = 1,25 - \frac{0,625 \cdot Rs}{Rc} \quad [2.22]$$

Em que  $Rc = 0.415 Ro$ , a radiação fotossinteticamente ativa na ausência da atmosfera ( $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ ),  $Rs$  a radiação solar global média ao nível do solo ( $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ ), determinada através dos dados da estação.

Sob condições de campo, a produção potencial estimada na equação não é atingida, sendo a estimativa da taxa de produção potencial de matéria seca ( $q_{pot}$ ) expressa por:

$$q_{pot} = \frac{P_{ms} \cdot f_t \cdot f_r \cdot f_a \cdot IAF}{5} \quad [2.23]$$

Em que:  $q_{pot}$ , é a produção potencial ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ ) para um índice de área foliar igual a 5;  $f_t$ , é o fator de influência da temperatura, o qual será obtido por  $f_t = 1 - [t - a / b - a]^2$  (em que  $a$  se refere a temperatura limite inferior, sendo considerada igual a 20 para ambas as culturas e  $b$  se refere a temperatura limite superior, sendo igual a 35 para o milho e 30 para o feijão;  $f_r$  é o fator de respiração (considerado = 0,30, conforme FEDDES, 1978);  $f_a$  é a relação entre a massa seca da parte aérea e massa seca da planta e IAF é o índice de área foliar ( $\text{m}^2$  de folha. $\text{m}^{-2}$  de solo).

A produção potencial acumulada ( $Q_{pot}$ ) no período de crescimento da cultura será:

$$Q_{pot} = \sum_1^n q_{pot} \cdot \Delta t \quad [2.24]$$

Em que:  $q_{pot}$  é obtido em  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ,  $n$  é o período de dias até a colheita e  $\Delta t$  o período de 1 dia.

#### 2.2.5.2.3 Modelo para a estimativa de produção real

O aumento da produção de uma cultura em relação ao tempo pode ser representado por uma curva sigmóide, que possui três trechos distintos: o primeiro correspondente a uma produção de matéria seca acelerada, o segundo a uma produção retardada e o último a uma produção tendente a estabilização. Sendo a produção uma função do tempo, pode-se representar a sua variação através de uma equação diferencial:

$$\frac{dQ}{dt} = f(Q, t) \quad [2.25]$$

Em que: a taxa de produção ( $dQ/dt$ ) é uma função da produção acumulada ( $Q$ ) e do tempo ( $t$ ). A taxa de produção aumenta gradualmente até atingir um máximo, posteriormente decresce suavemente e no final do período torna-se nula.

A taxa de produção ( $q$ ) é influenciada por fatores chamados “Fatores de Produção”, tais como a radiação solar, temperatura, água, nutrientes, oxigênio e dióxido de carbono. Somente quando todos os fatores de produção estiverem disponíveis em quantidades adequadas a taxa de produção potencial máxima ( $q_{m\acute{a}x}$ ) será atingida. Nesta situação, tanto a taxa de produção como a produção serão máximas, mas quando um dos fatores de produção estiver em condição limitante, a taxa de produção e a produção serão limitadas ( $q_{at}$  e  $Q_{at}$ ), mesmo que todos os outros fatores estejam presentes em condições adequadas, o que conduz a concluir que, a produção potencial não poderá ser atingida.

Para se computar a taxa de produção atual em diferentes intervalos de tempo representados por  $i$ , segundo procedimento detalhado por Robaina (1992), é expressa por:

$$(q_{at}^i)^2 - q_{at}^i (q_{pot}^i + AW^i) + AW^i \cdot q_{pot}^i (1 - \varepsilon) = 0 \quad [2.26]$$

Em que:  $i$  é um dia qualquer e a solução da equação acima é:

$$q_{at}^i = \frac{AW^i}{2} + \frac{q_{pot}^i}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(q_{pot}^i - AW^i)^2 - 4 q_{pot}^i \cdot AW^i (1 - \varepsilon)} \quad [2.27]$$

Os valores de  $A$  e  $\varepsilon$  foram determinados por tentativas de menor erro e o valor  $q_{pot}$  foi estimado pela equação 2.23.

A influência do fator de produção ( $w$ ) foi determinada por:

$$W^i = \frac{TR^i}{\Delta e^i} \quad [2.28]$$

em que:  $\Delta e$ , é o déficit de pressão de vapor da água (mbar) e  $TR$  é a transpiração real diária ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ).

A produção real acumulada ( $Q_{at}$ ) foi calculada pela soma das produções diárias durante todo o período:

$$Q_{at} = \sum_{i=1}^n q_{at} \cdot \Delta t \quad [2.29]$$

em que  $t = 1$  dia. O termo  $Q_{at}$  é expresso em  $\text{kg.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$  e  $q_{at}$  em  $\text{kg.ha}^{-1}$ .

#### 2.2.5.2.4 Produção de grãos

De acordo com De Wit (1965), a produção de grãos ( $Pg$ ) referida a grãos com 13% de umidade de uma cultura pode se calculada por:

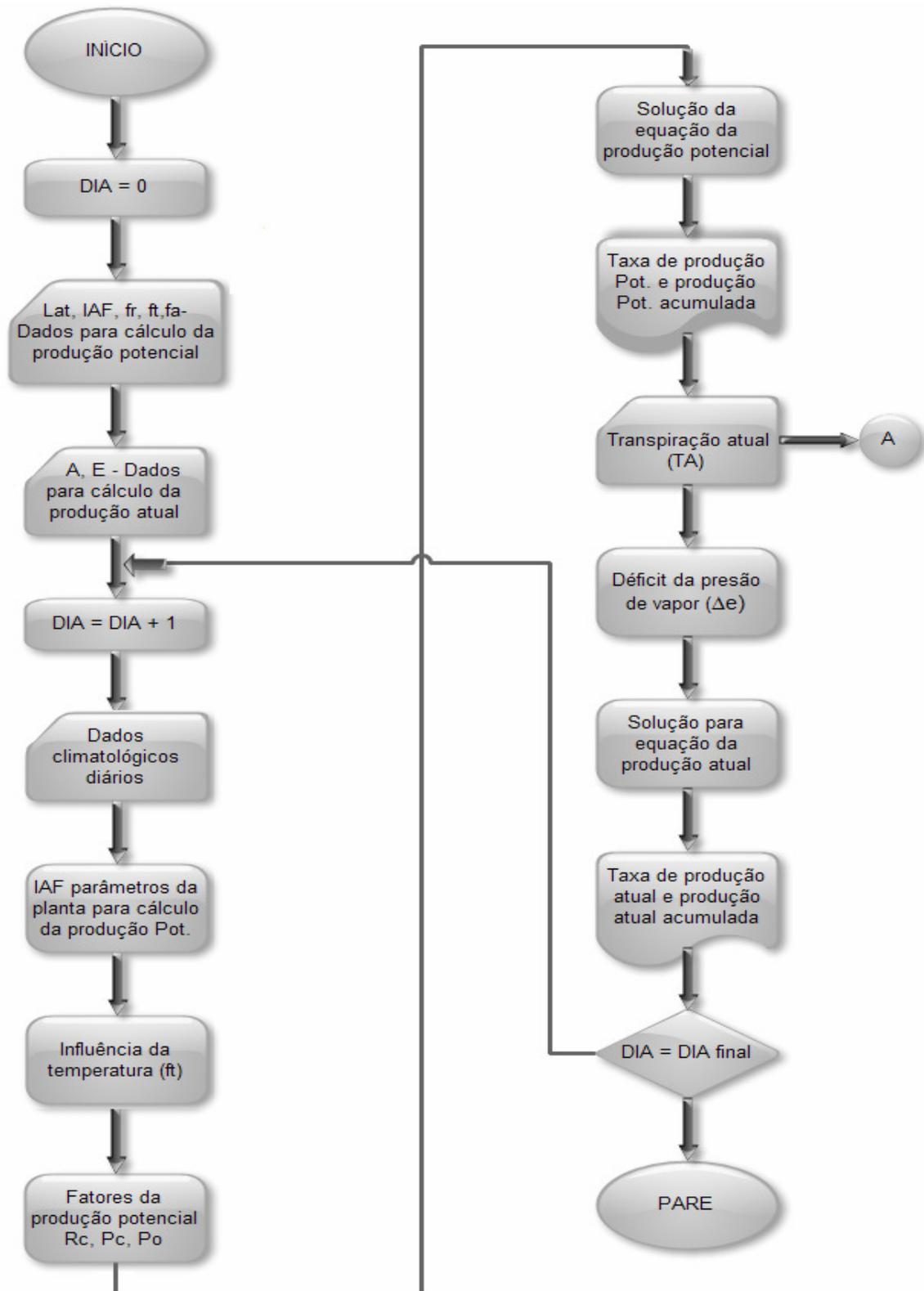
$$Pg = Q_{at} \cdot \frac{IC}{0,87} \quad [2.30]$$

Em que:  $Q_{at}$ , é a produção de matéria seca ( $\text{Kg.ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ ) e  $IC$ , é o coeficiente ou índice de colheita.

O coeficiente de colheita  $Ic$  foi determinado a partir dos dados do modelo físico experimental.

#### 2.2.5.2.5 Fluxograma do modelo de produção da planta

O fluxograma simplificado do modelo de produção (Figura 2.7) foi composto por leitura dos dados iniciais (latitude,  $fr$ ,  $A$ ,  $E$ ), leitura dos dados diários de entrada ( $Tem$ ,  $Rs$ ,  $Urel$ ,  $IAF$ ,  $f_t$ ,  $Rc$ ,  $Pc$ ,  $Po$ ,  $TR$ ), estimativa da produção potencial (produção potencial x tempo).



**Figura 2.7** – Fluxograma simplificado do modelo de produção de cultura (adaptado de ROBAINA, 1992).

### 2.2.6 Calibração

A calibração do modelo de produção se refere a determinação dos coeficientes  $A$  e  $\varepsilon$  (equação 2.27). Foram utilizados os valores de produção obtidos no tratamento T0 para realizar esse procedimento.

### 2.2.7 Teste do modelo

Os valores de produção obtidos no experimento de campo nos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5 foram comparados com os valores de produção calculados com o modelo de produção calibrado.

Foi feita a regressão linear  $y = a + b \cdot x$ , onde  $x$  foram valores simulados e  $y$  foram os valores experimentais obtidos no campo, com a finalidade de se obter o coeficiente de correlação  $r^2$  e do coeficiente linear  $a$  e coeficiente  $b$ . Para estes coeficientes, foi realizado também do Teste  $t$  de Student ao nível de 5% de probabilidade de erro.

### 2.2.8 Aplicação do modelo

O modelo de produção proposto neste trabalho, após a sua validação, foi utilizado para simular a produção das culturas de milho e feijão quando submetida a diferentes estratégias de irrigação.

## 2.3 Resultados e discussões

A seguir, são apresentados os resultados de solo, clima e planta do experimento de campo para a cultura do milho e do feijão. No caso das plantas, seguem os resultados e discussões sobre, o índice de área foliar (IAF), matéria seca total (MST) e profundidade do sistema radicular (Prz) ao longo do ciclo das culturas. Apresenta-se também os valores obtidos de componentes de produção, produção de grãos e matéria seca total no final do ciclo de ambas as culturas.

Da mesma forma, os resultados obtidos no experimento simulado, apresentando a calibração e teste do mesmo, comparando-se com os resultados obtidos no experimento de campo e discutindo-se com base em outras pesquisas. Além da comparação apresenta-se outras simulações as quais não foram possíveis de serem realizadas no campo.

### 2.3.1 Características físicas dos solos

Os resultados das características físicas do solo são apresentados nas Tabelas 2.1 e 2.2.

**Tabela 2.1** – Características físicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta – Valores médios para três repetições.

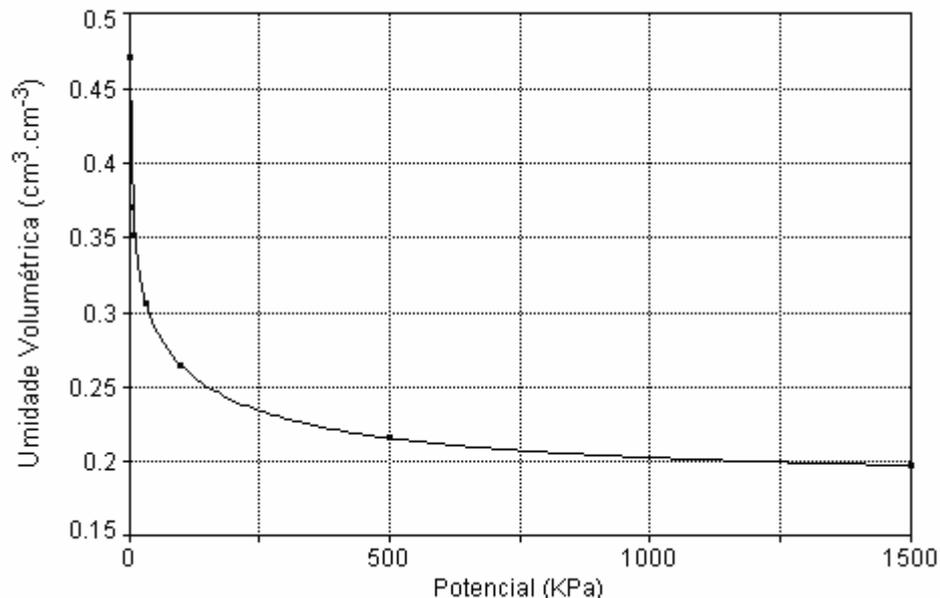
Prof.(cm)	Classe Textural	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )		
		Solo	Partícula	Porosidade
0 - 20	Franco Argilo Arenoso	1,55	2,60	40,44
20 - 40	Franco Argiloso	1,39	2,60	46,49
40 - 60	Franco Argiloso	1,34	2,63	48,96
60 - 80	Franco Argiloso	1,35	2,62	48,35
80 - 100	Argila	1,33	2,63	49,55
<b>Média</b>		<b>1,39</b>	<b>2,62</b>	<b>46,76</b>
<b>DP</b>		<b>0,09</b>	<b>0,02</b>	<b>3,71</b>
<b>CV(%)</b>		<b>12,51</b>	<b>0,76</b>	<b>7,93</b>

Através da Tabela 2.1 observou-se que o solo em estudo apresenta classe textural predominante de franco argiloso, com densidade de solo média de 1,39, densidade da partícula média de 2,62 e porosidade total média de 46,76%. Pode-se observar que se trata de um perfil uniforme quanto às características físicas determinadas.

**Tabela 2.2** – Características físicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta – Valores médios para três repetições.

Prof.(cm)	Umidade Volumétrica (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )						
	Satur.	1 (kPa)	6 (kPa)	33 (kPa)	10 (kPa)	500 (kPa)	1500 (kPa)
0 - 20	0,42	0,39	0,34	0,29	0,28	0,19	0,16
20 - 40	0,47	0,40	0,34	0,30	0,28	0,20	0,17
40 - 60	0,50	0,44	0,36	0,30	0,28	0,19	0,17
60 - 80	0,51	0,44	0,37	0,31	0,29	0,22	0,21
80 - 100	0,51	0,45	0,39	0,34	0,32	0,23	0,21
<b>Média</b>	<b>0,48</b>	<b>0,42</b>	<b>0,36</b>	<b>0,31</b>	<b>0,29</b>	<b>0,21</b>	<b>0,18</b>
<b>DP</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>
<b>CV (%)</b>	<b>8,33</b>	<b>7,14</b>	<b>5,55</b>	<b>6,45</b>	<b>6,90</b>	<b>9,52</b>	<b>11,11</b>

A Figura 2.8 representa a curva de retenção ajustada pelo Método Brooks & Corey (1964) dos valores médios de umidade do solo para as cinco camadas de solo. Optou-se em utilizar a média, devido a uniformidade dos dados de cada camada.



**Figura 2.8** – Curva de retenção dos valores médios de umidade do solo para cinco camadas de solo.

### 2.3.2 Características químicas dos solos

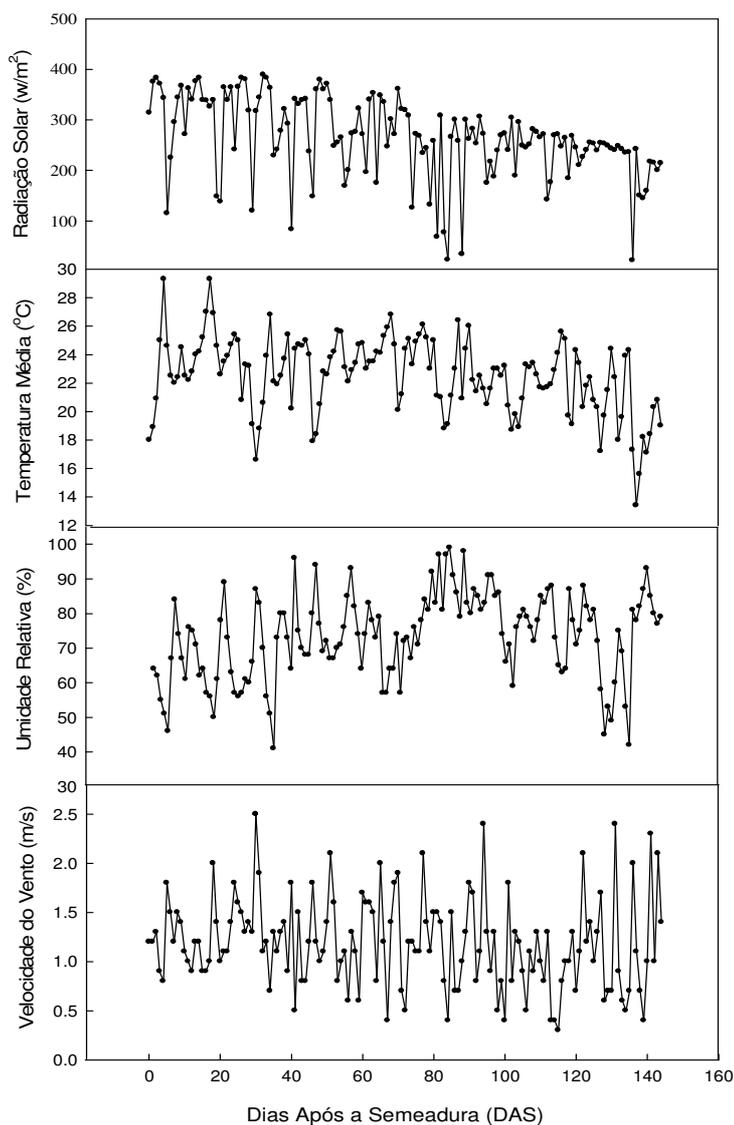
Os resultados das características químicas do solo são apresentados na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3** – Características químicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta – Valores médios para três repetições.

Prof. (cm)	pH	M.O		Teor Trocável em g/100g Terra						Saturação		Argila	
	H <sub>2</sub> O (1:1)	%	CTC	K mg/ dm <sup>3</sup>	Ca	Mg	Al	H + Al	Índice SMP	P Mg. dm <sup>-3</sup>	Al	V%	%
0-10	5,9	2,7	12,0	304	5,9	3,1	0	2,2	6,6	11,8	0	82	34
0-10	6,1	2,5	11,7	360	6,0	3,0	0	2,0	6,7	19,9	0	83	32
0-10	5,5	2,0	9,8	248	4,4	2,3	0	2,5	6,5	6,0	0	75	34
0-30	5,8	2,2	10,7	120	5,1	2,5	0	2,8	6,4	10,1	0	74	36
0-30	5,6	1,9	9,1	172	4,3	2,2	0	2,2	6,6	4,6	0	76	23

### 2.3.3 Elementos agrometeorológicos

A Figura 2.9 apresenta a variação diária dos elementos agrometeorológicos durante o ciclo das culturas.



**Figura 2.9** – Variação diária dos elementos agrometeorológicos durante o ciclo das culturas.

### 2.3.4 Irrigações e precipitações

As Tabelas 2.4 e 2.5 apresentam o número de irrigações, lâmina média aplicada por irrigação (mm), irrigação total (mm), precipitação pluvial (mm) e total de água aplicado (irrigação e precipitação) (mm) ao longo do ciclo da cultura de milho e do feijão para seis tratamentos.

**Tabela 2.4** – Valores de irrigação total (mm), precipitação pluvial (mm) e total de água aplicado (irrigação e precipitação) (mm) ao longo do ciclo da cultura do milho para seis tratamentos.

<b>Tratamento</b>	<b>Irrigação Total (mm)</b>	<b>Precipitação Pluvial (mm)</b>	<b>Total de água aplicada (Irrigação e Precipitação (mm))</b>
<b>0</b>	0	413	413,00
<b>1</b>	43,44	413	456,44
<b>2</b>	86,89	413	499,89
<b>3</b>	130,33	413	543,33
<b>4</b>	173,77	413	586,77
<b>5</b>	217,22	413	630,22

**Tabela 2.5** – Valores de irrigação total (mm), precipitação pluvial (mm) e total de água aplicado (irrigação e precipitação) (mm) ao longo do ciclo da cultura do feijão para seis tratamentos.

<b>Tratamento</b>	<b>Irrigação Total (mm)</b>	<b>Precipitação Pluvial (mm)</b>	<b>Total de água (Irrigação e Precipitação (mm))</b>
<b>0</b>	0	398	398
<b>1</b>	36,84	398	434,84
<b>2</b>	73,69	398	471,69
<b>3</b>	110,53	398	508,53
<b>4</b>	147,37	398	545,37
<b>5</b>	184,22	398	582,22

### 2.3.5 Resultados experimentais

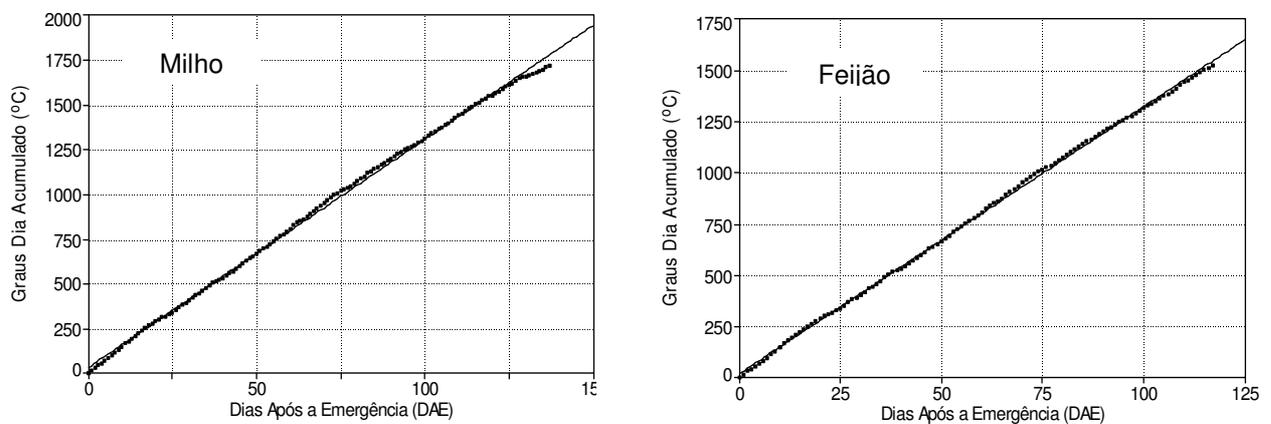
A seguir são apresentados os resultados experimentais de índice de área foliar (IAF), matéria seca total (MST), profundidade do sistema radicular (Prz), componentes de produção e produção de grãos das culturas de milho e feijão.

Os parâmetros IAF, MST e Prz foram relacionados com os graus dia acumulados ( $^{\circ}\text{C}$ ) obtidos no período. Realizou-se esta relação devido a adequada correlação entre os dados de dias após a emergência (DAE) e os graus dia acumulados ( $^{\circ}\text{C}$ ). Os valores dos coeficientes  $a$ ,  $b$  e coeficiente de determinação  $r^2$  são apresentados na Tabela 2.6.

**Tabela 2.6** – Valores dos coeficientes  $a$ ,  $b$  e coeficiente de determinação  $r^2$  da relação entre os dias após a emergência (DAE) e os graus dia acumulados ( $^{\circ}\text{C}$ ), referentes as culturas em estudo.

Tratamento	a	b	$r^2$
0	26,615	12,745	0,998
1	14,457	13,030	0,999

A Figura 2.10 ilustra a correlação obtida entre os dias após a emergência (DAE) e os graus dia acumulados ( $^{\circ}\text{C}$ ).



**Figura 2.10** – Correlação entre dias após a emergência (DAE) e os graus dia acumulados ( $^{\circ}\text{C}$ ) para as culturas do milho e do feijão.

### 2.3.5.1 Índice de área foliar

Os valores experimentais médios obtidos na determinação do índice de área foliar (IAF) para as culturas do milho e do feijão são apresentados em Apêndice I e II.

A partir dos valores médios de IAF nos diferentes tratamentos determinou-se o modelo de ajuste para cada tratamento, relacionando-os com o acúmulo térmico do período. A equação que representou a relação entre as variáveis é expressa por

$$y = a + b e \left( -0,5 \left( \frac{\ln \left( \frac{x}{c} \right)}{d} \right)^2 \right)$$

A Tabela 2.7 apresenta os coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e o coeficiente de determinação  $r^2$  do modelo ajustado.

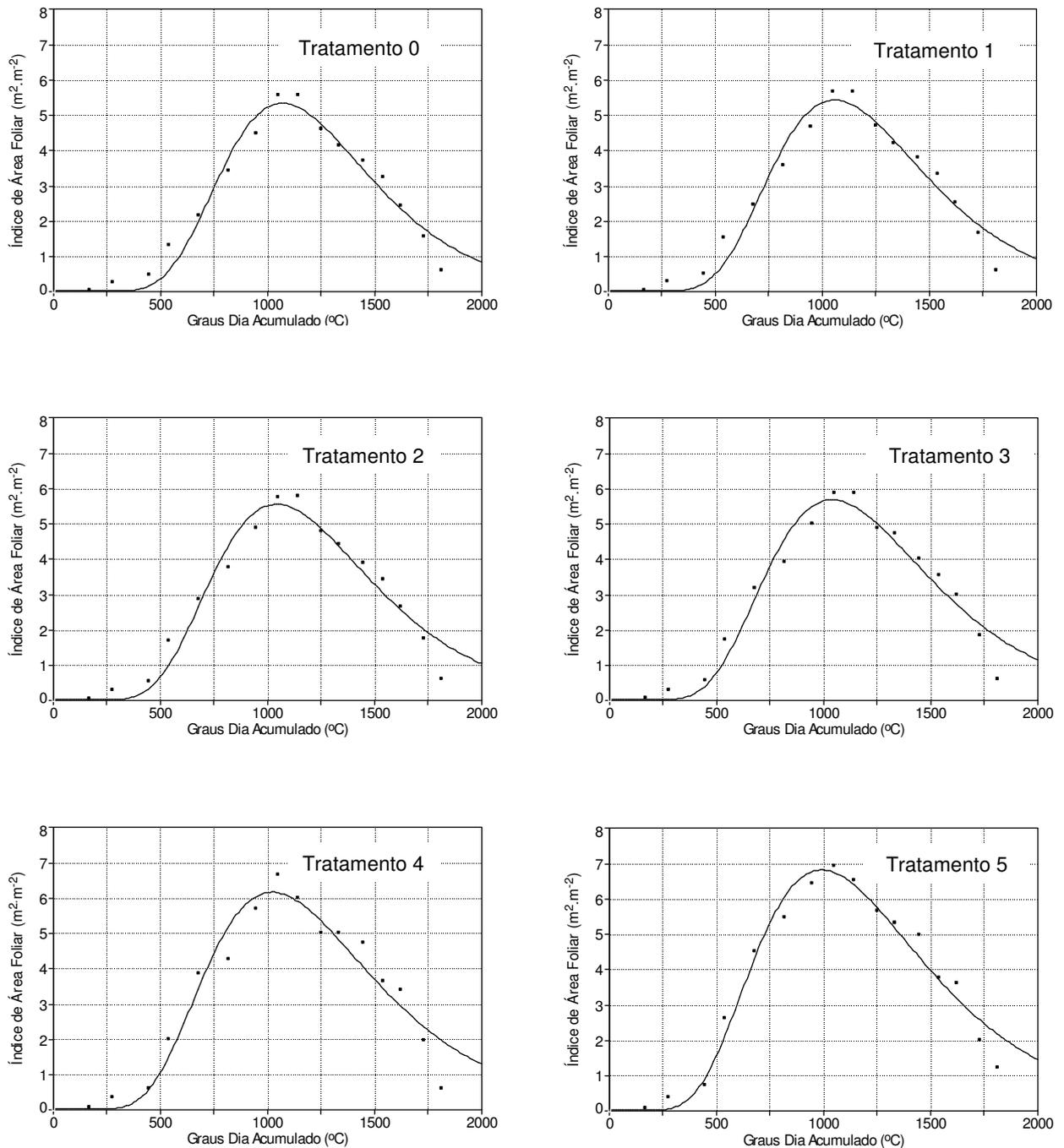
**Tabela 2.7** – Coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e o coeficiente de determinação  $r^2$  para a variável índice de área foliar (IAF) em cada tratamento da cultura do milho.

Tratamento	a	b	c	d	$r^2$
0	8,243e-07	5,311	1070,571	0,324	0,982
1	7,336e-07	5,406	1058,109	0,338	0,985
2	5,753e-07	5,529	1044,849	0,353	0,985
3	4,836e-07	5,663	1041,561	0,364	0,985
4	3,248e-07	6,142	1023,114	0,378	0,981
5	1,697e-06	6,794	993,948	0,396	0,991

Através dos resultados obtidos na Tabela 2.7, observou-se que o modelo ajustou-se com elevado coeficiente de determinação para todos os tratamentos analisados.

A Figura 2.11 mostra a variação do IAF nas diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dia acumulados no ciclo da cultura do milho.

Através dos valores obtidos no IAF (Apêndice I e Figura 2.11), observou-se que a evolução do IAF seguiu o padrão característico de plantas anuais, porém, com expressiva diferença entre as estratégias de irrigação. Ocorreu um aumento do IAF até os 70 DAE, aproximadamente (Apêndice I). Este período acumulou 1040,6 °C por dia acumulados. O maior IAF foi verificado no Tratamento T5 com o valor de 6,93 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup> aos 70 DAE, sendo que o menor IAF deste período foi 5,67 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup> para o Tratamento T0 (Apêndice I).



**Figura 2.11** – Índice de área foliar (m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>) médio para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no período para a cultura do milho.

Após o IAF máximo, ocorreu redução devido o processo natural de senescência de folhas. Neste momento, ocorreu também declínio na interceptação e absorção de radiação (FRANÇA, 1997).

França et al. (1999) demonstraram que as estimativas do IAF máximo de uma variedade de milho foram atingidas com 1.187°C por dia acumulados em condições

de plantas irrigadas, enquanto que em condições não irrigadas o IAF máximo só foi atingido com o acúmulo de 1.296°C por dia acumulados, mesmo assim, o valor obtido (3,4) foi inferior ao da condição irrigada (5,5). Dessa forma, além da deficiência hídrica ter reduzido o IAF, houve maior exigência térmica para a ocorrência do IAF máximo.

A Tabela 2.8 apresenta os coeficientes *a*, *b*, *c*, *d* e o coeficiente de determinação  $r^2$  do modelo ajustado.

**Tabela 2.8** – Coeficientes *a*, *b*, *c*, *d* e o coeficiente de determinação  $r^2$  para a variável índice de área foliar (IAF) em cada tratamento da cultura do feijão.

Tratamento	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$r^2$
<b>0</b>	-133,045	6441,762	893,397	231,510	0,997
<b>1</b>	34,145	7,689,994	949,628	196,641	0,996
<b>2</b>	-189,781	10,290,583	1045,814	263,131	0,998
<b>3</b>	-230,070	10,954,975	1076,400	280,171	0,997
<b>4</b>	-136,696	10360,362	976,201	226,250	0,996
<b>5</b>	-225,248	12273,941	1116,616	280,591	0,999

A Tabela 2.8 demonstrou que a equação ajustou-se a valores de coeficiente de determinação superiores a 0,996.

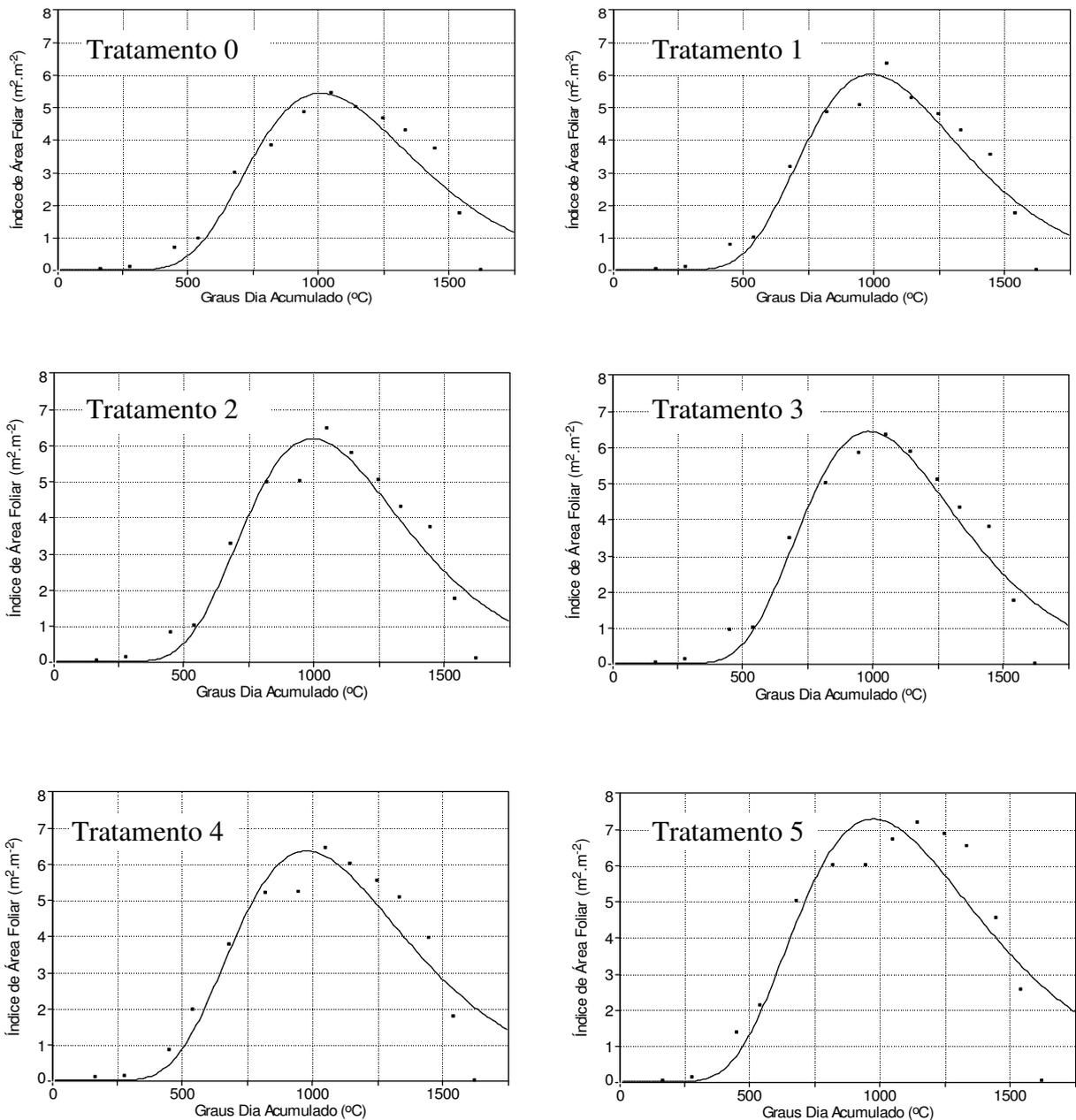
A Figura 2.12 ilustra o comportamento do índice de área foliar em cada tratamento e sua relação com o acúmulo térmico ocorrido durante o ciclo da cultura do feijão.

Através da Figura 2.12 observou-se variações diferenciadas em função da disponibilidade hídrica para todos os tratamentos analisados. A intensidade destas variações são reflexos da variabilidade temporal da partição de fotoassimilados que está relacionada à temperatura (MANFON et al., 2003).

Verificou-se que, desde o início das medições, os tratamentos apresentaram variações de IAF, que pode ser visualizado nas curvas de desenvolvimento dos tratamentos. Ocorreu um crescimento acentuado até 70 DAE para os Tratamentos, T0, T1, T2, T3 e T5, sendo que no Tratamento T5 o crescimento ocorreu até os 78 DAE.

Este período correspondeu ao estágio reprodutivo, caracterizado pelo enchimento de legumes e acumulou 1.141,8 °C por dia (Apêndice II). Resultado similar foi mencionado por Brunini (1998), com valor de 1.100 °C por dia acumulados até atingir a maturação fisiológica. O IAF máximo foi obtido no Tratamento T5 (7,19

$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ), acumulando aos 78 DAE (Apêndice V)  $1.062,7 \text{ }^\circ\text{C}$  por dia. Este valor está próximo aos obtidos por Gomes et al. (2000) e Alvim & Alvim (1969) em condições de irrigação. Bascur et al. (1985) observaram valores próximos de 6 para o IAF de cultivares de feijoeiro, sob irrigação, comparado com o valor 4, sob estresse hídrico.



**Figura 2.12** – Índice de área foliar ( $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ) médio para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no período para a cultura do feijão.

### 2.3.5.2 Matéria seca

Os valores experimentais médios obtidos na determinação da matéria seca total (MST) para as culturas de milho e feijão em cada tratamento são apresentados em Apêndice III e IV.

A partir dos valores médios de MST nos diferentes tratamentos, relacionou-se com o acúmulo térmico ( $^{\circ}\text{C}$ ) do período e determinou-se o modelo de ajuste para cada cultura e os respectivos coeficientes em cada tratamento. A equação que representa a relação entre as variáveis é expressa por  $y = a + \left( \frac{b}{1 + \exp\left(\frac{x-c}{d}\right)} \right)$ .

A Tabela 2.9 apresenta os coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e o coeficiente de determinação  $r^2$ .

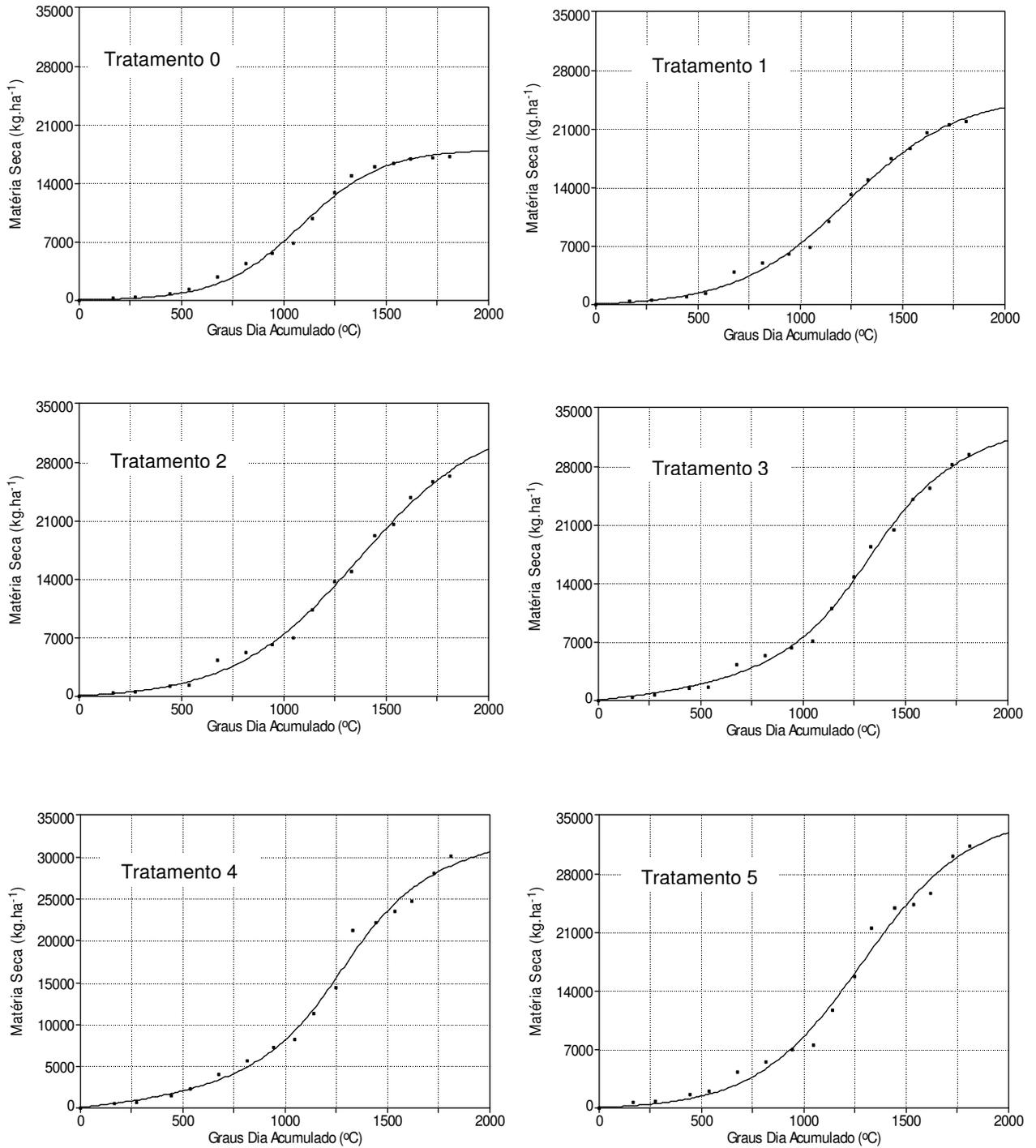
**Tabela 2.9** – Coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e o coeficiente de determinação  $r^2$  para a variável matéria seca total (MST) em cada tratamento da cultura do milho.

Tratamento	a	b	c	d	$r^2$
0	268,423	17548,528	1095,516	186,431	0,998
1	-34,011	24616,372	1233,048	261,108	0,995
2	-368,433	33228,715	1365,234	304,009	0,999
3	-284,620	35271,519	1338,963	278,280	0,997
4	-239,189	35164,305	1289,524	258,7484	0,995
5	-2961,976	37754,722	1260,403	317,096	0,996

De acordo com os valores obtidos na Tabela 2.9, observou-se que o modelo ajustou-se satisfatoriamente com coeficiente de determinação acima de 0,99.

A Figura 2.13 mostra a variação da matéria seca nas diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no ciclo da cultura do milho.

Analisando a Figura 2.13, verificou-se que a curva de produção experimental de MST em função do acúmulo térmico, pode ser representada por uma curva sigmoideal, com acentuadas variações devido as diferentes lâminas de irrigação. Evidenciou-se ainda, que a deficiência hídrica ocorrida no período (Tratamento T0) acarretou em reduzido acúmulo de MST em relação aos tratamentos irrigados.



**Figura 2.13** – Matéria seca total (kg.ha<sup>-1</sup>) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no período para a cultura do milho.

A partir dos 1.040,6 °C por dia acumulados a diferenciação também é expressiva entre o demais tratamentos, demonstrando que o aumento da dose de irrigação acarretou em maior acúmulo da MST. Nesta figura observou-se também, que o acúmulo de MST praticamente estabiliza em 1.500 °C por dia acumulados,

aproximadamente, para o Tratamento T0 e 1.627,3 °C por dia acumulados para os demais tratamentos. Desta forma evidenciou-se que o acúmulo de °C por dia neste tratamento, não foi suficiente para elevar a MST, sendo a deficiência hídrica a responsável pela redução, conforme as curvas demonstradas.

Os Tratamentos T4 e T5 atingiram o rendimento máximo com valores de 29.949,60 kg.ha<sup>-1</sup> e 31.240,0 kg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente, conforme Apêndice III e acumularam 1711,7°C.dia.

A Tabela 2.10 apresenta os coeficientes *a*, *b*, *c*, *d* e o coeficiente de determinação *r*<sup>2</sup> para o modelo ajustado.

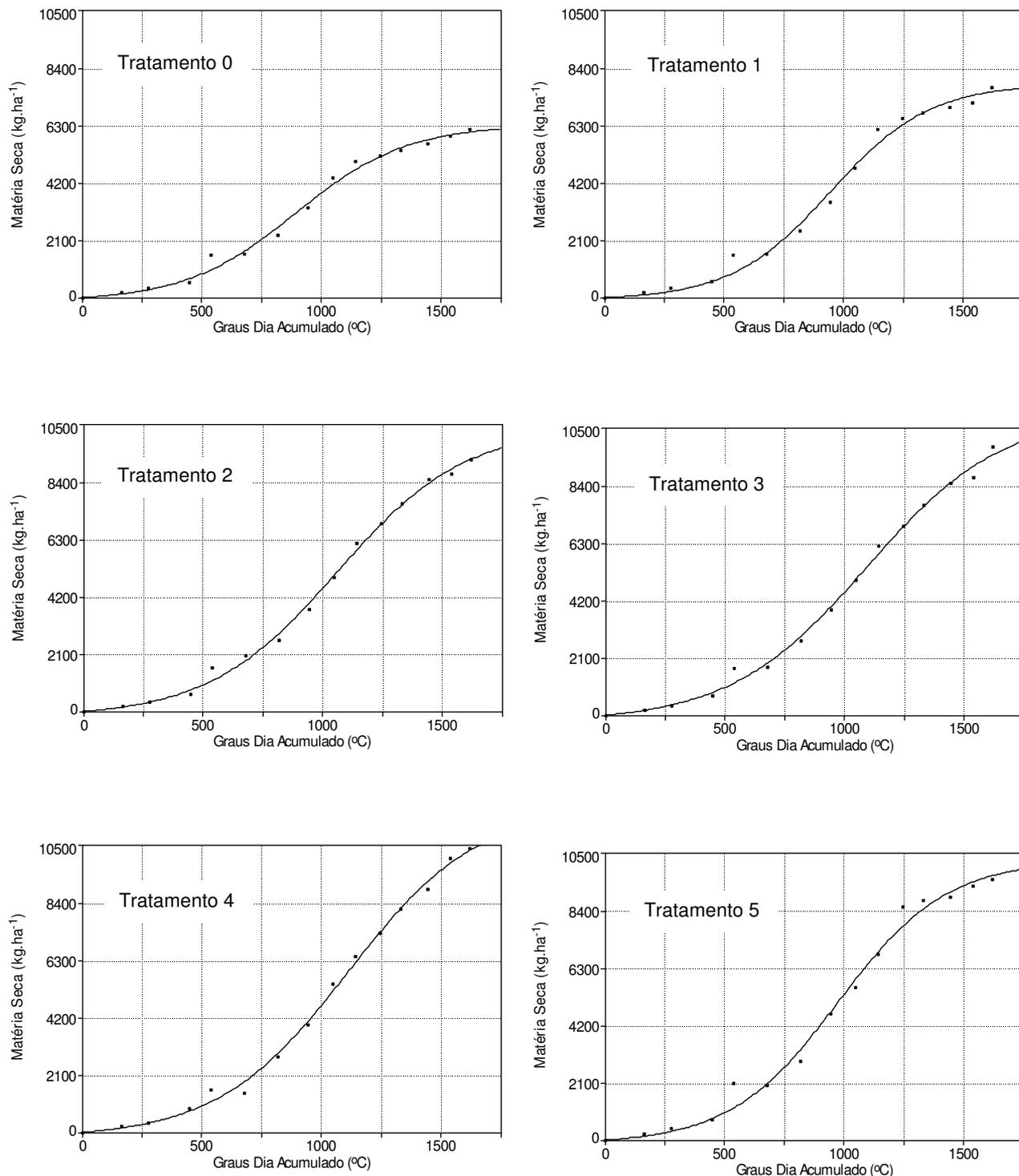
**Tabela 2.10** – Coeficientes *a*, *b*, *c*, *d* e o coeficiente de determinação *r*<sup>2</sup> para a variável matéria seca total (MST) em cada tratamento da cultura do feijão.

Tratamento	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>
<b>0</b>	-133,045	6441,762	893,397	231,510	0,997
<b>1</b>	34,145	7689,994	949,628	196,641	0,996
<b>2</b>	-189,781	10290,583	1045,814	263,131	0,998
<b>3</b>	-230,070	10954,975	1076,400	280,171	0,997
<b>4</b>	-225,248	12273,941	1116,616	280,591	0,999
<b>5</b>	-136,696	10360,362	976,201	226,250	0,996

De acordo com a Tabela 2.10, observou-se que a equação ajustou-se com elevados valores de coeficiente de determinação para todos os tratamentos testados.

A Figura 2.14 mostra o comportamento da MST em cada tratamento e sua relação com o acúmulo térmico ocorrido durante o ciclo da cultura do feijão.

De acordo com a Figura 2.14, observou-se que o comportamento da MST, em função do acúmulo térmico, pode ser demonstrado por uma curva sigmóide. Da mesma forma como ocorreu na cultura do milho, as estratégias de irrigação ocasionaram diferenças expressivas no acúmulo de MST nos diferentes tratamentos analisados, em especial nos Tratamento T0 (sem irrigação) e T1 (20% da Eto).



**Figura 2.14** – Matéria seca total (kg.ha<sup>-1</sup>) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no período para a cultura do feijão.

O maior acúmulo de MST ocorreu nos Tratamento T4 e T5 (9.808,8 kg.ha<sup>-1</sup> e 10.338,7 kg.ha<sup>-1</sup>), respectivamente, coincidindo com os máximos valores de IAF. Os menores valores obteve-se no Tratamentos T0 e T1 (6.539,1 e 7.682,3 kg.ha<sup>-1</sup>), que

pode ser confirmado em Apêndice IV, acumulando 1.519,5 °C.dia. Este fato confirma à grande sensibilidade da cultura do feijoeiro ao déficit hídrico (FIGUEIREDO et al., 2006).

Medeiros (1996) analisando o crescimento vegetativo do feijoeiro relacionados aos graus dia acumulados, encontraram para o período de 25 a 82 DAE um acúmulo térmico de 300 a 1.170 °C.dia acumulados. Os autores obtiveram relações altamente significativas entre a matéria seca total com os graus dia acumulados, porém fortemente afetadas por fatores mesológicos, como densidade de plantio, suprimento de água e temperatura.

### 2.3.5.3 Profundidade do sistema radicular

Os valores experimentais médios obtidos na determinação da profundidade do sistema radicular (cm) para as culturas do milho e do feijão em cada tratamento são apresentados em Apêndice V e VI.

A partir dos valores médios da profundidade do sistema radicular (cm) nos diferentes tratamentos, relacionou-se com acúmulo térmico (°C) do período e determinou-se o modelo de ajuste para cada uma das culturas em estudos e os coeficientes de cada tratamento. A equação que representa a relação entre as variáveis é expressa por  $y = a + \left( \frac{b}{1 + \exp\left(\frac{x - c}{d}\right)} \right)$ .

A Tabela 2.11 apresenta os coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e o coeficiente de determinação  $r^2$  do modelo ajustado.

**Tabela 2.11** – Coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e o coeficiente de determinação  $r^2$  para a variável profundidade do sistema radicular (Prz) em cada tratamento da cultura do milho.

Tratamento	$a$	$b$	$c$	$d$	$r^2$
0	-23,584	69,495	231,960	359,167	0,996
1	-31,959	86,493	199,291	387,308	0,995
2	-16,949	75,008	349,643	283,982	0,998
3	-36,045	96,938	177,798	347,191	0,993
4	-45,611	107,263	111,242	375,087	0,993
5	-52,807	107,573	15,534	382,731	0,992

De acordo com os valores obtidos na Tabela 2.11, observou-se que o modelo ajustou-se satisfatoriamente com coeficiente de determinação acima de 0,99.

A Figura 2.15 mostra a variação da profundidade do sistema radicular (Prz) nas diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no ciclo da cultura do milho.

De acordo com a Figura 2.15, observou-se que a curva de crescimento sigmoidal representa o crescimento do sistema radicular da cultura do milho.

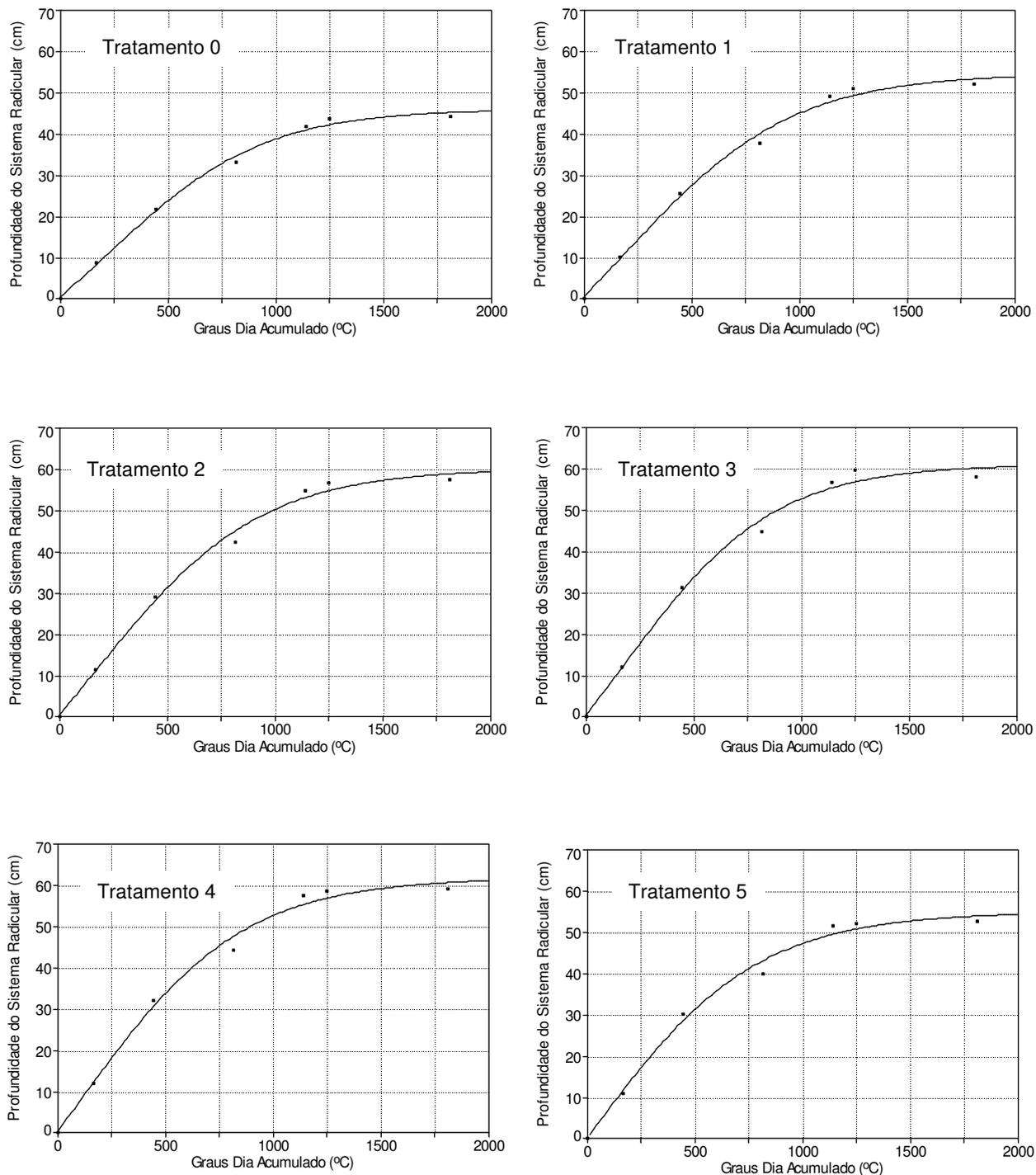
Resultados similares foram encontrados por Oliveira et al. (2000) que pesquisaram a forma da curva de crescimento radicular de três variedades (CMS-54, CMS-36 e POOL-18) da cultura do milho sob irrigação em condições de campo. Os autores encontraram pequenas diferenças em relação a profundidade atingida em cada variedade, e constataram que o milho apresentou um crescimento sigmoidal bem definido, com profundidades máximas de 68, 70 e 71 cm para as variedades descritas anteriormente.

Observou-se ainda, que o crescimento foi acentuado até os 1.040,60 °C por dia acumulados, ocorrido até os 78 DAE, aproximadamente (Apêndice V). Este período correspondeu ao estágio reprodutivo, quando os grãos das espigas encontravam-se com característica de grão leitoso. Após esta fase, ocorreu uma tendência de estabilização.

Os Tratamentos T2, T3 e T4 apresentaram uma Prz maior, com relação aos demais tratamentos e no Tratamento T0 a profundidade foi expressivamente reduzida, com relação aos demais. Isto demonstrou que deficiências hídricas ocasionam redução na profundidade do sistema radicular.

Machado & Furlani (1985) encontraram reduções de ordem de 50%, aproximadamente, no comprimento do sistema radicular de plantas de milho submetidas a deficiência hídrica, quando comparados a tratamentos irrigados.

De acordo com Reichardt (1990), a profundidade média máxima da cultura do milho é de 1 m, porém deve-se considerar que o experimento foi instalado em sistema de plantio direto, o que torna o solo mais compactado a profundidades abaixo dos 20 cm, dificultando a penetração do sistema radicular.



**Figura 2.15** – Profundidade do sistema radicular (cm) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no período para a cultura do milho.

De acordo com Saad (1991) a profundidade efetiva de raízes raramente ultrapassa 30 cm em regiões tropicais, podendo ir até abaixo de 1,0m em regiões de clima temperado.

Manfron et al. (1991) verificaram que em solo terra roxa estruturada, aos 71 dias após a semeadura de milho, cerca de 70 % do total da massa radicular até 1 m encontrava-se a 60 cm de profundidade. Barreto (1991) observou em um latossolo vermelho escuro que o sistema radicular do milho distribuiu-se em 78,11 e 11 % do total a 0-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade, respectivamente, e o fato do horizonte A3 (14-40 cm) ter apresentado certa compactação provavelmente contribuiu para a maior presença de raízes a 0-20 cm.

A Tabela 2.12 apresenta os coeficientes *a*, *b*, *c*, *d* e o coeficiente de determinação  $r^2$  do modelo ajustado.

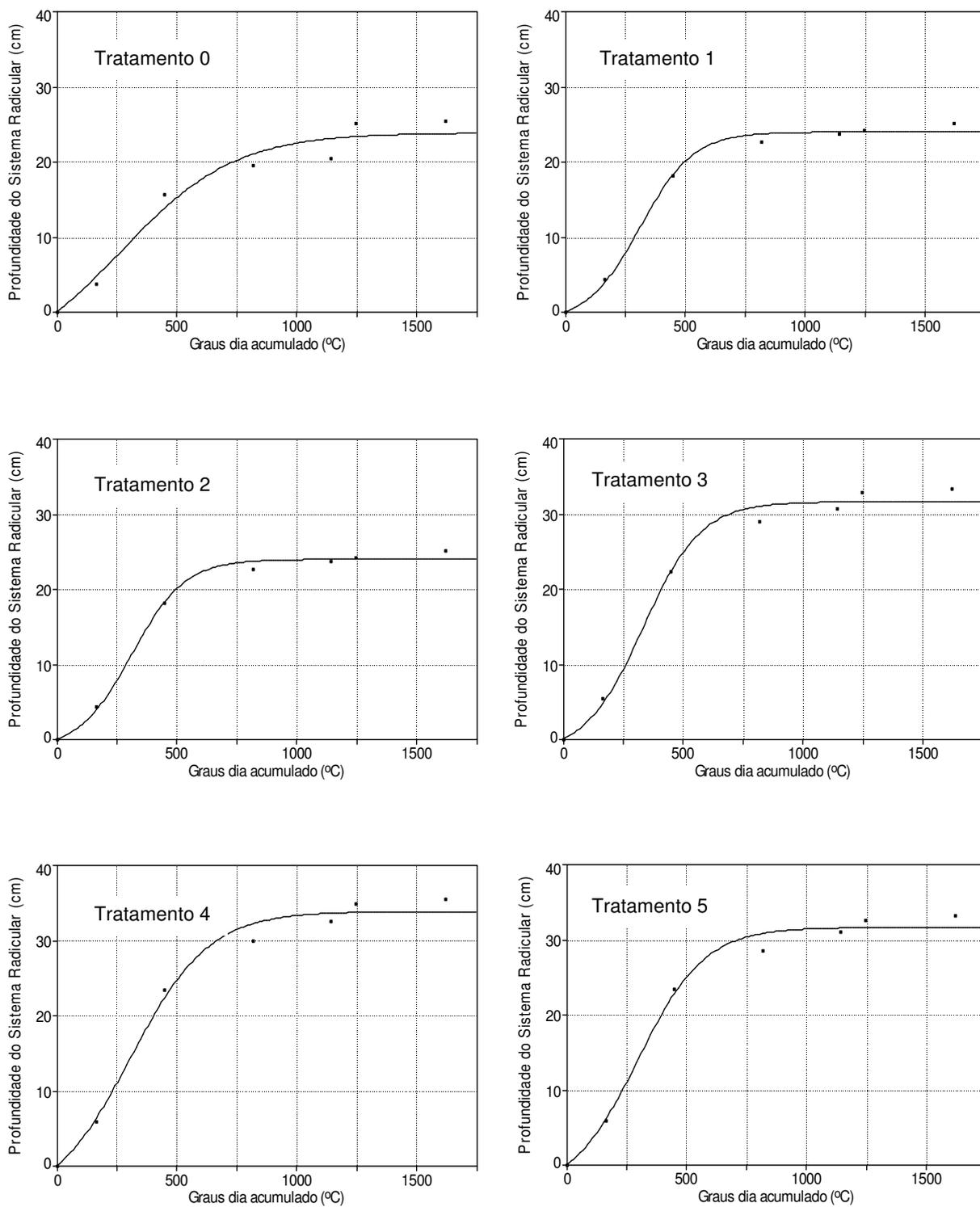
**Tabela 2.12** – Coeficientes *a*, *b*, *c*, *d* e o coeficiente de determinação  $r^2$  para a variável profundidade do sistema radicular (Prz) em cada tratamento da cultura do feijão.

Tratamento	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$r^2$
<b>0</b>	-5,279	28,736	303,323	203,383	0,991
<b>1</b>	-1,414	25,328	311,939	110,312	0,998
<b>2</b>	-3,275	32,168	312,340	143,453	0,998
<b>3</b>	-2,024	33,573	332,324	120,998	0,998
<b>4</b>	-5,122	38,920	307,278	162,848	0,997
<b>5</b>	-3,679	35,238	297,302	138,343	0,998

Pela Tabela 2.12, observa-se boa aderência do modelo ajustado para expressar a relação funcional entre a soma térmica e a variação da profundidade do sistema radicular. Os valores do coeficiente de determinação para cada tratamento mostraram a adequada correlação do modelo aos dados observados.

A Figura 2.16 ilustra a variação da Prz nas diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no ciclo da cultura do feijão.

Analisando a Figura 2.16, observou-se que o sistema radicular da cultura do feijão apresentou um crescimento acentuado até os 1.040,0 °C por dia acumulados, aos 78 DAE, aproximadamente (Apêndice VI). Após esta fase, ocorreu uma tendência de estabilização. Os Tratamentos T3, T4 e T5 apresentaram uma Prz maior, com relação aos demais tratamentos.



**Figura 2.16** – Profundidade do sistema radicular (cm) média para as diferentes estratégias de irrigação e sua relação com os graus dias acumulados no período para a cultura do feijão.

Observou-se ainda, que a profundidade média máxima foi de 35,36 cm aos 117 DAE (Apêndice VIII). De acordo com Reichardt (1990), apesar do sistema radicular do feijoeiro poder atingir a profundidade de até 1 m, torna-se bastante superficial (80% a 90% nos primeiros 25 cm). Desta forma o autor destaca a resposta da cultura a frequentes irrigações.

Pires et al. (1991) em estudo sobre profundidade do sistema radicular da cultura do feijão encontraram profundidade efetiva do sistema radicular de 30 cm onde encontraram mais de 80% das raízes finas. Infrozatto & Miyasaka (1963) encontraram cerca de 97% das raízes de feijoeiro a profundidade de 20 cm.

#### 2.3.5.4 Componentes de produção de grãos, produção de grãos e matéria seca total

Foram utilizados para os cálculos 10 plantas de cada tratamento ao final do ciclo de 137 dias após a emergência (DAE) para a cultura do milho e 117 dias após a emergência (DAE) para a cultura do feijão.

A Tabela 2.13 apresenta os valores médios dos componentes de produção, matéria seca total e índice de colheita (IC) para a cultura do milho aos 137 DAE em cada estratégia de irrigação.

**Tabela 2.13** – Valores médios dos componentes de produção, matéria seca total e índice de colheita (IC) para a cultura do milho aos 137 DAE.

Tratamento	NE	NGR	PMG	PPGRÃO	PPTOTAL	IC
<b>0</b>	1	379,55	0,24	91,09	234,66	0,39
<b>1</b>	1	386,63	0,26	100,52	271,79	0,37
<b>2</b>	1	439,12	0,30	131,74	327,82	0,40
<b>3</b>	1	479,05	0,32	153,30	366,88	0,42
<b>4</b>	1	484,68	0,33	159,94	374,37	0,43
<b>5</b>	1	497,40	0,34	169,12	390,20	0,43
<b>Média</b>	<b>1,00</b>	<b>444,41</b>	<b>0,30</b>	<b>134,28</b>	<b>327,62</b>	<b>0,41</b>
<b>DP</b>	<b>0,00</b>	<b>51,39</b>	<b>0,04</b>	<b>32,39</b>	<b>62,29</b>	<b>0,02</b>
<b>CV (%)</b>		<b>11,65</b>	<b>13,33</b>	<b>24,53</b>	<b>19,01</b>	<b>4,87</b>

Através da Tabela 2.13, observou-se, que o aumento da lâmina de irrigação elevou os valores dos componentes de produção, com máximos valores encontrados nos Tratamentos T4 e T5.

Resultados similares de número de grãos por espiga e peso médio do grão (g) foram encontrados por Bernardon (2005) trabalhando com milho irrigado cultivar AG 9020 e P32R21 em Palmeira das Missões, RS, onde foram obtidos valores médios de número de grãos por espiga de 325,00 a 525,75 e 414,75 a 533,75, respectivamente; massa seca média do grão de 0,30 g a 0,36 g e 0,27 g a 0,38 g , respectivamente, aos 144 dias após a emergência (DAE).

Parizi (2007) trabalhando com milho irrigado na região de Santiago, RS, apresentou valores máximos de massa seca dos grãos por planta e matéria seca total iguais a 134,61 g e 255,15 g, respectivamente. A autora verificou uma redução no peso dos grãos, na matéria seca total e no índice de colheita, nos tratamentos submetidos a lâminas de irrigação de 0% e 20% da Eto, que foi decorrente da deficiência de água no solo.

O IC médio encontrado foi 0,40. Os maiores valores de IC foram encontrados nos tratamentos 3, 4 e 5 (0,42, 0,43 e 0,43), coincidindo com as maiores produções de matéria seca total. Estes valores estão na faixa encontrada por Doorenbos & Kassam (1994), sendo que Silva et al. (2008) trabalhando com diferentes manejos de irrigação em milho, encontraram valores de IC que variaram de 0,25 a 0,47.

Para Fancelli (2000) o IC máximo para a cultura do milho encontra-se próximo de 0,52, em regiões de clima temperado e/ou elevada latitude. Durães et al. (1993) citam que o IC é maior nos materiais precoces.

A partir dos dados da Tabela 2.13, para cada estratégia de irrigação, foi estimada a produção de grãos e de matéria seca total, através das equações 3.5 e 3.6. A Tabela 2.14 apresenta estes valores.

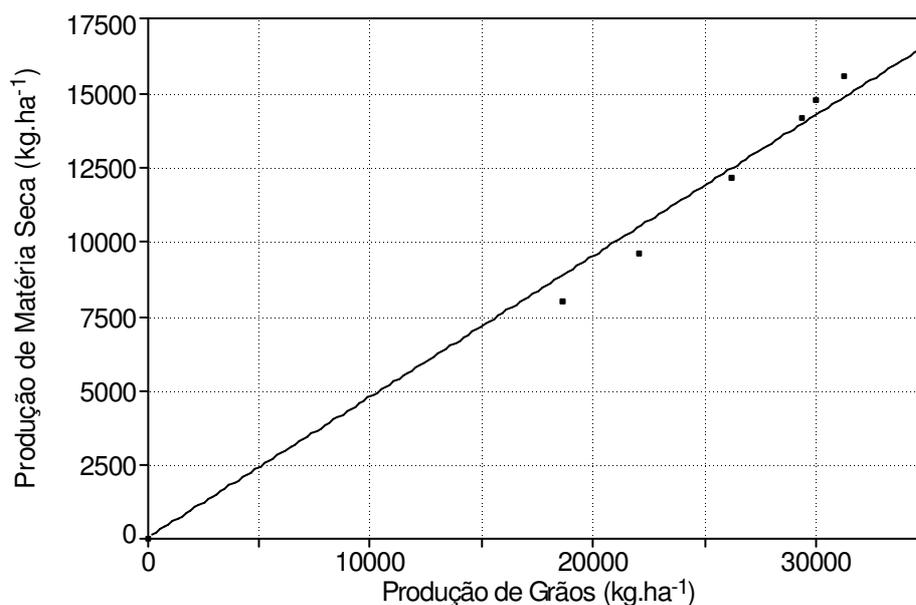
**Tabela 2.14** – Produção de matéria seca total ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) em cada estratégia de irrigação para a cultura do milho.

Tratamento	Volume Total de Água (precipitação e Irrigação) (mm)	Produção ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )	
		Matéria Seca	Grãos
0	413,00	18648,16	7956,97
1	456,44	22034,70	9578,28
2	499,89	26225,28	12113,66
3	543,33	29350,08	14096,18
4	586,77	29949,95	14707,53
5	630,22	31215,68	15550,90
<b>Média</b>		<b>26237,31</b>	<b>12333,92</b>
<b>D.P.</b>		<b>4970,20</b>	<b>3029,47</b>
<b>CV (%)</b>		<b>18,94</b>	<b>24,56</b>

Através da Tabela 2.14 observou-se que a menor produção de grãos verificada foi de 7.956,97 kg.ha<sup>-1</sup>, que corresponde ao Tratamento T0, onde não ocorreu irrigação suplementar. A maior produção de grãos foi de 15.550,90 kg.ha<sup>-1</sup>, que corresponde ao Tratamento T5 onde foi aplicado 217,22 mm de irrigação suplementar, tendo um total de 630,22 mm de água com a precipitação mais a irrigação. A produção de matéria seca total seguiu a mesma tendência. As menores produções obtidas evidenciam a ocorrência de deficiência hídrica (T0 e T1).

A maior produção de grãos encontrada está muita acima da média Nacional e da média do Estado do RS. No entanto, Sangoi et al. (2003) relata, que, em condições experimentais e em lavouras bem conduzidas tecnicamente, inclusive com utilização de irrigação suplementar, tem-se obtido rendimentos muito superiores às médias obtidas no Estado do RS, com valores superiores a 15 t.ha<sup>-1</sup>. As diferenças existentes entre os rendimentos de grãos obtidos em condições experimentais e as médias registradas no Estado em lavouras, podem ser atribuídas a vários fatores, destacando-se entre eles a ocorrência de deficiência hídrica durante o período crítico de desenvolvimento da cultura, desuniformidade da área (fertilidade e condições físicas do solo, sendo a compactação em especial), aplicação de tratos culturais e umidade irregular do solo (zonas altas e baixas de lavoura). (MUNDSTOCK & SILVA, 2005).

A relação entre a produção de grãos e a produção de matéria seca é apresentada na Figura 2.17. A equação que representa a relação as variáveis é expressa por  $y = a + b \cdot x$ , seguida dos coeficientes  $a = - 0,00063$ ,  $b = 0,474$  e coeficiente de determinação ( $r^2$ ) = 0,997.



**Figura 2.17** – Relação entre a produção de grãos e a produção de matéria seca na cultura do milho.

A Tabela 2.15 apresenta os valores médios dos componentes de produção, matéria seca total e índice de colheita (IC) para a cultura do feijão aos 117 DAE.

**Tabela 2.15** – Valores médios dos componentes de produção, matéria seca total e índice de colheita (IC) para a cultura do feijão aos 117 DAE.

<b>Tratamento</b>	<b>NVG</b>	<b>NGR</b>	<b>PMG</b>	<b>PPGRÃO</b>	<b>PPTOTAL</b>	<b>IC</b>
<b>0</b>	12,40	4,49	0,20	11,14	38,47	0,29
<b>1</b>	14,02	4,66	0,21	13,72	45,19	0,30
<b>2</b>	14,20	4,68	0,24	15,95	50,78	0,31
<b>3</b>	15,40	4,93	0,24	18,22	53,53	0,34
<b>4</b>	15,59	5,37	0,25	20,93	55,82	0,37
<b>5</b>	15,62	5,37	0,25	20,97	58,25	0,36
<b>Média</b>	<b>14,54</b>	<b>4,92</b>	<b>0,23</b>	<b>16,82</b>	<b>50,34</b>	<b>0,33</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,26</b>	<b>0,38</b>	<b>0,02</b>	<b>3,97</b>	<b>7,36</b>	<b>0,03</b>
<b>CV (%)</b>	<b>8,66</b>	<b>7,72</b>	<b>8,70</b>	<b>23,60</b>	<b>14,62</b>	<b>9,09</b>

De acordo com a Tabela 2.15, observa-se que o Tratamento T5 apresentou os valores mais elevados para a maioria dos componentes de produção, com exceção do número de grãos por vagem. Os menores valores de componentes de produção, foram evidenciados nos Tratamentos T0 e T1.

A média obtida para número de vagens por planta está de acordo com a média que a cultivar IPR88 Uirapuru apresenta (15,54) (IAPAR, 2008). Já os resultados de número de grãos por vagem, estão abaixo da média que a cultivar apresenta (6,2) (IAPAR, 2008) e semelhantes aos encontrados por Robaina (1992) em trabalho com feijão, cultivar Carioca, que obteve para estes parâmetros (número de grãos.vagem<sup>-1</sup> e peso médio do grão) média de 4,40 g e 0,2 g, respectivamente.

O índice de colheita (IC) apresentou uma média de 0,33. Os valores encontrados estão de acordo com os de Snyder & Carlson (1984). Santi et al. (2006) verificaram índices de colheita de 0,41 e 0,46 para a cultivar TPS Nobre e Pérola, respectivamente.

A partir dos dados na Tabela 2.15 foi estimada a produção de grãos e de matéria seca total, através das equações 2.14 e 2.15 para cada estratégia de irrigação. A Tabela 2.16 apresenta estes valores.

**Tabela 2.16** – Produção de matéria seca total (kg.ha<sup>-1</sup>) e produção de grãos (kg.ha<sup>-1</sup>) em cada estratégia de irrigação para a cultura do feijão.

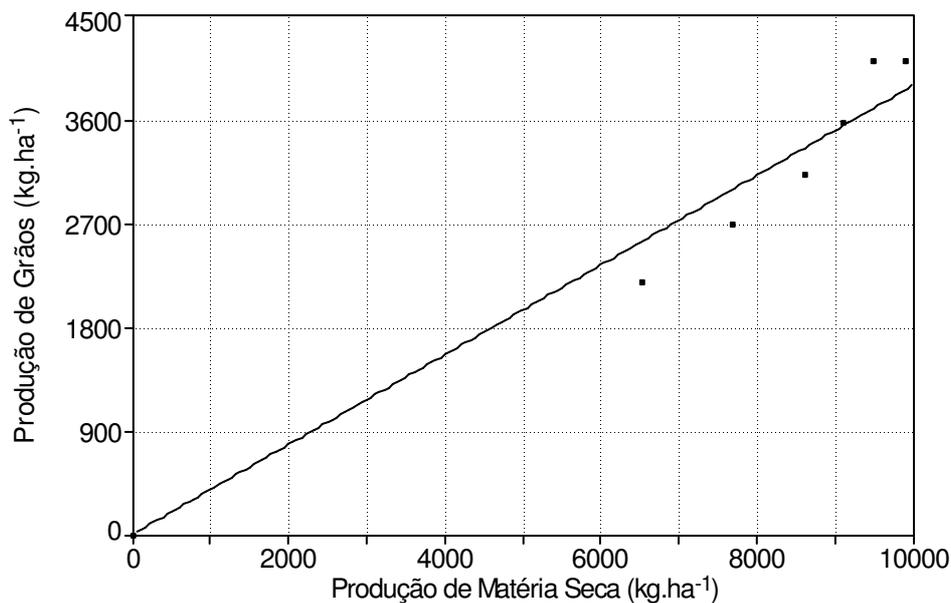
Tratamento	Volume Total de Água (precipitação e Irrigação) (mm)	Produção (kg.ha <sup>-1</sup> )	
		Matéria Seca	Grãos
<b>0</b>	398	6539,08	2175,84
<b>1</b>	434,84	7682,30	2680,91
<b>2</b>	471,69	8632,50	3116,56
<b>3</b>	508,53	9100,32	3560,48
<b>4</b>	545,37	9489,33	4089,69
<b>5</b>	582,22	9902,47	4097,56
<b>Média</b>		<b>8557,67</b>	<b>3286,84</b>
<b>DP</b>		<b>1250,40</b>	<b>775,52</b>
<b>CV (%)</b>		<b>14,61</b>	<b>23,60</b>

Através da Tabela 2.16, observa-se que a maior produção (grãos e matéria seca total) foram obtidos nos tratamentos T4 e T5. Menores valores de produção obteve-se nos tratamentos T0 e T1.

A elevada produtividade obtida pode ser explicada pelo elevado potencial produtivo da cultivar de 3.759,00 kg.ha<sup>-1</sup> (IAPAR, 2008), aliado ao adequado suprimento hídrico. Ramos Junior et al. (2005) e Farinelli et al. (2005) estudaram o desempenho agrônômico de cultivares do grupo comercial de feijoeiro e obtiveram

para o melhor desempenho, lavouras com  $4.758 \text{ kg.ha}^{-1}$  e pior desempenho com  $2.251 \text{ kg.ha}^{-1}$ .

A relação entre a produção de grãos e a produção de matéria seca é apresentada na Figura 2.18. A equação que representa a relação das variáveis é expressa por  $y = a + b \cdot x$ , seguida dos coeficientes  $a = -0,0002$ ,  $b = 0,388$  e coeficiente de determinação ( $r^2$ ) = 0,992.



**Figura 2.18** – Relação entre a produção de grãos e a produção de matéria seca na cultura do feijão.

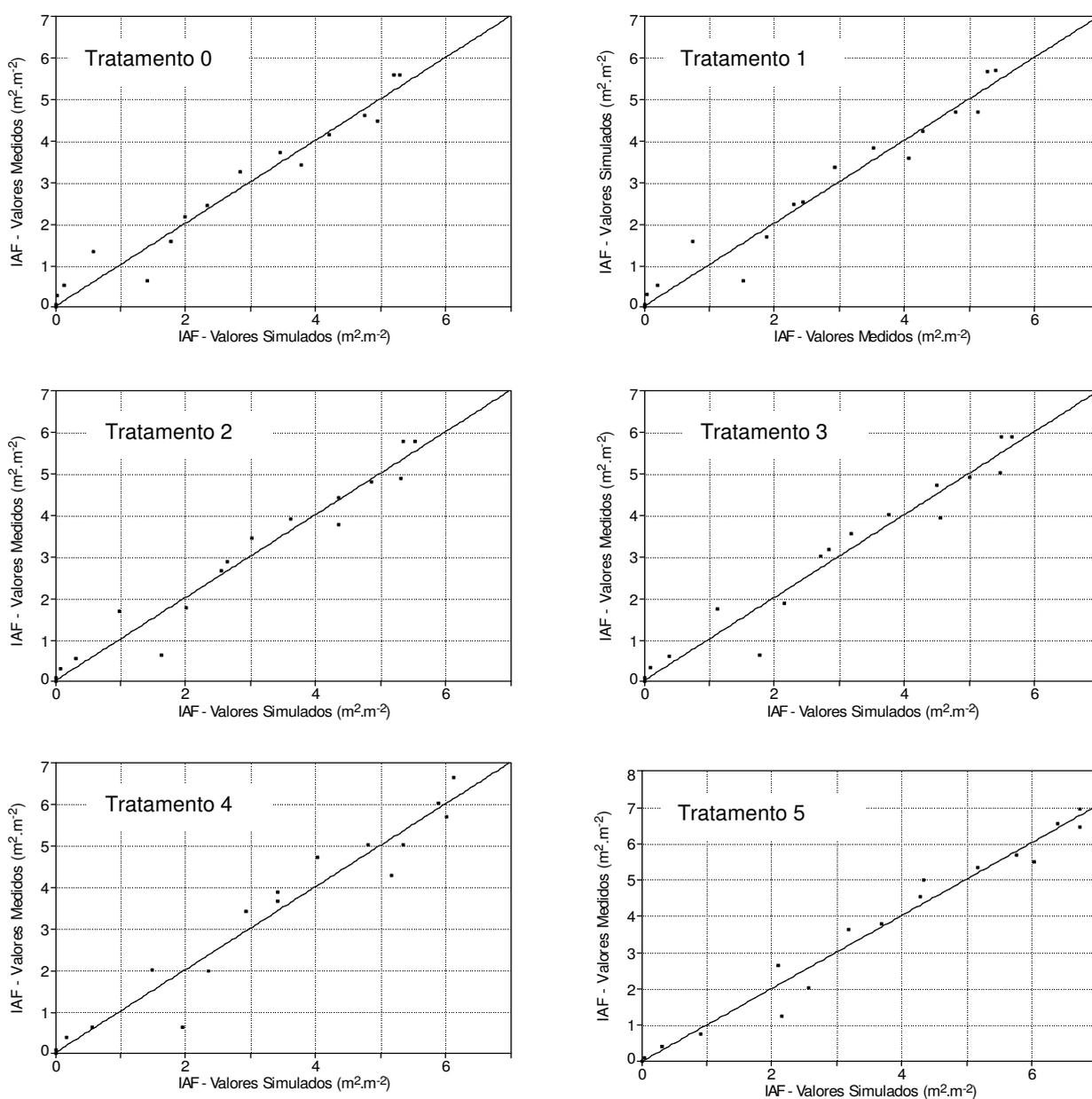
### 2.3.6 Resultados simulados de índice de área foliar (IAF), matéria seca total (MST) e profundidade do sistema radicular (Prz)

A partir das equações ajustadas para IAF, MST e Prz e suas relações com o acúmulo térmico do período realizou-se as simulações matemáticas e comparou-se os resultados obtidos no experimento de campo com os resultados obtidos pela simulação para ambas as culturas, milho e feijão. Foi utilizada a regressão linear  $y = a + b \cdot x$ , onde  $x$  correspondeu aos valores simulados e  $y$  aos valores experimentais obtidos no campo, com a finalidade de se obter o coeficiente de correlação  $r$ . A seguir são apresentados os resultados obtidos.

### 2.3.6.1 Índice de área foliar

Os valores médios simulados obtidos na determinação do índice de área foliar para cada cultura, em cada tratamento são apresentados em Apêndice VII e VIII.

A Figura 2.19 apresenta o ajuste entre os dados de IAF obtidos no experimento de campo e os dados de IAF simulados para a cultura do milho.



**Figura 2.19** – Valores de índice de área foliar ( $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$ ) medidos no experimento de campo em relação aos valores de índice de área foliar ( $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$ ) simulados para a cultura do milho.

Analisando a Figura 2.19, observou-se a eficiência do modelo na estimativa do IAF. Isso ficou evidenciado no ajuste entre os pontos dos valores medidos e dos valores simulados, gerando coeficientes de determinação ( $r^2$ ) superiores a 0,981 em todos os tratamentos.

A Tabela 2.17 apresenta os coeficientes  $a$ ,  $b$  e o coeficiente de determinação  $r^2$  obtidos na regressão linear.

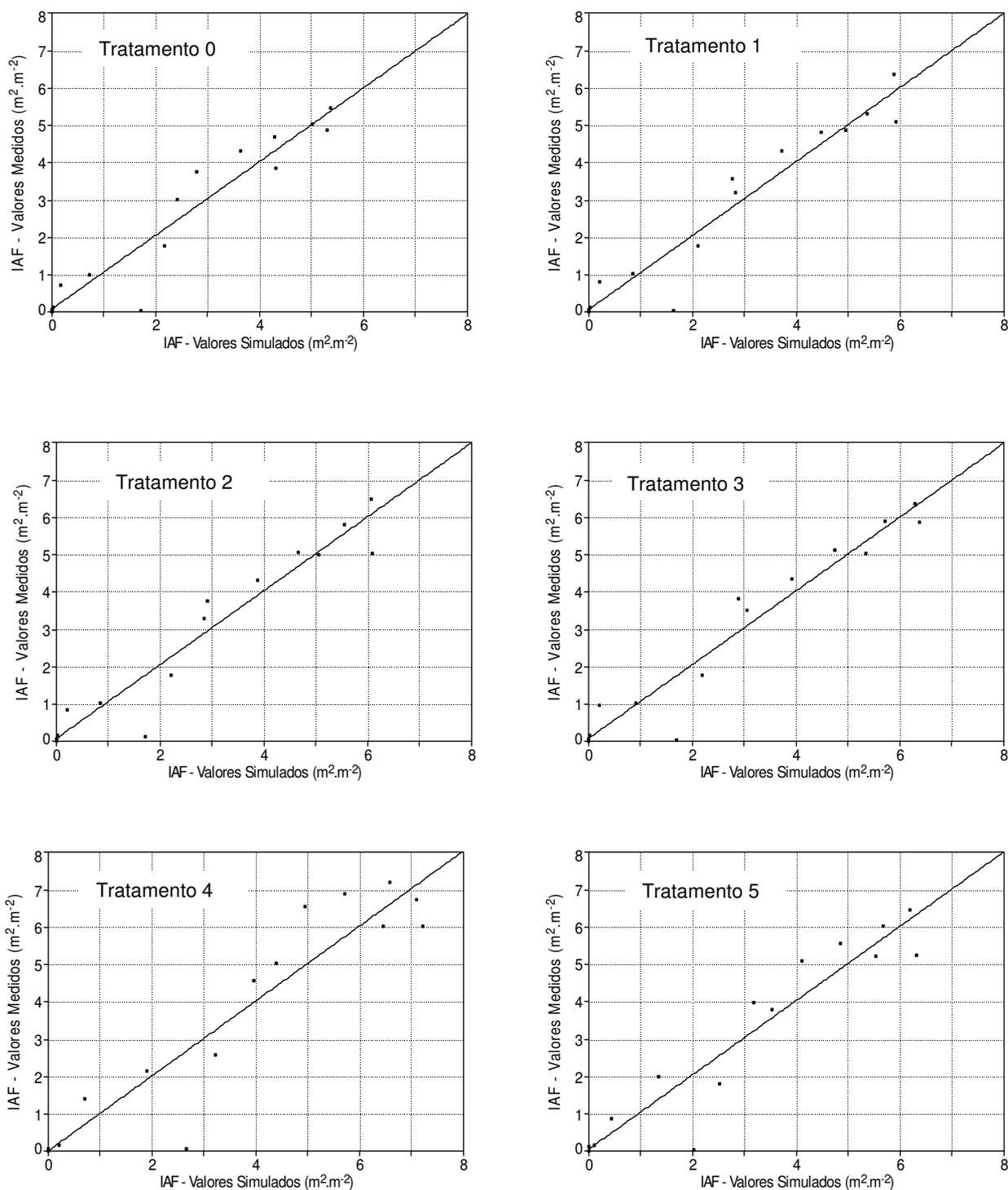
**Tabela 2.17** – Coeficientes  $a$ ,  $b$  e o coeficiente de determinação  $r^2$  da regressão linear dos valores de IAF simulados em relação aos valores de IAF obtidos no experimento de campo para a cultura do milho.

Tratamento	$a$	$b$	$r^2$
0	7,984e-06	1,000	0,986
1	6,844e-06	1,000	0,985
2	4,928e-11	1,000	0,985
3	3,744e-07	1,000	0,985
4	1,477e-07	1,000	0,981
5	-1,480e-07	1,000	0,991

Observa-se que os coeficientes encontrados responderam adequadamente ao ajuste proposto. Para Wolschick et al. (2007), quanto mais eficiente for o modelo em estimar os valores de IAF ao longo do tempo, mais realista será a simulação da assimilação de  $CO_2$ , melhorando o desempenho do modelo em estimar o acúmulo de matéria seca na planta.

A Figura 2.20 mostra relação entre os valores de IAF medidos no experimento de campo e os valores de IAF simulados na cultura do feijão.

Analisando a Figura 2.20, observou-se que o ajuste entre os pontos medidos e simulados foi elevado para todos tratamentos. Houve uma subestimativa do IAF simulado durante o período vegetativo, até aproximadamente o início da floração (44 DAE), com posteriores oscilações de superestimativa e subestimativa no decorrer do ciclo para todos os tratamentos.



**Figura 2.20** – Valores de índice de área foliar ( $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$ ) medidos no experimento de campo em relação aos valores de índice de área foliar ( $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$ ) simulados para a cultura do feijão.

A Tabela 2.18 apresenta os coeficientes  $a$ ,  $b$  e o coeficiente de determinação  $r^2$  obtidos na regressão linear.

**Tabela 2.18** – Coeficientes  $a$ ,  $b$  e o coeficiente de determinação  $r^2$  da regressão linear dos valores de IAF simulados e dos valores de IAF obtidos no experimento de campo para a cultura do feijão.

<b>Tratamento</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b><math>r^2</math></b>
<b>0</b>	0,057	0,986	0,909
<b>1</b>	0,041	0,991	0,928
<b>2</b>	0,048	0,989	0,926
<b>3</b>	0,054	0,987	0,937
<b>4</b>	-0,017	1,003	0,873
<b>5</b>	0,027	0,994	0,898

Através da Tabela 2.18 é possível evidenciar que a regressão linear resultou em valores elevados de coeficiente de determinação.

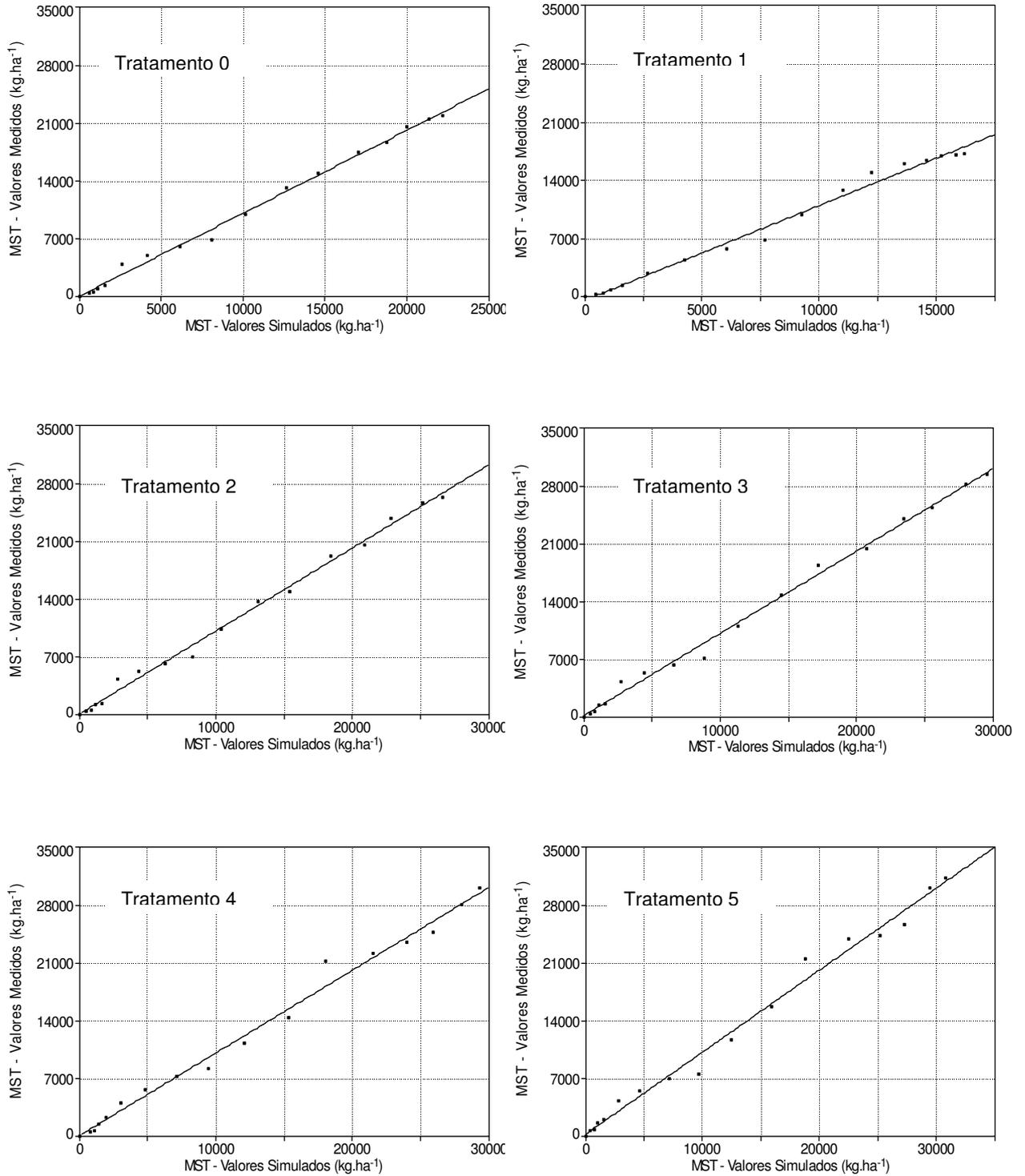
Meireles & Pereira (2001) utilizaram o modelo Cropgro-drybean para simular o crescimento e desenvolvimento do feijoeiro sob sequeiro. Os autores compararam o IAF simulado pelo modelo com o medido em experimento de campo e encontraram ajuste satisfatório, com  $r^2 = 0,84$ .

#### 2.3.6.2 Matéria seca

Os valores médios simulados obtidos na determinação de matéria seca total (MST) para a cultura do milho e para a cultura do feijão em cada tratamento são apresentados em Apêndice XI e XII.

A Figura 2.21 mostra relação entre os valores de MST medidos no experimento de campo e os valores de MST simulados na cultura do milho.

Observou-se através da Figura 2.21 que o modelo prediz adequadamente o MST aérea, que pode ser comprovado pelos valores dos coeficientes obtidos na regressão linear (Tabela 2.19).



**Figura 2.21** – Valores de matéria seca total ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) medidos no experimento de campo em relação aos valores de matéria seca total ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) simulados para a cultura do milho.

**Tabela 2.19** – Coeficientes  $a$ ,  $b$  e o coeficiente de determinação  $r^2$  da regressão linear dos valores de matéria seca simulados em relação aos valores de matéria seca obtidos no experimento de campo para a cultura do milho.

<b>Tratamento</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b><math>r^2</math></b>
<b>0</b>	-523,110	1,138	0,990
<b>1</b>	-38,839	1,002	0,995
<b>2</b>	-17,164	1,004	0,995
<b>3</b>	106,777	0,994	0,995
<b>4</b>	-9,899	1,000	0,989
<b>5</b>	172,164	0,992	0,989

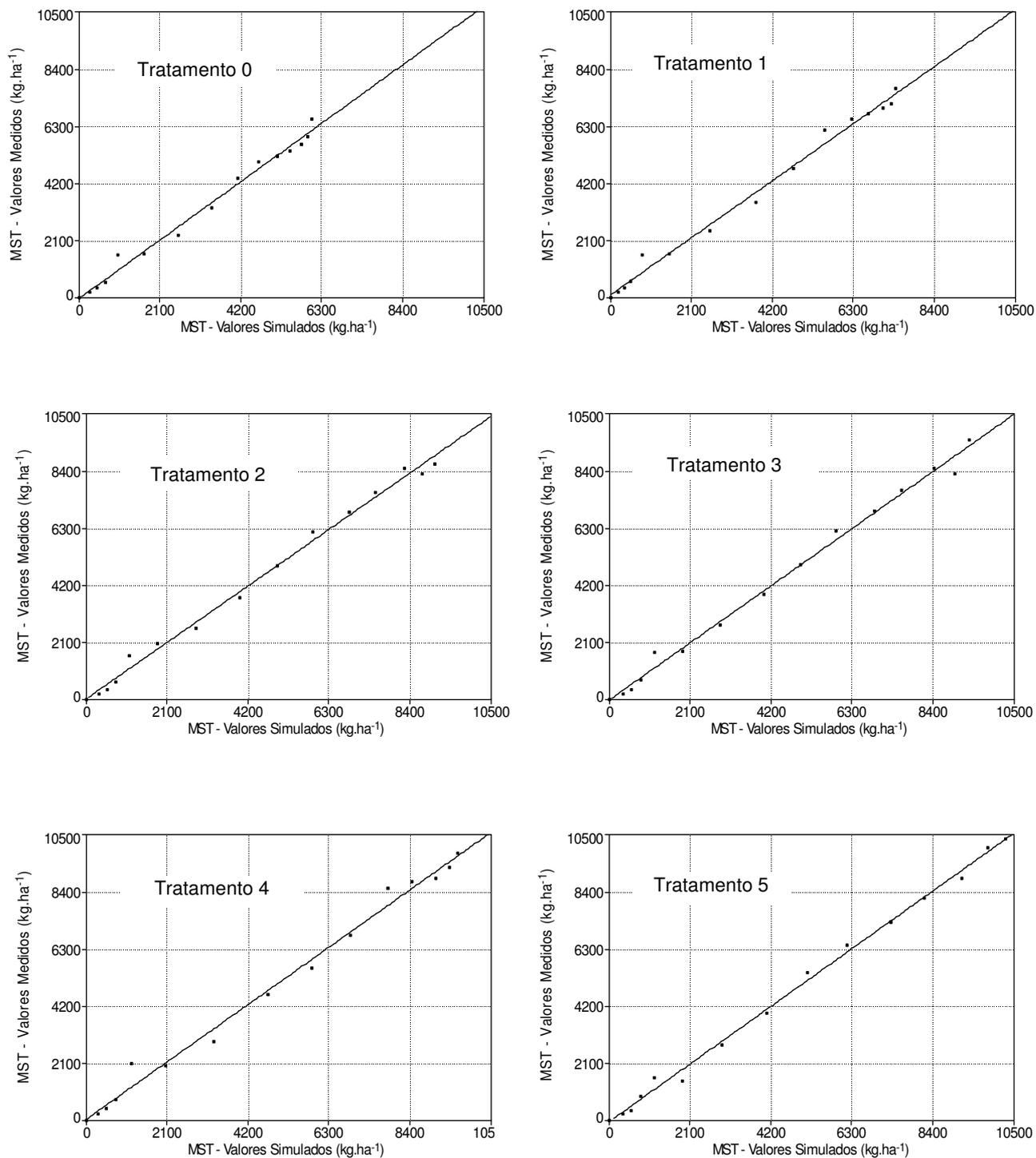
A Tabela 2.19 demonstrou elevados valores de coeficiente de regressão.

Dourado Netto et al. (2005) apresentaram modelos matemáticos fisiológicos para estimar o acúmulo de matéria seca nos diferentes órgãos da parte aérea do milho. Adotaram a soma térmica (graus dia acumulado) da cultura como variável independente e a matéria seca (colmo, folha, pendão, espiga) como variável dependente. Os modelos propostos foram precisos na estimativa do acúmulo de matéria seca nos diversos órgãos da parte aérea das plantas de milho.

Souza et al. (2007) ajustaram um modelo mecanístico (modelo expolinear) utilizando as variáveis graus dia e dias após a semeadura, para simular a produção matéria seca da cultura do milho sob diferentes sistemas de plantio nas condições do semi-árido nordestino. Os autores concluíram que, os modelos obtidos podem ser usados para simular o crescimento das plantas com elevado grau de precisão (coeficiente de determinação superior a 0,99).

A Figura 2.22 mostra relação entre os valores de matéria seca medidos no experimento de campo e os valores de matéria seca simulados para a cultura do feijão.

Através da Figura 2.22 notou-se que o modelo simulou satisfatoriamente os dados de MST, ocorrendo pequenas oscilações na estimativa.



**Figura 2.22** – Valores de matéria seca total ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) medidos no experimento de campo em relação aos valores de matéria seca total ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) simulados para a cultura do feijão.

A Tabela 2.20 apresenta os coeficientes  $a$ ,  $b$  e o coeficiente de determinação  $r^2$  obtidos na regressão linear.

**Tabela 2.20** – Coeficientes  $a$ ,  $b$  e o coeficiente de determinação  $r^2$  da regressão linear dos valores de matéria seca simulados e dos valores de matéria seca obtidos no experimento de campo para a cultura do feijão.

<b>Tratamento</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b><math>r^2</math></b>
<b>0</b>	-54,285	1,021	0,988
<b>1</b>	83,826	0,997	0,990
<b>2</b>	-0,549	0,987	0,993
<b>3</b>	-36,881	0,998	0,993
<b>4</b>	19,869	1,002	0,990
<b>5</b>	-71,475	1,008	0,996

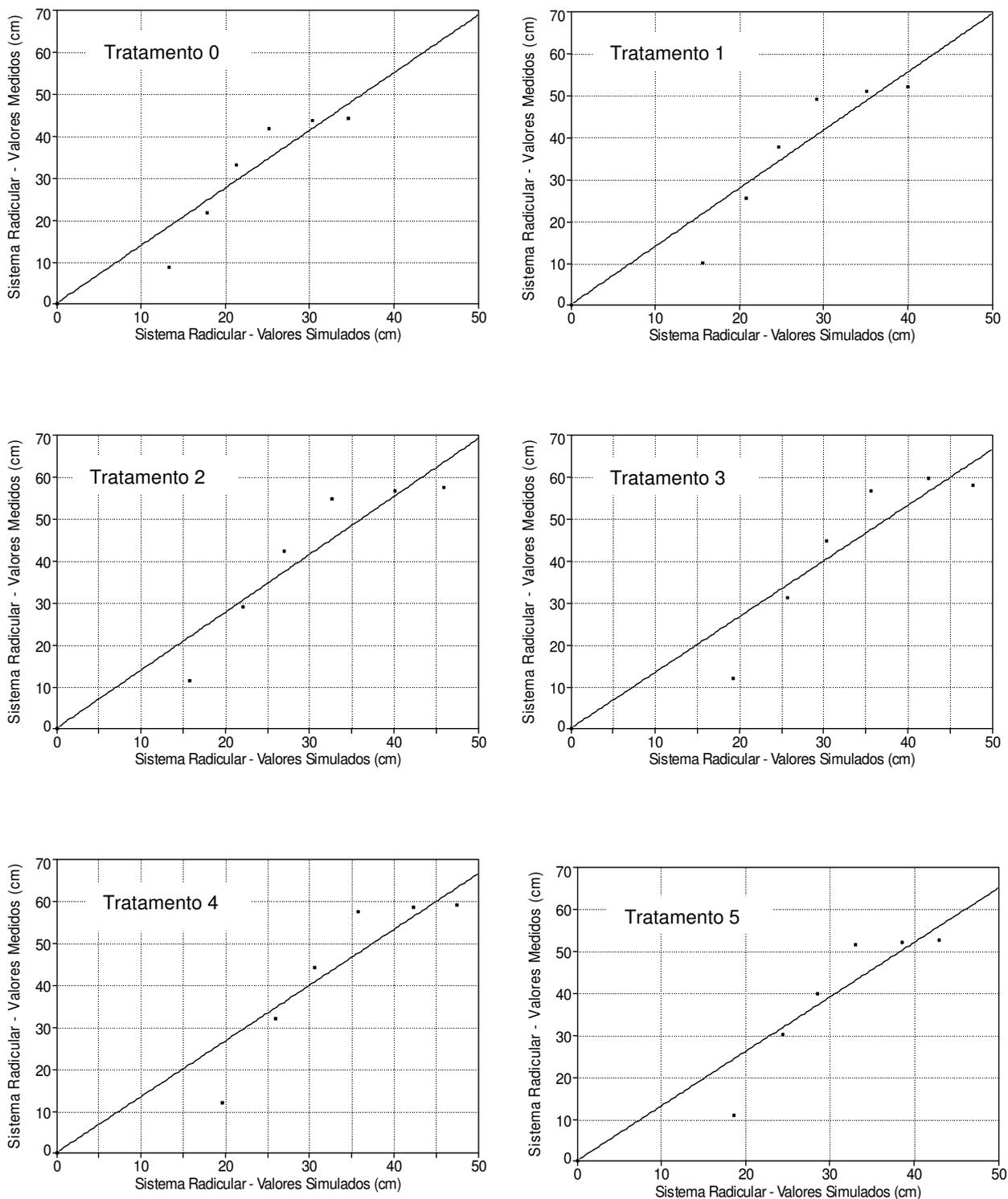
A Tabela 2.20 mostrou que a regressão linear resultou em valores elevados de coeficiente de determinação.

Meireles & Pereira (2001), compararam a MST simulada com a observada para o feijoeiro sob sequeiro, onde encontraram ajuste satisfatório de  $r^2 = 0,97$ .

#### 2.3.6.3 Profundidade do sistema radicular

Os valores médios simulados obtidos na determinação da Prz da cultura do milho e do feijão em cada tratamento são apresentados em Apêndice XII e XIII.

A Figura 2.23 mostra a relação entre os valores de Prz medidos no experimento de campo e os valores de profundidade do sistema radicular simulados para o milho.



**Figura 2.23** – Valores de profundidade do sistema radicular (cm) medidos no experimento de campo em relação aos valores de profundidade do sistema radicular (cm) simulados para a cultura do milho.

A Figura 2.23, da mesma forma que os demais parâmetros testados, apresenta um adequado ajuste entre os valores comparados, que pode ser comprovado na Tabela 2.21.

**Tabela 2.21** – Coeficientes  $a$ ,  $b$  e o coeficiente de determinação  $r^2$  da regressão linear dos valores de profundidade do sistema radicular simulados e dos valores de profundidade do sistema radicular obtidos no experimento de campo para a cultura do milho.

Tratamento	A	b	$r^2$
0	-2,687	1,477	0,909
1	-3,410	1,501	0,912
2	-1,798	1,433	0,918
3	-3,651	1,429	0,907
4	-3,961	1,438	0,907
5	-3,708	1,409	0,905

A Tabela 2.21 demonstrou que a regressão linear resultou em valores elevados coeficiente de determinação, ajustando-se desta forma ao modelo proposto.

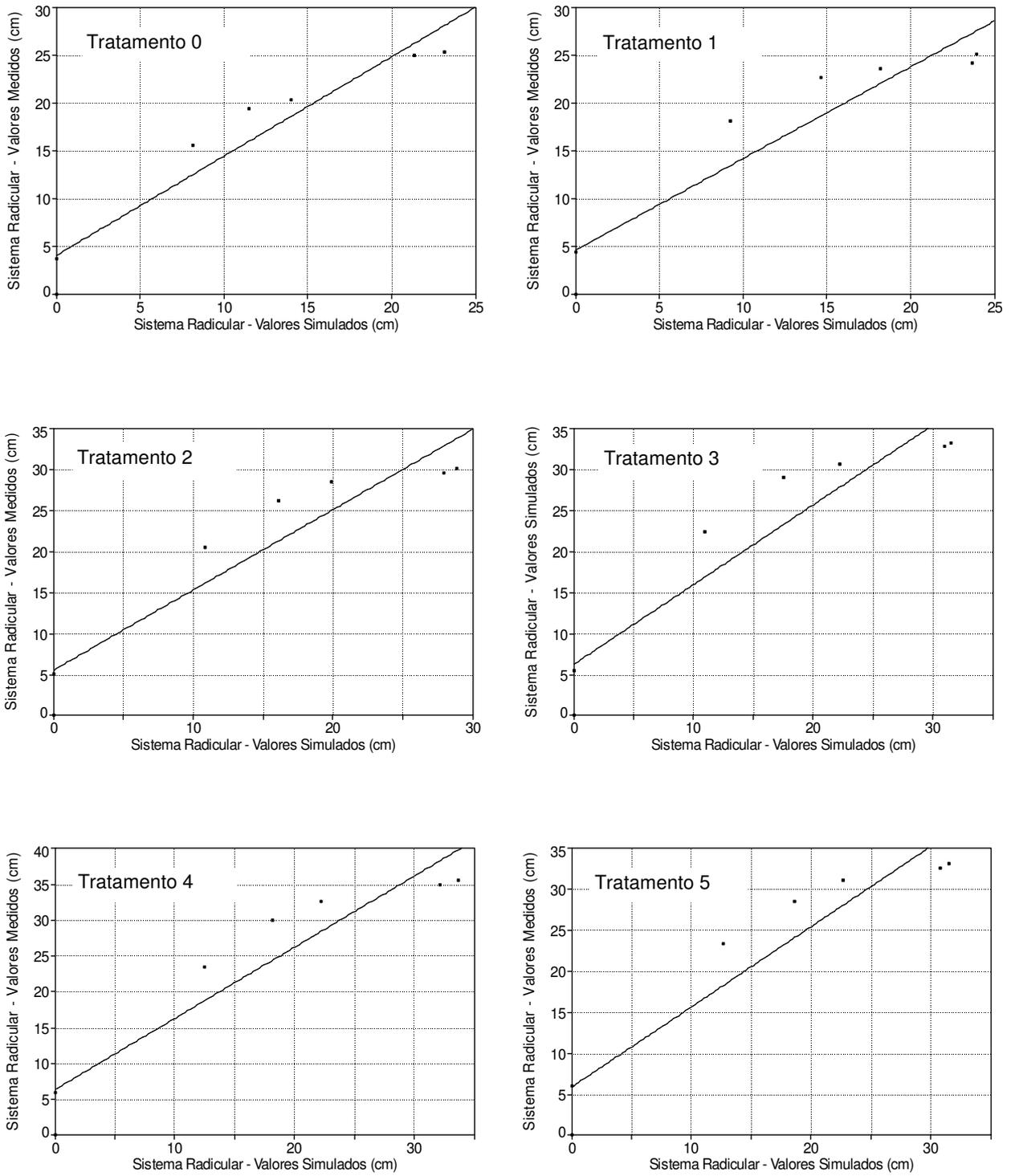
Oliveira et al. (2000) encontraram correlação acima de 0,98, comparando os valores de profundidade do sistema radicular obtido no campo, com valores simulados.

A Figura 2.24 mostra a relação entre os valores de profundidade do sistema radicular medidos no experimento de campo e os valores de profundidade do sistema radicular simulados para a cultura do feijão.

De acordo com a Figura 2.24 observou-se aceitável ajuste entre os dados de profundidade do sistema radicular, que pode ser comprovado pelos coeficientes da Tabela 2.22 obtidos na regressão linear.

**Tabela 2.22** – Coeficientes  $a$ ,  $b$  e o coeficiente de determinação  $r^2$  da regressão linear dos valores de profundidade do sistema radicular simulados e dos valores de profundidade do sistema radicular obtidos no experimento de campo para a cultura do feijão.

Tratamento	a	b	$r^2$
0	4,008	1,038	0,918
1	4,549	0,959	0,879
2	5,418	0,979	0,881
3	6,128	0,973	0,881
4	6,237	0,992	0,890
5	5,753	0,979	0,898



**Figura 2.24** – Valores de profundidade do sistema radicular (cm) medidos no experimento de campo em relação aos valores de profundidade do sistema radicular (cm) simulados para a cultura do feijão.

### 2.3.7 Modelo de produção

A Figura 2.25 ilustra uma visualização do programa computacional utilizado para as culturas do milho e do feijão (ROBAINA, 2009). Este programa permitiu a determinação dos componentes do balanço hídrico, tendo com base a solução da equação de Richards (1931) (equação 2.16) e a determinação da produção da matéria seca total e de grãos, baseado na equação 2.17.

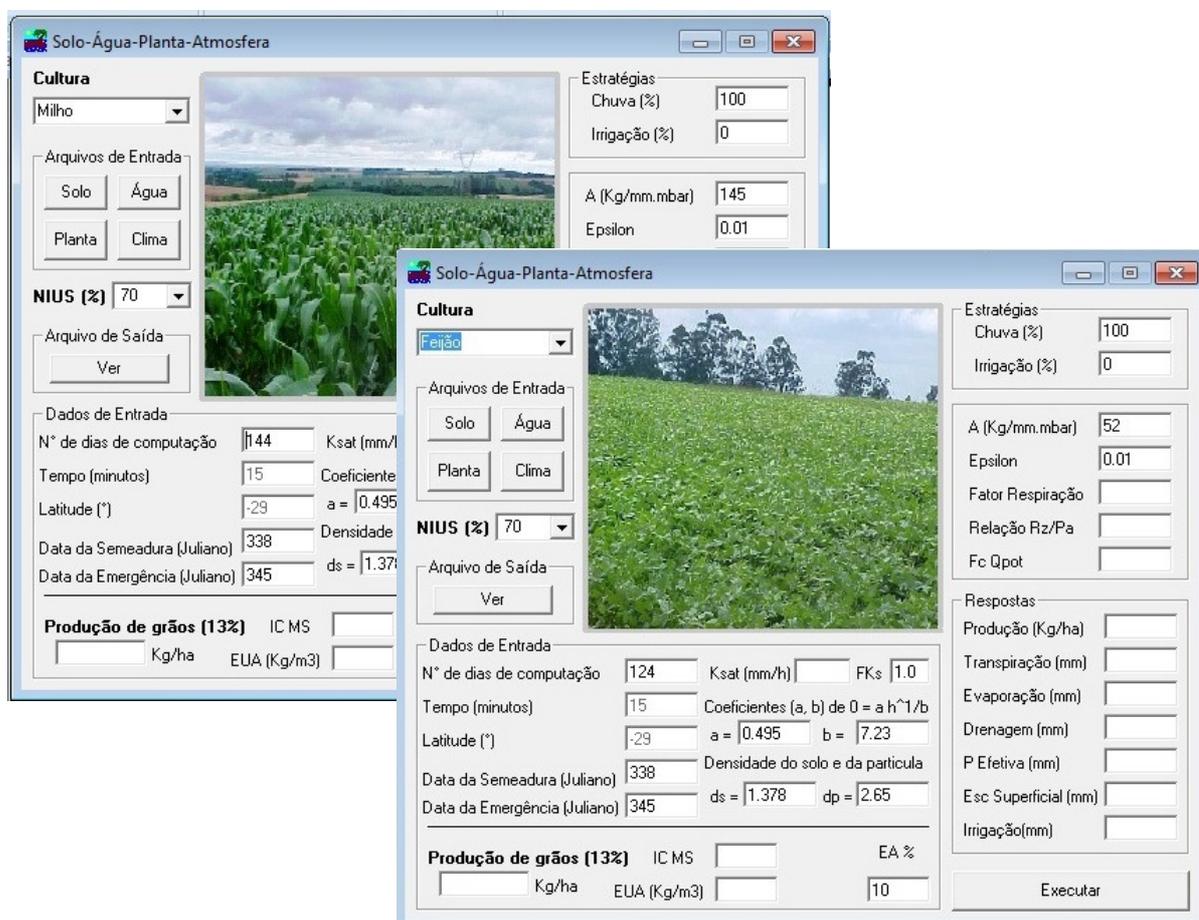


Figura 2.25 – Programa computacional utilizado para as culturas do milho e do feijão.

### 2.3.7.1 Parâmetros necessários para o modelo

Para a utilização do modelo de produção potencial das culturas foi necessário determinar para cada dia de cálculo os vários parâmetros que compõem o modelo proposto.

A Tabela 2.23 demonstra os valores radiação solar fotossinteticamente ativa,  $R_c$ , taxa de produção potencial nos dias claros  $P_c$  e taxa de produção potencial nos dias nublados  $P_o$ , para a localidade em estudo ( $F = 29^\circ 09' 32'' S$ ). Estes valores foram obtidos em Doorenbos & Kassam (1994).

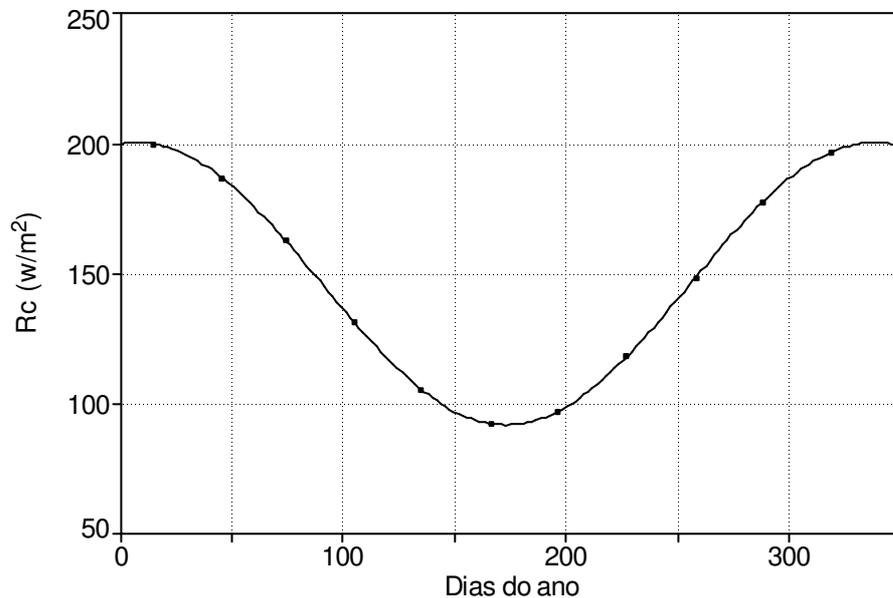
**Tabela 2.23** – Radiação solar fotossinteticamente ativa  $R_c$ , taxa de produção potencial nos dias claros  $P_c$  e taxa de produção potencial nos dias nublados  $P_o$ .

Dias	$R_c$ ( $W.m^{-2}$ )	$P_c$ ( $Kg .m^{-2}.dia^{-1}$ )	$P_o$ ( $Kg .m^{-2}.dia^{-1}$ )
15	199,3	482,3	257,8
46	186,2	457,3	243,6
74	162,3	412,6	216,8
105	130,8	353,6	181,2
135	105,0	305,4	151,7
166	91,8	280,8	136,8
196	96,4	289,2	141,9
227	117,5	328,3	165,9
258	148,0	385,3	200,5
288	176,9	439,4	233,1
319	196,2	476,1	254,5
349	198,7	481,5	256,7

Analisando a Tabela 2.23, observou-se que os valores de cada uma das variáveis que participa do modelo de produção proposto ( $R_c$ ,  $P_c$  e  $P_o$ ) em função do dia do ano diminuem a medida que se aproximam da metade do ano e voltam a crescer a partir da metade do ano de modo a se aproximarem do valor do início do ano, sugerindo que uma função do tipo senoidal se ajustaria adequadamente aos dados, de modo a permitir o cálculo dos valores de qualquer variável e em qualquer dia do ano.

### 2.3.7.1.1 Ajustamento dos valores da radiação solar fotossinteticamente ativa nos dias claros $R_c$ em função do tempo

Na Figura 2.26, observa-se os valores da radiação fotossinteticamente ativa em dias claros  $R_c$  distribuídos ao longo do ano estimados pela função senoidal e os valores de  $R_c$  utilizados para o ajustamento.



**Figura 2.26** – Valores da radiação solar fotossinteticamente ativa  $F = 29^{\circ} 09' 32''$  S.

Os valores da distribuição da radiação solar fotossinteticamente ativa nos dias claros  $R_c$  foram ajustados por uma função senoidal do tipo  $R_c = a + b \cdot \sin(2\pi t / d + c)$ , na qual  $t$  é o dia do ano no calendário Juliano,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são coeficientes a determinar.

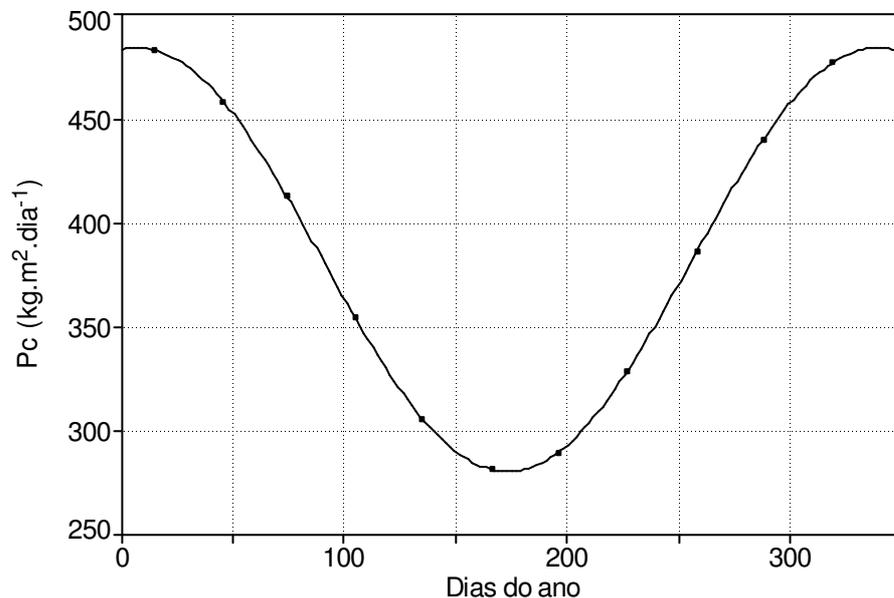
Os valores obtidos foram  $a = 145,596$ ,  $b = 54,243$ ,  $c = 1,241$  e  $d = 330,282$  e coeficiente de determinação  $r^2 = 0,998$ .

### 2.3.7.1.2 Ajustamento dos valores da taxa de produção potencial diária $P_c$ nos dias claros em função do tempo

Os valores da distribuição da taxa de produção potencial diária  $P_c$  foram ajustados por uma função senoidal do tipo  $P_c = a + b \cdot \sin(2\pi t / d + c)$ , na qual  $t$  é o dia do ano no calendário Juliano,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são coeficientes a determinar.

Os valores obtidos foram  $a = 381,597$ ,  $b = 101,742$ ,  $c = 1,430$  e  $d = 331,546$  e um coeficiente de determinação  $r^2 = 0,996$ .

A Figura 2.27, apresenta os valores da taxa de produção potencial diária em dias claros  $P_c$  distribuídos ao longo do ano estimados pela função senoidal ajustada e os valores de  $P_c$  utilizados para o ajustamento (estimativa dos coeficientes) da função.

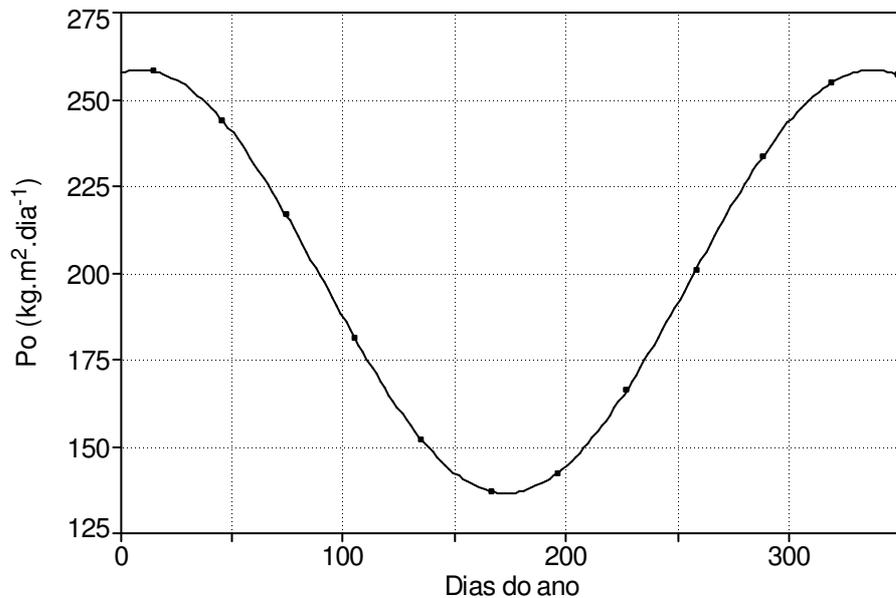


**Figura 2.27** – Valores da produção potencial diária  $P_c$  ao longo do ano para a localidade  $F = 29^\circ 09' 32''$  S.

### 2.3.7.1.3 Ajustamento dos valores da taxa de produção potencial diária $P_o$ nos dias nublados em função do tempo

Os valores da distribuição da taxa de produção potencial diária  $P_o$  foram ajustados por uma função senoidal do tipo  $P_o = a + b \cdot \sin(2\pi t / d + c)$ , na qual  $t$  é o dia do ano no calendário Juliano,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são coeficientes a determinar.

Os valores obtidos foram  $a = 197,204$ ,  $b = 61,010$ ,  $c = 1,397$  e  $d = 328,148$  e um coeficiente de determinação  $r^2 = 0,997$ . A Figura 2.28 apresenta esta relação.



**Figura 2.28** – Valores da produção potencial diária  $P_o$  ao longo do ano para a localidade  $F = 29^\circ 09' 32''$  S.

### 2.3.7.2 Calibração do modelo

Utilizou-se os valores obtidos no tratamento T0 a fim de calibrar o modelo. Para o procedimento da calibração foram realizadas tentativas na determinação dos coeficientes  $A$  e  $\varepsilon$  (equação 4.20), que resultassem em menor erro.

A Tabela 2.24 apresenta os resultados obtidos neste tratamento após a calibração na cultura do milho.

**Tabela 2.24** – Calibração dos valores de produção de matéria seca e de grãos obtidos após a calibração do tratamento T<sub>0</sub> na cultura do milho.

<b>Matéria Seca (Kg.ha<sup>-1</sup>)</b>			<b>Grãos (Kg.ha<sup>-1</sup>)</b>		
<b>Experimento</b>	<b>Modelo</b>	<b>Δ %</b>	<b>Experimento</b>	<b>Modelo</b>	<b>Δ %</b>
18772,96	18482,40	1,57	8376,28	7487,70	11,87

Através da Tabela 2.24, observou-se que a diferença na produção de matéria seca e de grãos foi de 1,57% e 11,87%, respectivamente.

A Tabela 2.25 apresenta os resultados obtidos neste tratamento após a calibração na cultura do feijão.

**Tabela 2.25** – Calibração dos valores de produção de matéria seca e de grãos obtidos após a calibração do tratamento T<sub>0</sub> na cultura do feijão.

<b>Matéria Seca (Kg.ha<sup>-1</sup>)</b>			<b>Grãos (Kg.ha<sup>-1</sup>)</b>		
<b>Experimento</b>	<b>Modelo</b>	<b>Δ %</b>	<b>Experimento</b>	<b>Modelo</b>	<b>Δ %</b>
6539,08	6547,60	0,13	2175,84	2172,20	0,17

Através da Tabela 2.25, observou-se que a diferença na produção de matéria seca e de grãos foi de 0,13% e 0,17%, respectivamente.

### 2.3.7.3 Teste do modelo

Após a calibração do modelo pelo Tratamento T<sub>0</sub>, realizou-se o teste da capacidade do mesmo em reproduzir os valores de produção para os demais tratamentos. Para verificar o desempenho do modelo de produção de milho e do feijão proposto neste trabalho, os valores da produção de matéria seca e da produção de grãos, obtidos com a utilização do modelo de produção, foram

comparados com os valores da produção de matéria seca e da produção de grãos obtidos em experimento de campo.

Os resultados encontrados através dos dois procedimentos para cada cultura e em cada tratamento podem ser encontrados na Tabela 2.26.

**Tabela 2.26** – Comparação dos valores de produção de matéria seca total e de produção de grãos obtidos pelo modelo de produção e no experimento de campo para a cultura do milho.

Tratamentos	Matéria Seca (Kg.ha <sup>-1</sup> )			Grãos (Kg.ha <sup>-1</sup> )		
	Experimento	Modelo	Δ %	Experimento	Modelo	Δ %
1	21743,50	22393,20	2,99	9243,57	9676,10	4,68
2	26225,28	26142,20	0,32	12113,66	12031,90	0,68
3	29350,08	28877,50	1,64	14096,18	13969,00	0,91
4	29949,95	30413,80	1,55	14707,53	15167,90	3,13
5	31215,68	31110,90	0,34	15550,90	15745,50	1,25

Analisando os valores que constam na Tabela 2.26, observou-se que a diferença entre os valores da produção de matéria seca variaram entre 0,32 a 2,99. Já os valores de produção de grãos apresentaram variação de 0,68 a 4,68, sendo o Tratamento T2 o que apresentou menor variação (0,32 e 0,68, respectivamente).

Peiter (1998) encontrou escala de grandeza de 10% quando comparou os valores de produção de matéria seca e de grãos da cultura do milho na região de Santa Maria.

Wolschick et al. (2007) implementaram e testaram um modelo mecanístico de simulação do crescimento e desenvolvimento de plantas de milho. Os autores encontraram no final do ciclo, o valor estimado de matéria seca nos grãos de 10,2% inferior ao valor observado.

Para reforçar a validação do modelo de produção foram determinados os coeficientes linear e angular da reta de regressão dos valores de matéria seca e de grãos obtidos por simulação ( $x$ ) e os valores de matéria seca obtidos no experimento de campo ( $y$ ). Os resultados podem ser observados na Tabela 2.27, onde constam também o coeficiente de determinação  $r^2$ , o valor do teste t do coeficiente a e o teste t do coeficiente b.

Nesse tipo de análise espera-se que o coeficiente linear  $a$  seja igual a zero e o coeficiente de  $b$  seja igual a 1, aproximadamente, permitindo inferir que os valores da produção de matéria seca e de grãos obtidos pelos diferentes procedimentos

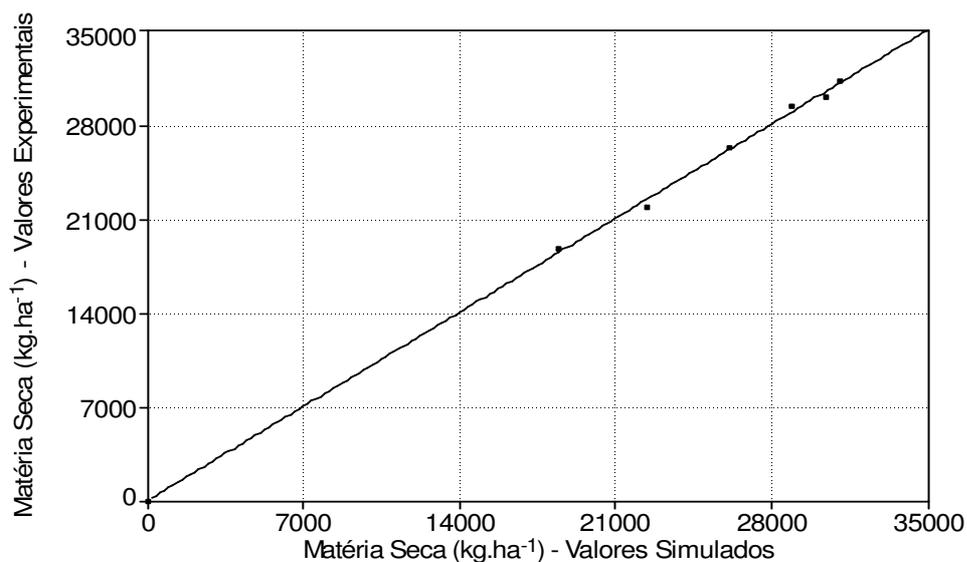
são, estatisticamente, iguais e pode-se considerar o modelo calibrado para o estudo o qual foi proposto.

**Tabela 2.27** – Valores do coeficiente linear  $a$ , coeficiente angular  $b$ , coeficiente de determinação  $r^2$  e valores do teste  $t$  para os coeficientes  $a$  e  $b$ , obtidos na comparação entre a produção de matéria seca e de grãos obtidos em experimento de campo para os diferentes tratamentos na cultura do milho.

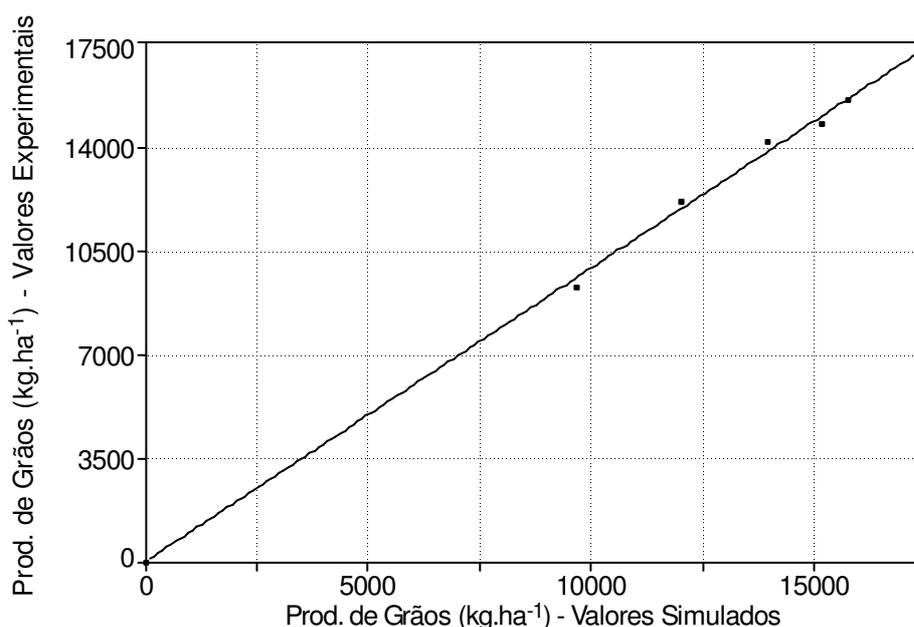
Produção (kg.ha <sup>-1</sup> )	$a$	$b$	$r^2$	$ta$	$tb$
<b>Matéria Seca</b>	-0,00010	0,9975	0,9997	-0,0002	-0,3312
<b>Grãos</b>	-0,000004	0,9874	0,9996	0,00004	-1,3532

De acordo com a Tabela 2.27 verificou-se que os valores do teste de Student (teste  $t$ ) do coeficiente  $a$  ( $ta$ ) e do teste de Student do coeficiente  $b$  ( $tb$ ) calculados foram menores que o valor de  $t$  encontrado em tabelas (COSTA NETO, 1977) para 4 graus de liberdade e 95% de confiança ( $t$  tabelado = 2,97), permitindo concluir que, estatisticamente  $a = 0$  e  $b = 1$ .

As Figura 2.29 e 2.30 reforçam o fato da igualdade estatística entre os dois procedimentos de obtenção da produção de matéria seca e da produção de grãos.



**Figura 2.29** – Valores de produção de matéria seca total (kg.ha<sup>-1</sup>) obtida em experimento de campo e valores de matéria seca total (kg.ha<sup>-1</sup>) estimados pelo modelo de produção para a cultura do milho.



**Figura 2.30** – Valores de produção de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) obtida em experimento de campo e valores de produção de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) estimados pelo modelo de produção para a cultura do milho.

A Tabela 2.28 apresenta a comparação dos valores de produção de matéria seca e de grãos obtidos pelo modelo e no experimento de campo para a cultura do feijão.

**Tabela 2.28** – Comparação dos valores de produção de matéria seca total e de produção de grãos obtidos pelo modelo e no experimento de campo para a cultura do feijão.

Tratamentos	Matéria Seca ( $\text{Kg.ha}^{-1}$ )			Grãos ( $\text{Kg.ha}^{-1}$ )		
	Experimento	Modelo	$\Delta \%$	Experimento	Modelo	$\Delta \%$
1	7682,30	7660,60	0,28	2680,91	2642,20	1,47
2	8632,50	8677,80	0,52	3116,56	3103,50	0,42
3	9100,32	9427,90	3,60	3560,48	3468,00	2,67
4	9489,33	9939,10	4,74	4089,69	3731,10	9,61
5	9902,47	10269,60	3,71	4097,56	3909,00	4,82

Analisando os valores que constam da Tabela 2.28, observou-se que a diferença entre os valores da produção de matéria seca variaram entre 0,89% e 8,08%. Já os valores de produção de grãos apresentaram variação de 0,47 a 9,61, sendo o Tratamento T1 o que apresentou menor variação (0,28 e 0,42, respectivamente).

Robaina (1992) encontrou diferenças de 10% quando comparou os valores de produção de matéria seca e de grãos da cultura do feijão.

Determinou-se os coeficientes linear e angular da reta de regressão dos valores da matéria seca e de grãos obtidos por simulação ( $x$ ) e os valores de matéria seca e de grãos obtidos no experimento de campo ( $y$ ). Os resultados podem ser observados na Tabela 2.29, onde constam também o coeficiente de determinação  $r^2$ , o valor do Teste  $t$  do coeficiente  $a$  e o Teste  $t$  do coeficiente  $b$ .

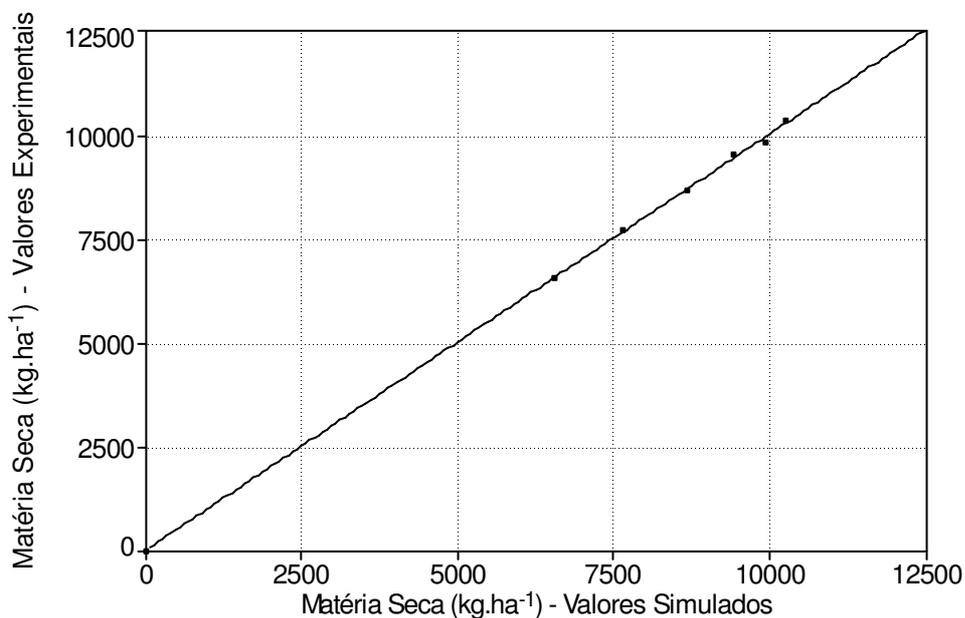
**Tabela 2.29** – Valores do coeficiente linear  $a$ , coeficiente angular  $b$ , coeficiente de determinação  $r^2$  e valores do teste  $t$  para os coeficientes  $a$  e  $b$ , obtidos na comparação entre a produção de matéria seca e de grãos obtidos em experimento de campo para os diferentes tratamentos na cultura do feijão.

Produção (kg.ha <sup>-1</sup> )	a	b	r <sup>2</sup>	ta	tb
<b>Matéria Seca</b>	0,00007	0,9729	0,9996	0,00041	-0,3050
<b>Grãos</b>	-0,00004	1,0438	0,9990	-0,0003	2,66

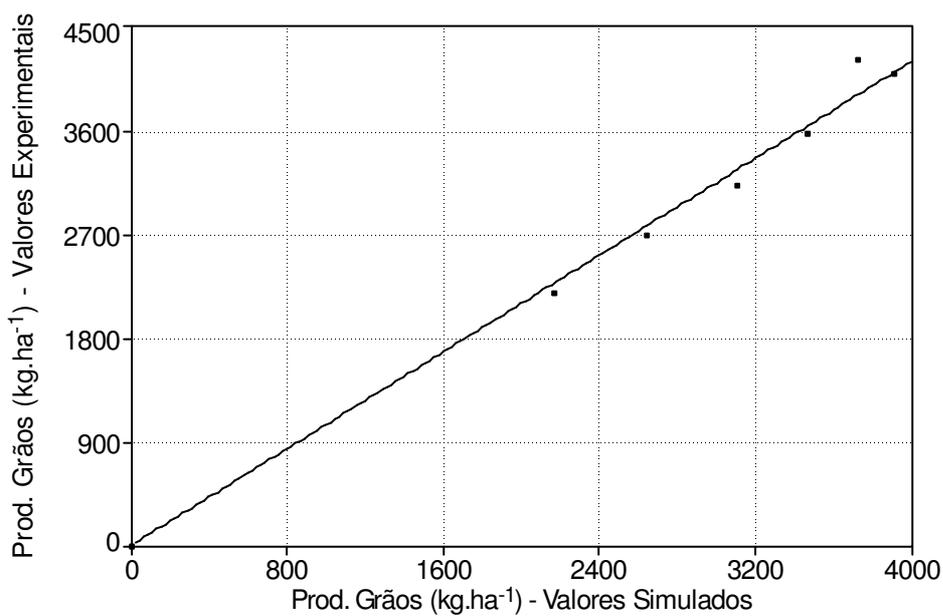
Através da Tabela 2.29, observou-se que o coeficiente linear  $a$  aproximou-se de zero e o coeficiente  $b$  de 1, o que confirma estatisticamente a igualdade entre os valores da produção de matéria seca e de grãos obtidos pelos diferentes procedimentos, considerando o modelo calibrado para o estudo o qual foi proposto.

Os valores do Teste de Student (Teste  $t$ ) do coeficiente  $a$  ( $ta$ ) e do teste de Student do coeficiente  $b$  ( $tb$ ) calculados foram menores que o valor de  $t$  encontrado em tabelas (COSTA NETO, 1977) para 4 graus de liberdade e 95% de confiança ( $t$  tabelado = 2,97), permitindo concluir que, estatisticamente  $a = 0$  e  $b = 1$ .

As Figura 2.31 e 2.32 mostram a relação entre os valores de produção de matéria seca e grãos obtidos no experimento de campo e os valores de produção de matéria seca e grãos obtidos pelo modelo, reforçando o fato da igualdade estatística entre os dois procedimentos.



**Figura 2.31** – Valores de produção de matéria seca total (kg.ha<sup>-1</sup>) obtida em experimento de campo e valores de matéria seca total (kg.ha<sup>-1</sup>) estimados pelo modelo de produção para a cultura do feijão.



**Figura 2.32** – Valores de produção de grãos (kg.ha<sup>-1</sup>) obtida em experimento de campo e valores de produção de grãos (kg.ha<sup>-1</sup>) estimados pelo modelo de produção para a cultura do feijão.

### 2.3.7.4 Aplicação do modelo de produção

#### 2.3.7.4.1 Acúmulo de matéria seca

Realizou-se a simulação do acúmulo diário de matéria seca total durante o ciclo das culturas do milho e do feijão e comparou-se com o acúmulo de matéria seca obtido no experimento de campo. Aplicou-se a regressão linear  $y = a + b \cdot x$  para os dados.

A Tabela 2.30 apresenta os coeficientes encontrados para cada tratamento da cultura do milho.

**Tabela 2.30** – Valores dos coeficientes obtidos da regressão entre a produção de matéria seca total obtidos em experimento de campo e através do modelo de produção, para os diferentes tratamentos na cultura do milho.

Tratamento	a	b	r <sup>2</sup>
0	0,0435	0,9552	0,9969
1	0,0480	0,9268	0,9947
2	0,0372	0,9117	0,9916
3	-0,0141	0,9333	0,9965
4	0,0352	0,0352	0,9980
5	0,0102	0,9369	0,9988

Através da Tabela 2.30 observou-se que os valores dos coeficientes *a* e *b* aproximaram de 0 e 1, respectivamente com elevados coeficientes de determinação, superiores a 0,99.

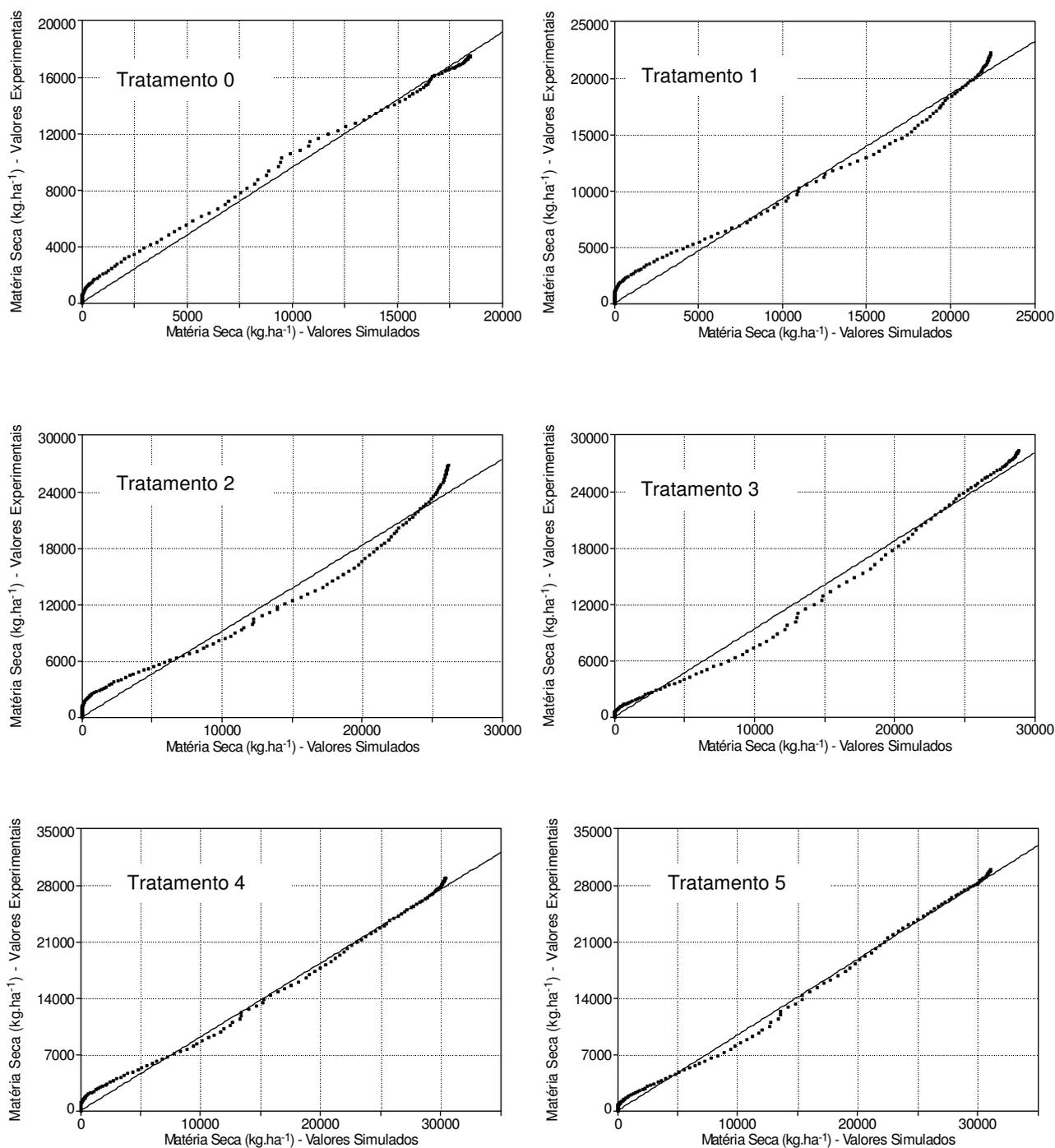
A Figura 2.33 apresenta a relação dos valores diários de matéria seca total obtidos pelo modelo de simulação e matéria seca total obtidos no experimento durante o ciclo da cultura do milho.

Através da Figura 2.33 observou-se que no início do ciclo da cultura do milho o modelo subestimou a produção de matéria seca em todos os tratamentos analisados. O Tratamento T0 apresentou uma subestimativa até aproximadamente os 52 DAE, após este período o modelo ajustou-se adequadamente aos dados

experimentais. Já os Tratamento T1, T2 e T3 apresentaram um comportamento similar, com uma subestimativa ocorrendo até aproximadamente os 40 DAE, quando ocorreu adequado ajuste, posteriormente superestimando e por fim subestimando novamente a produção de matéria seca. Os melhores ajustes obtidos foram nos Tratamentos T4 e T5 onde aplicou-se maior volume de água, correspondendo as maiores produções de grãos e matéria seca.

Costa & Barros (2001) testaram um modelo de simulação para a cultura do milho e compararam os valores de matéria seca obtidos em modelo de simulação com os valores de matéria seca experimental. Os autores observaram um bom ajustamento dos dados simulados pelo modelo aos valores observados até cerca de 25 DAE. No período de 30 a 80 DAE, o modelo subestimou os valores observados voltando, a partir daí, a apresentar valores próximos aos valores observados.

Wolschick et al. (2007) encontraram para o final do ciclo da cultura do milho superestimativa de produção de matéria seca da parte aérea de 8% comparado aos valores experimentais.



**Figura 2.33** – Relação dos valores de matéria seca total ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) obtidos pelo modelo de simulação e matéria seca total ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) obtidos no experimento – valores diários durante o ciclo da cultura do milho.

A Tabela 2.31 apresenta os coeficientes encontrados para cada tratamento da cultura do feijão.

**Tabela 2.31** – Valores dos coeficientes obtidos na comparação entre a produção de matéria seca total obtidos em experimento de campo e através do modelo de produção, para os diferentes tratamentos na cultura do feijão.

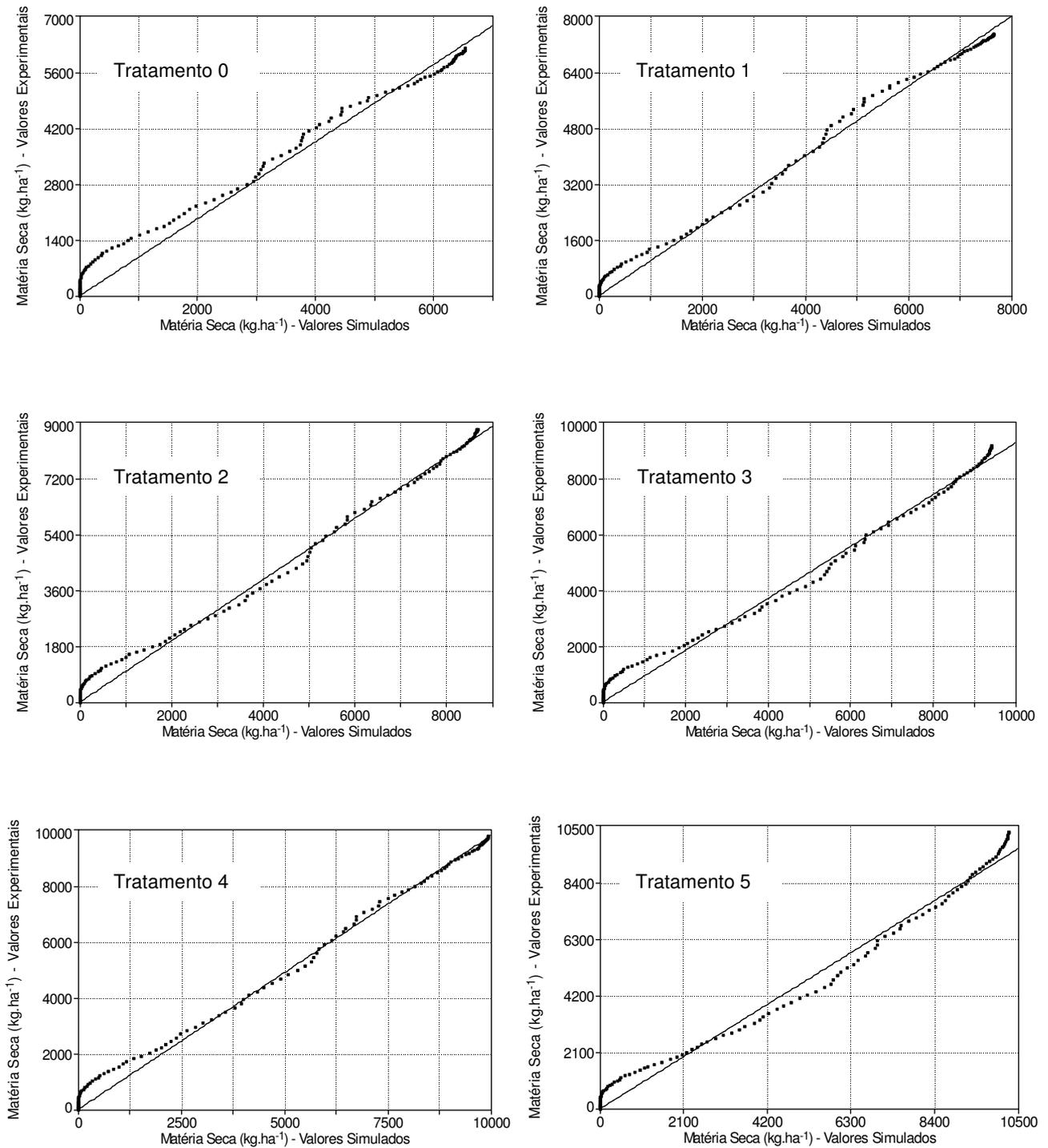
Tratamento	a	b	r <sup>2</sup>
0	0,021	0,963	0,992
1	0,012	0,997	0,997
2	0,013	0,984	0,997
3	0,015	0,924	0,996
4	0,018	0,977	0,997
5	0,010	0,917	0,995

Através da Tabela 2.31, da mesma forma como ocorreu com a cultura do milho, observou-se que os valores dos coeficientes *a* e *b* aproximaram-se de 0 e 1, respectivamente, seguidos de elevados coeficientes de determinação, superiores a 0,99.

A Figura 2.34 apresenta a relação dos valores de matéria seca total obtidos pelo modelo de simulação e matéria seca total obtidos no experimento durante o ciclo da cultura do feijão.

Através da Figura 2.34, observou-se que em todos os tratamentos o modelo de simulação subestimou a matéria seca com relação à reta da regressão no início do ciclo da cultura. Os melhores ajustes entre os dados de matéria seca foram obtidos nos Tratamentos T2, T3 e T4, onde obteve-se os maiores coeficientes de determinação. O Tratamento T0 apresentou uma subestimativa dos dados simulados com relação à reta, e posterior superestimativa, no final do ciclo da cultura. Já o Tratamento T1 mostra pequenas oscilações entre o período reprodutivo e a maturação e o Tratamento T5 apresentou uma superestimativa maior, comparado aos demais tratamentos.

Meireles & Pereira (2001), encontraram correlação de 0,97 entre os valores de matéria seca simulada pelo modelo Cropgro-Dry Bean comparada a valores de matéria seca observada a campo. Foi encontrada uma subestimativa da matéria seca simulada até a maturação e posterior superestimativa. Whithe et al. (1995), também encontraram situação semelhante, utilizando o modelo BEANGRO aplicado a cultivar carioca, com superestimativa durante o período de enchimento de grãos.



**Figura 2.34** – Relação dos valores de matéria seca total ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) obtidos pelo modelo de simulação e matéria seca total ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) obtidos no experimento – valores diários durante o ciclo da cultura do feijão.

Pimenta et al. (1999) desenvolveram um modelo matemático para estimar a variação temporal do acúmulo de matéria seca da cultura de feijão. Para calibração do modelo, utilizou-se um experimento de campo conduzido na ESALQ, em

Piracicaba, SP, submetido a diferentes doses de adubação nitrogenada e sob irrigação. O modelo do co-seno foi proposto para prever a variação temporal diária da massa de matéria seca relativa total ( $Wr_i$ ) da parte aérea da planta e massa de matéria seca de folha. Os autores encontraram significância no modelo testado e concluíram que o modelo sugerido pode ser utilizado para representar a variação temporal do acúmulo de matéria seca da cultura de feijão.

#### 2.3.7.4.2 Comparação de diferentes estratégias de irrigação

Realizou-se a simulação de diferentes estratégias de irrigação, considerando diferentes frações de chuva.

Para efetuar a simulação do balanço hídrico, considerou-se o perfil de solo de 0,50 m, por ser a profundidade média aproximada, onde se encontrava o maior volume de raízes, tanto da cultura do milho, quanto da cultura do feijão. Foram levados em consideração os valores de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) obtidos na curva de retenção (Tabela 2.2).

A Tabela 2.32 apresenta os valores encontrados para os componentes do balanço hídrico nas diferentes estratégias de irrigação estudadas.

**Tabela 2.32** – Valores simulados dos componentes do balanço hídrico (mm) em diferentes estratégias de irrigação para a cultura do milho.

Fração de Chuva (%)	I (%)	P (mm)	I (mm)	R (mm)	ES (mm)	TR (mm)	- QZ (mm)	ETR (mm)	AS (mm)	CC %
100	0	347	0,0	66	167,8	231,7	14,1	399,5	83,4	55,6
	25	347	54,3	66	197,6	253,4	16,3	451,0	84,0	56,0
	50	347	108,6	66	210,4	275,1	21,3	485,5	98,8	65,9
	75	347	162,9	66	218,2	290,1	28,9	508,3	122,7	81,8
	100	347	217,2	66	223,5	297,1	39,6	520,6	154,0	102,7
75	0	289,1	0,0	20,6	150,5	201,2	10,3	351,7	77,1	51,4
	25	289,1	54,3	20,6	180,9	223,4	11,4	404,3	77,7	51,8
	50	289,1	108,6	20,6	195,1	247,5	14,0	442,6	91,1	60,7
	75	289,1	162,9	20,6	204,3	268,4	18,6	472,7	110,7	73,8
	100	289,1	217,2	20,6	211,0	282,7	25,9	493,7	136,7	91,1
50	0	198,2	0,0	8,3	117,0	151,4	8,2	268,4	71,6	47,7
	25	198,2	54,3	8,3	148,3	173,8	8,5	322,1	71,9	47,9
	50	198,2	108,6	8,3	164,4	199,3	9,4	363,7	83,7	55,8
	75	198,2	162,9	8,3	175,6	222,8	11,1	398,4	101,6	67,7
	100	198,2	217,2	8,3	184,1	242,9	14,4	427,0	124,0	82,7
25	0	101,6	0,0	1,7	77,7	97,5	7,9	175,2	68,5	45,7
	25	101,6	54,3	1,7	109,5	119,9	8,0	229,4	68,5	45,7
	50	101,6	108,6	1,7	126,9	146,7	8,3	273,6	78,3	52,2
	75	101,6	162,9	1,7	139,5	171,6	9,1	311,1	94,3	62,9
	100	101,6	217,2	1,7	149,2	193,8	10,8	343,0	115,0	76,7

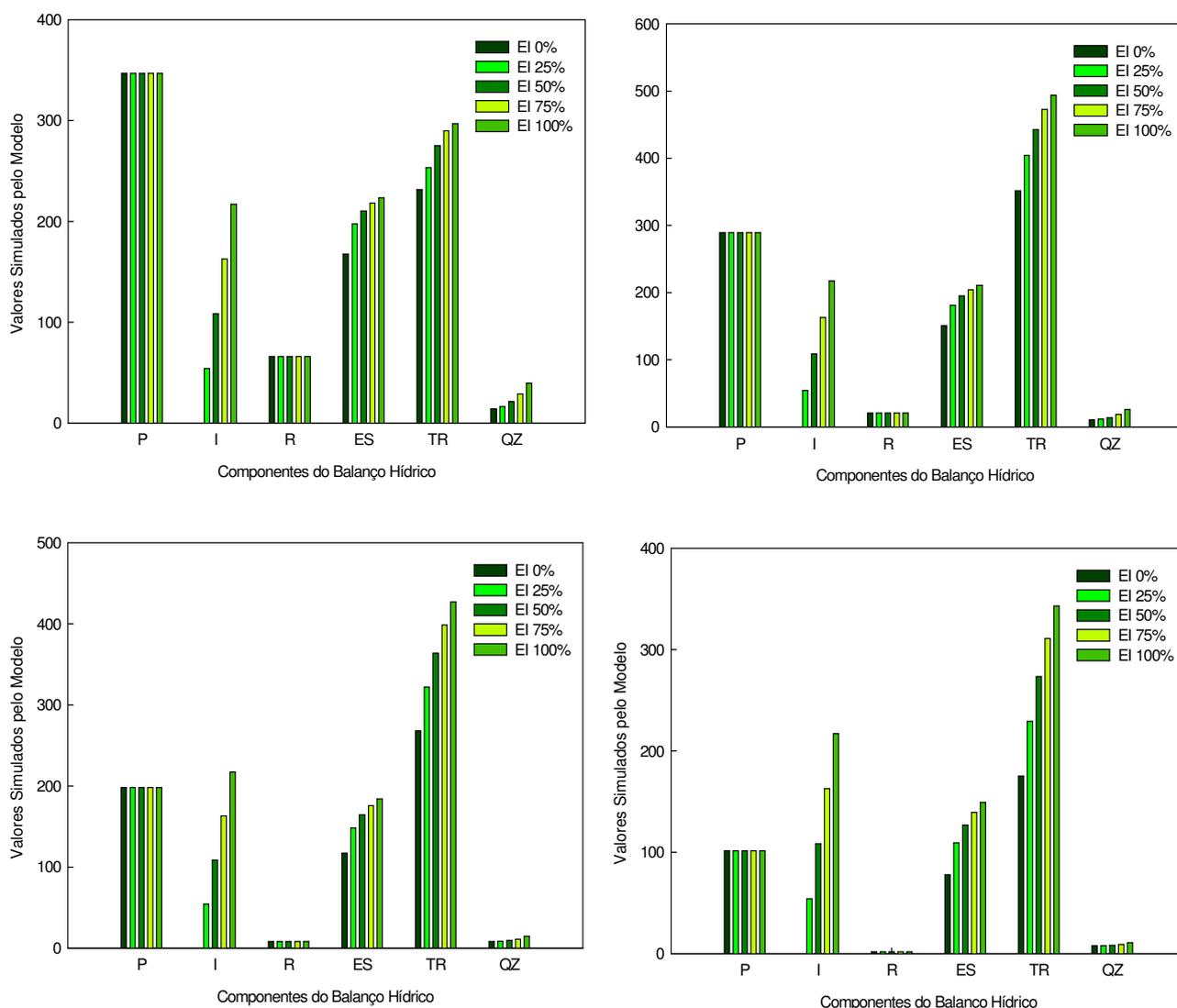
A Figura 2.35 mostra a distribuição dos componentes do balanço hídrico obtidos na simulação de cada estratégia de irrigação.

Através da Figura 2.35, observou-se, que as diferentes estratégias de irrigação simuladas e as diferentes frações de chuva influenciaram nos componentes do balanço hídrico.

Observou-se que a precipitação e o escoamento superficial mantiveram-se constantes em cada fração de chuva analisada, mas aumentaram à medida que aumentou a fração de chuva. Já a irrigação, evaporação do solo, transpiração e drenagem aumentaram à medida que aumentou a estratégia de irrigação e a fração de chuva.

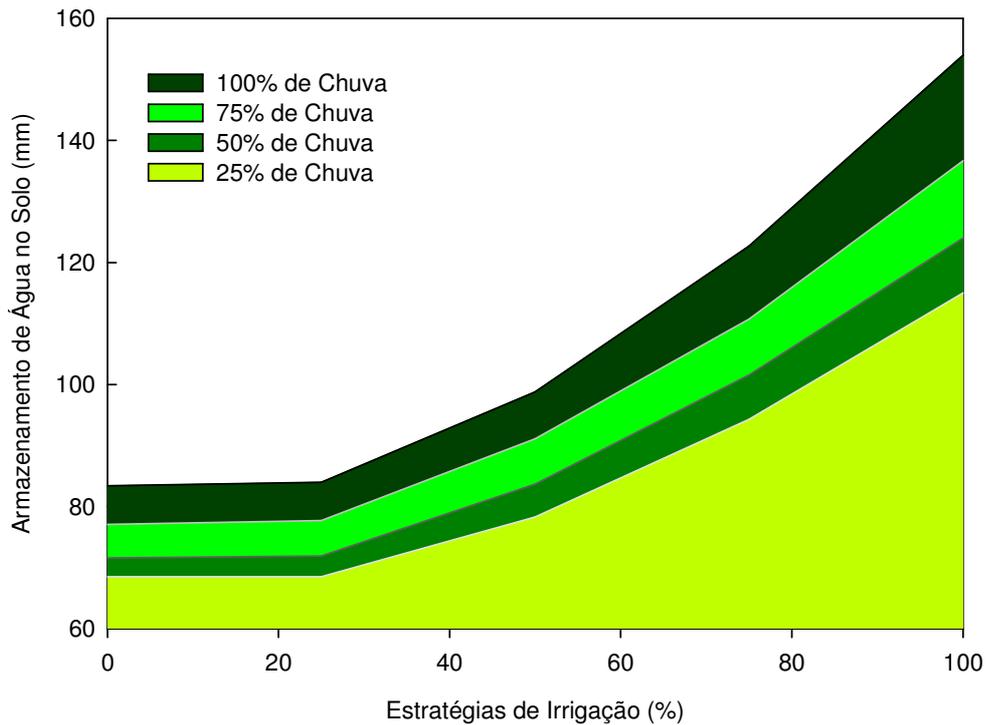
Analisando a Figura 2.35, verificou-se a elevada precipitação ocorrida em 100% de chuva (precipitação ocorrida no experimento de campo). O valor de 347

mm ocorrido foi aceitável por vários autores, para a obtenção da produção satisfatória da cultura do milho, como cita Fanceli (1991). No entanto deve-se levar em consideração as características climáticas ocorridas, como mencionado Doorenbos & Kassan (1994).



**Figura 2.35** – Distribuição dos componentes do balanço hídrico (mm) simulados em cada estratégia de irrigação (EI) para a cultura do milho.

A Figura 2.36 ilustra o armazenamento de água em cada estratégia de irrigação e fração de chuva simuladas.



**Figura 2.36** – Armazenamento de água em cada estratégia de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas para a cultura do milho.

Através da Figura 2.36 observou-se que o aumento nas lâminas de irrigação e frações de chuva, ocasionaram em aumento no armazenamento de água no solo. As estratégias de irrigação de 0% e 25% expressaram semelhança no armazenamento de água, sendo que as demais responderam em acréscimos no armazenamento. Isto pode ser observado também nos valores de CC (%) necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo, os quais responderam da mesma forma. As menores frações de chuva e de irrigação ocasionaram baixa disponibilidade de água as plantas, com relação a CC.

A Tabela 2.33 apresenta os valores de total de água aplicada (mm), precipitação efetiva (mm), produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e produção de matéria seca ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) para a cultura do milho, obtidos em função da transpiração diária fornecida pelo modelo de extração de água no solo pelas raízes das plantas.

**Tabela 2.33** – Total de água aplicada (irrigação e precipitação - mm), precipitação efetiva (mm), produção de grãos (kg.ha<sup>-1</sup>) e produção de matéria seca (kg.ha<sup>-1</sup>) obtidos na simulação de diferentes lâminas de irrigação para a cultura do milho.

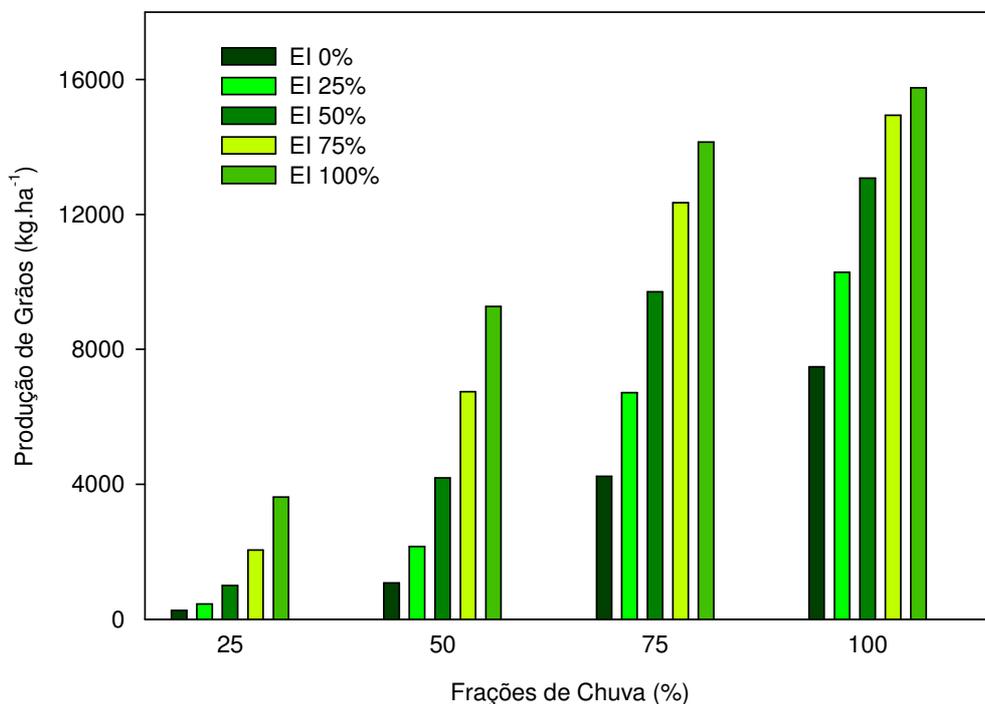
Fração de Chuva (%)	Irrigação (%)	Total de água aplicada (mm)	Precipitação efetiva (mm)	Prod. Grãos (kg.ha <sup>-1</sup> )	Prod. MS. (kg.ha <sup>-1</sup> )
100	0	347,0	347	7487,7	18482,4
	25	401,3	347	10287,4	23411,0
	50	455,6	347	13074,7	27653,5
	75	509,9	347	14940,5	30131,6
	100	564,2	347	15745,5	31110,9
	<b>Média</b>			<b>12307,1</b>	<b>26157,8</b>
	<b>D.P.</b>			<b>3415,1</b>	<b>5220,5</b>
	<b>CV (%)</b>		<b>27,7</b>	<b>19,9</b>	
75	0	289,1	289,1	4241,4	11827,9
	25	343,4	289,1	6717,9	17002,9
	50	397,7	289,1	9704,3	22440,7
	75	452,0	289,1	12344,6	26604,9
	100	506,3	289,1	14144,5	29109,9
	<b>Média</b>			<b>9430,5</b>	<b>21397,2</b>
	<b>D.P.</b>			<b>4033,4</b>	<b>7045,8</b>
	<b>CV (%)</b>		<b>42,7</b>	<b>32,9</b>	
50	0	198,2	198,2	1079,8	3916,2
	25	252,5	198,2	2162,4	6860,5
	50	306,8	198,2	4192,5	11718,4
	75	361,1	198,2	6743,6	17053,2
	100	415,4	198,2	9273,7	21705,6
	<b>Média</b>			<b>4690,4</b>	<b>12250,7</b>
	<b>D.P.</b>			<b>3350,2</b>	<b>7267,4</b>
	<b>CV (%)</b>		<b>71,4</b>	<b>59,3</b>	
25	0	101,6	101,6	268,5	1453,5
	25	155,9	101,6	452,9	2016,6
	50	210,2	101,6	996,0	3672,4
	75	264,5	101,6	2057,1	6587,9
	100	318,8	101,6	3625,9	10428,1
	<b>Média</b>			<b>1480,1</b>	<b>4831,7</b>
	<b>D.P.</b>			<b>1386,1</b>	<b>3710,9</b>
	<b>CV (%)</b>		<b>93,7</b>	<b>76,8</b>	

Através da Tabela 2.33, verificou-se, que as estratégias de irrigação, independente da fração de chuva apresentaram variabilidade superior a 20% nas produções simuladas. Segundo Gomes (1985) valores de CV(%) entre 20-30 são considerados de alta variabilidade e acima de 30% muito altas. Valores acima de 30% foram encontrados nas frações de chuva de 75%, 50% e 25%, o que comprova

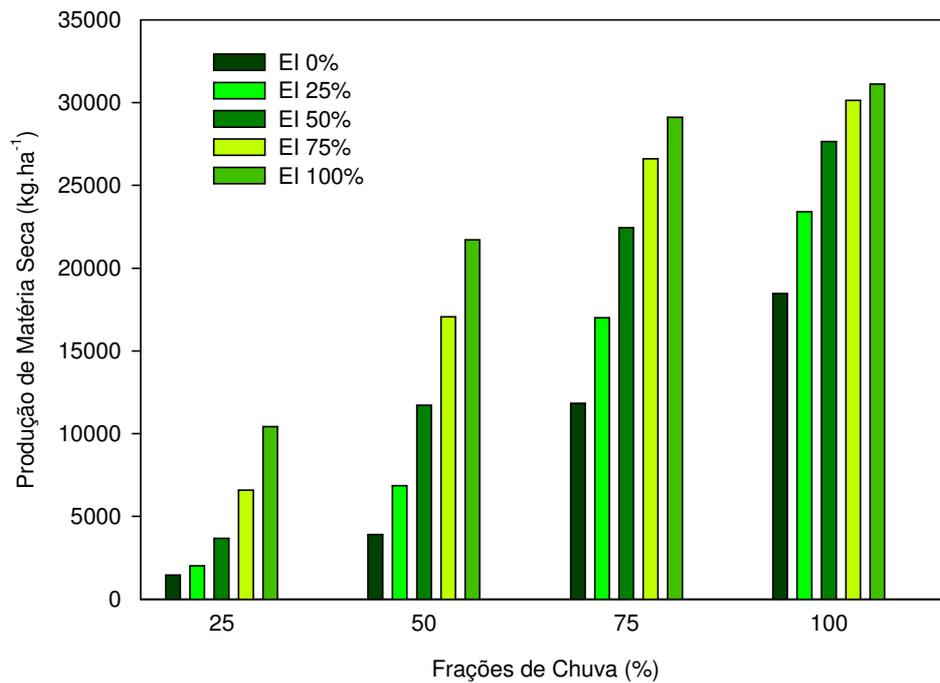
que diferentes estratégias de irrigação resultam em variabilidade na produção de milho.

Rendimentos acima da média nacional foram obtidos quando obteve-se a elevação da umidade do solo à capacidade de campo (CC) de 51,8% e 55,8% (Tabela 5.31 e 5.32), com fração de chuva de 75% e estratégia de irrigação de 25% e fração de chuva de 50% e estratégia de irrigação de 50%, respectivamente (6.717,9 kg.ha<sup>-1</sup> e 4.192,5 kg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Bergonci et al. (2001) e Bergamaschi et al. (2004) constataram que uma dose intermediária de irrigação, a partir de 60% daquela necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo, é suficiente para que sejam obtidos rendimentos elevados de milho.

As Figuras 2.37 e 2.38 mostram o comportamento das estratégias de irrigação e fração de chuva simuladas, na produção de grãos e na produção de matéria seca da cultura do milho.



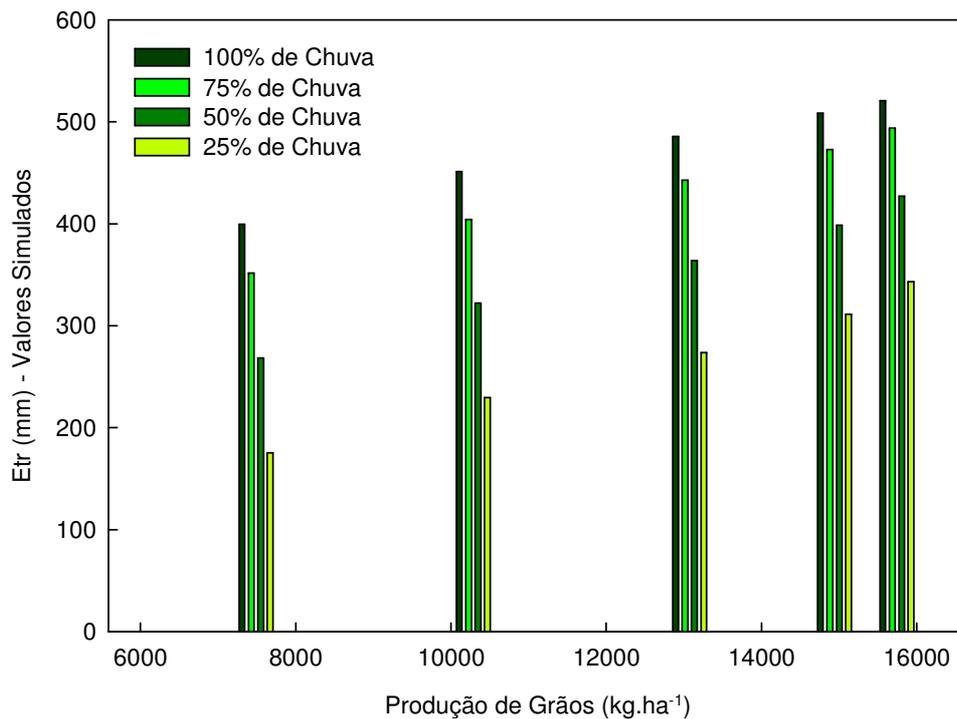
**Figura 2.37** – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de grãos (kg.ha<sup>-1</sup>) da cultura do milho.



**Figura 2.38** – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de matéria seca ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) da cultura do milho.

De acordo com as Figuras 2.37 e 2.38, observou-se que o aumento nas frações de chuva e estratégias de irrigação ocasionaram um aumento na produtividade de grãos e matéria seca para a cultura do milho. As maiores produtividades foram obtidas quando o total de água aplicada foi superior a 500 mm, obtendo-se uma produção acima de 15 ton. Isto confirma relatos de Doorenbos & Kassan (1994) e Matzenauer et al. (1983).

A Figura 2.39 representa a relação entre a produção de grãos e a evapotranspiração real (Etr) calculada a partir da simulação dos componentes do balanço hídrico para a cultura do milho nas diferentes estratégias de irrigação e a fração de chuva.



**Figura 2.39** – Evapotranspiração real (mm) para diferentes estratégias de irrigação (EI) e fração de chuva (%) para a cultura do milho.

A Figura 2.39 demonstrou um expressivo aumento da produção de grãos com o aumento da Etr, pois o aumento na disponibilidade hídrica, elevou os valores de transpiração pelas plantas e evaporação do solo. Estes resultados também foram obtidos por Freitas et al. (1985) trabalhando com efeito de faixas de umidade na Etr e produção de grãos de trigo.

A Tabela 2.34 apresenta os valores de eficiência do uso da água (EUA) e eficiência de aplicação de água (EAA), obtidos com relação a produção de grãos e a produção de matéria seca nas diferentes estratégias de irrigação simuladas para a cultura do milho.

**Tabela 2.34** – Valores eficiência de uso da água obtidos para a produção de grãos (EUA/GR), eficiência de uso da água obtidos para a produção de matéria seca (EUA/MS), eficiência de aplicação da água obtidos para a produção de grãos (EAA/GR) e eficiência de aplicação da água obtidos para a produção de matéria seca (EAA/MS) encontrados para diferentes lâminas de irrigação na simulação para a cultura do milho.

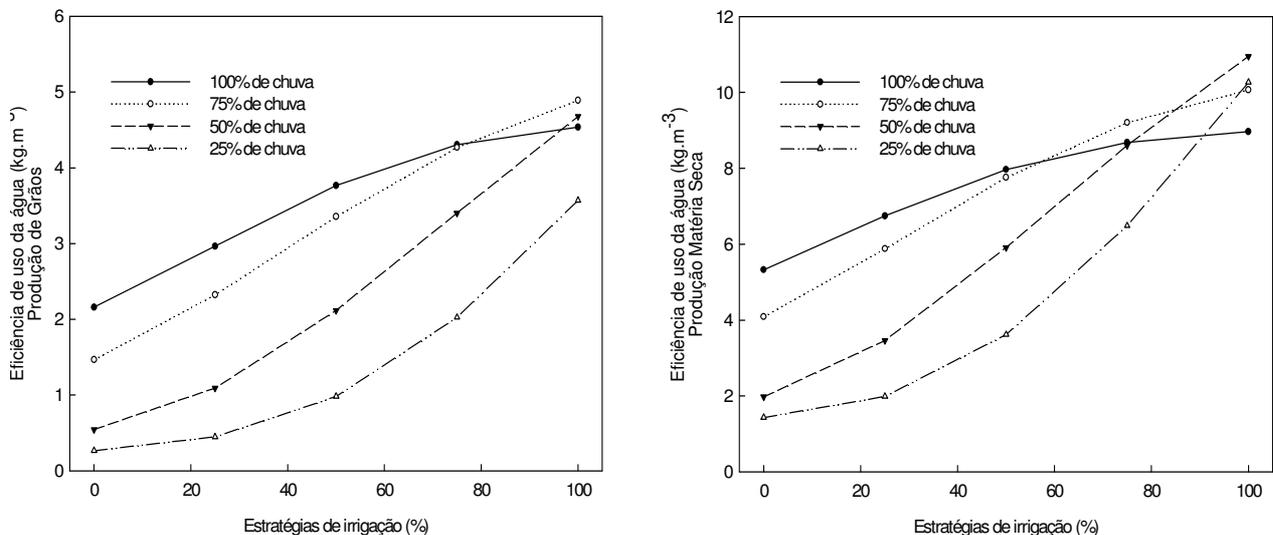
Fração de Chuva (%)	Irrigação (%)	EUA/GR (kg.m <sup>-3</sup> )	EUA/MS (kg.m <sup>-3</sup> )	EAA/GR (kg. m <sup>-3</sup> )	EAA/MS (kg. m <sup>-3</sup> )
100	0	2,16	5,33	2,16	5,33
	25	2,96	6,75	2,56	5,83
	50	3,77	7,97	2,87	6,07
	75	4,31	8,68	2,93	5,91
	100	4,54	8,97	2,79	5,51
75	0	1,47	4,09	1,47	4,09
	25	2,32	5,88	1,96	4,95
	50	3,36	7,76	2,44	5,64
	75	4,27	9,20	2,73	5,89
	100	4,89	10,07	2,79	5,75
50	0	0,54	1,98	0,54	1,98
	25	1,09	3,46	0,86	2,72
	50	2,12	5,91	1,37	3,82
	75	3,40	8,60	1,87	4,72
	100	4,68	10,95	2,23	5,23
25	0	0,26	1,43	0,26	1,43
	25	0,45	1,98	0,29	1,29
	50	0,98	3,61	0,47	1,75
	75	2,02	6,48	0,78	2,49
	100	3,57	10,26	1,14	3,27

Analisando a Tabela 2.34, verificou-se que os valores de EUA apresentaram variações de 0,26 a 4,89 kg.m<sup>-3</sup> para a produção de grãos e de 1,43 a 10,95 kg.m<sup>-3</sup> para a produção de matéria seca. Peiter (1998) verificou resultados médios de EUA entre 1,80 kg.m<sup>-3</sup> (para quinze melhores estratégias de irrigação) e 0,85 kg.m<sup>-3</sup> (para as quinze piores estratégias de irrigação), trabalhando com estratégias de irrigação para a cultura do milho cultivar Pioneer 3069. De acordo com a autora estes resultados destacam a importância da aplicação de água no momento adequado, pois a relação entre a produção de grãos e a água evapotranspirada pode ser duplicada pelo uso de estratégias ótimas de rega. Para Medeiros et al. (2003), a eficiência do uso da água (EUA) permite avaliar os efeitos do manejo da água, do solo e da planta sobre o consumo de água e produção da cultura.

Parizi (2007) trabalhou com diferentes estratégias de irrigação na cultura do milho no ano agrícola 2004-2005, encontrou valores de EUA para matéria seca com média de 3,29. Os maiores valores obtidos de EUA para a cultura, foram nos tratamentos que obtiveram maior produção de grãos, com valores de 3,41 e 3,46. O menor valor foi de 3,00, para a menor lâmina de água aplicada. Observou-se que a máxima EUA correspondeu a maior produção de grãos.

Já a EAA, variou entre 0,26 e 2,93  $\text{kg.m}^{-3}$  para a produção de grãos e 1,43 a 6,07  $\text{kg.m}^{-3}$  para a produção de matéria seca. Para Frizzone (1992), a eficiência de aplicação de água, representa basicamente, a fração do volume total de água aplicada que é armazenada na profundidade do sistema radicular da planta.

A Figura 2.40 mostra o comportamento da eficiência de uso da água (EUA –  $\text{kg.m}^{-3}$ ) obtida para a produção de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) e para produção de matéria seca ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) em relação às diferentes estratégias de irrigação e fração de chuva para a cultura do milho.

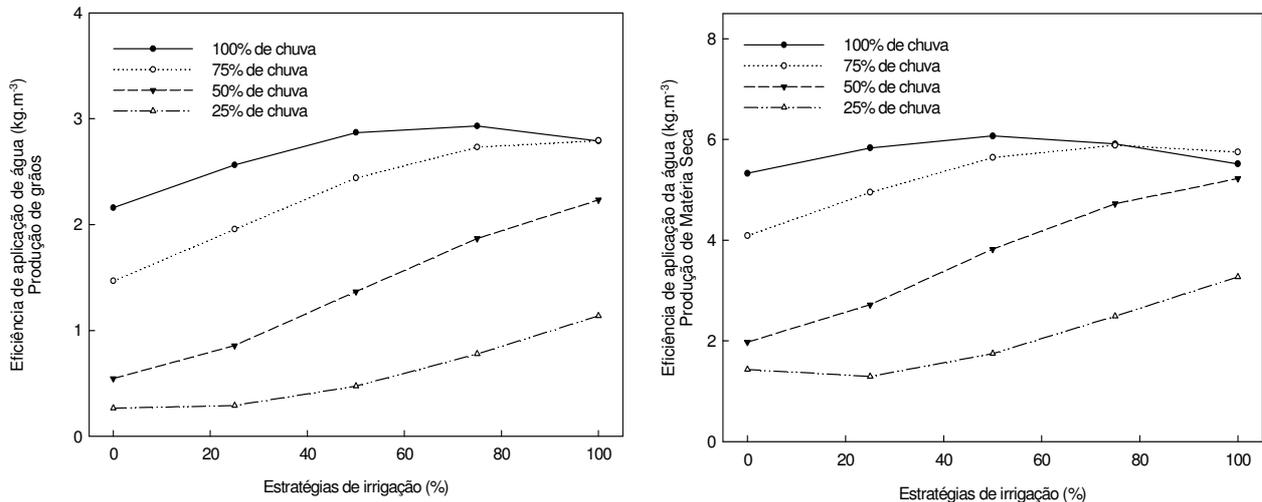


**Figura 2.40** – Relação entre a eficiência de uso da água ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) obtida para produção de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) e para produção de matéria seca ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) nas diferentes estratégias de irrigação na cultura do milho.

Através da Figura 2.40, observou-se que o aumento da estratégia de irrigação respondeu em aumento na EUA, tanto na produção de grãos, quanto na produção de matéria seca. A redução na fração de chuva de 100% para 75% e 50% acarretou em aumento da EUA para a estratégia de irrigação de 100%, ou seja, a adoção de

uma fração de chuva de 75% e 50%, daquela necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo permitiu aumentar a eficiência de uso da irrigação. Bergamaschi et al. (2006) avaliando o impacto do deficit hídrico, no rendimento de grãos de milho, e a eficácia da irrigação em todo ciclo, concluíram que, a adoção de uma dose de rega de 60% daquela necessária para elevar a umidade do solo à capacidade de campo permitiu aumentar a eficiência de uso da irrigação.

A Figura 2.41 mostra o comportamento da eficiência de aplicação de água (EAA) obtida para a produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e para produção de matéria seca ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) em relação às diferentes estratégias de irrigação e frações de chuva para a cultura do milho.



**Figura 2.41** – Relação entre a eficiência de aplicação de água ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) obtida para produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e para produção de matéria seca ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) nas diferentes estratégias de irrigação na cultura do milho.

A EAA tanto na produção de grãos, quanto na produção de matéria seca, na fração de 100% de chuva apresentou um crescimento até a estratégia de irrigação de 75% e posterior decréscimo na estratégia de 100%. As menores frações de chuva acarretaram em menores valores de EAA.

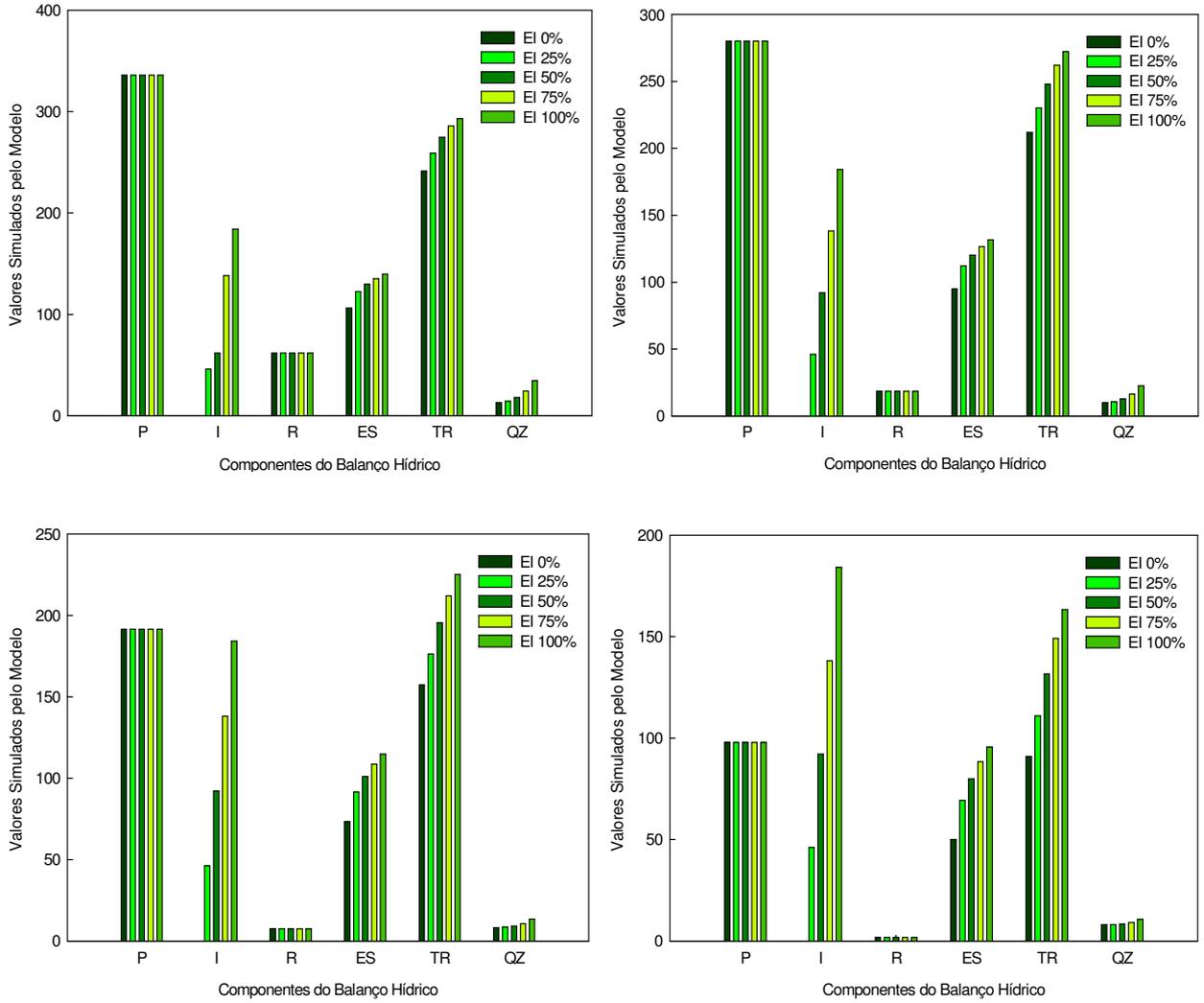
A Tabela 2.35 apresenta os valores encontrados para os componentes do balanço hídrico nas diferentes estratégias de irrigação estudadas para a cultura do feijão.

**Tabela 2.35** – Valores simulados dos componentes do balanço hídrico (mm) em diferentes estratégias de irrigação para a cultura do feijão.

Fração de Chuva (%)	I (%)	P (mm)	I (mm)	R (mm)	ES (mm)	TR (mm)	- QZ (mm)	ETR (mm)	AS (mm)	CC %
100	0	336,2	0	61,8	106,3	241,5	12,8	347,8	125,6	83,7
	25	336,2	46,1	61,8	122,6	259	14,4	381,6	136,3	90,9
	50	336,2	92,1	61,8	129,7	274,9	18,1	404,6	155,6	103,7
	75	336,2	138,2	61,8	135,3	286	24,3	421,3	178,8	119,2
	100	336,2	184,2	61,8	139,7	293,2	34,5	432,9	203	135,3
75	0	280,2	0	18,3	95,1	212,1	9,9	307,2	113,1	75,4
	25	280,2	46,1	18,3	112,2	230,2	10,6	342,4	123,3	82,2
	50	280,2	92,1	18,3	120,3	247,8	12,7	368,1	141,5	94,3
	75	280,2	138,2	18,3	126,6	262,1	16,3	388,7	163,4	108,9
	100	280,2	184,2	18,3	131,7	272,4	22,6	404,1	187,7	125,1
50	0	191,5	0	7,5	73,2	157,3	8,3	230,5	102,7	68,5
	25	191,5	46,1	7,5	91,5	176,4	8,5	267,9	111,2	74,1
	50	191,5	92,1	7,5	101	195,5	9,2	296,5	127,9	85,3
	75	191,5	138,2	7,5	108,6	211,9	10,7	320,5	148,5	99,0
	100	191,5	184,2	7,5	114,9	225,3	13,5	340,2	172	114,7
25	0	97,8	0	1,7	50	90,9	8,1	140,9	98,8	65,9
	25	97,8	46,1	1,7	69,3	111	8,1	180,3	105,5	70,3
	50	97,8	92,1	1,7	79,9	131,7	8,4	211,6	119,9	79,9
	75	97,8	138,2	1,7	88,4	149,1	9,1	237,5	139,4	92,9
	100	97,8	184,2	1,7	95,6	163,4	10,6	259	162,4	108,3

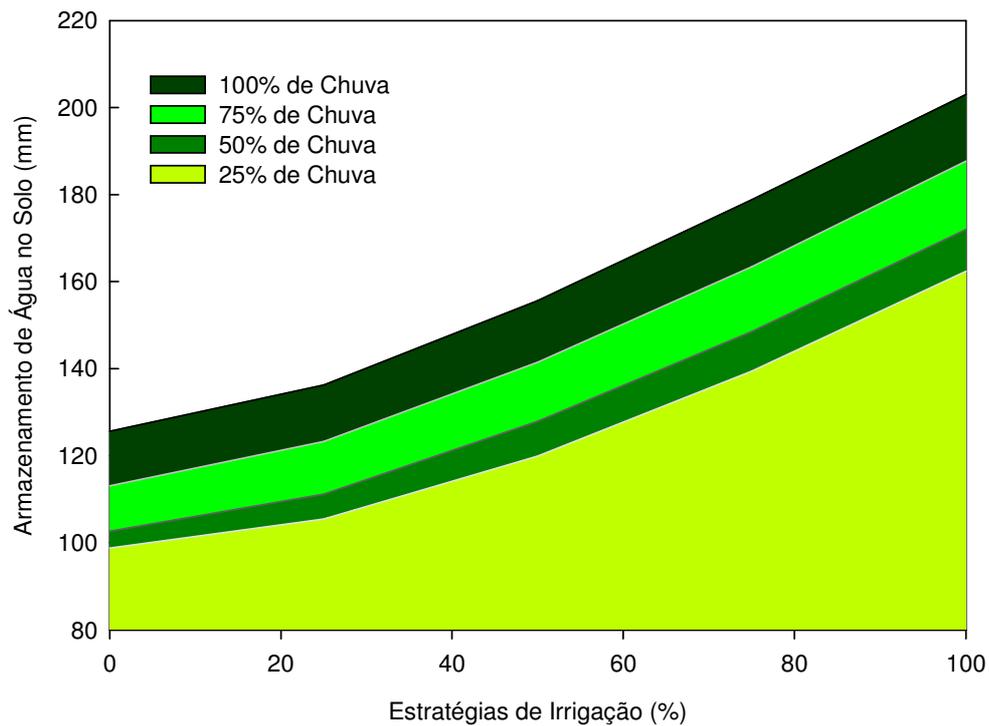
A Figura 2.42 mostra a distribuição dos componentes do balanço hídrico simulados em cada estratégia de irrigação.

Através da Figura 2.42, observou-se que da mesma forma que ocorreu com a cultura do milho, as diferentes estratégias de irrigação simuladas e as diferentes frações de chuva influenciaram nos componentes do balanço hídrico. A precipitação e o escoamento superficial mantiveram-se constantes em cada fração de chuva analisada individualmente, mas aumentaram nas diferentes frações de chuva. Já a irrigação, evaporação do solo, transpiração e drenagem aumentaram à medida que aumentou a estratégia de irrigação e a fração de chuva.



**Figura 2.42** – Distribuição dos componentes do balanço hídrico (mm) simulados em cada estratégia de irrigação (EI) para a cultura do feijão.

A Figura 2.43 mostra o armazenamento de água em cada estratégia de irrigação e fração de chuva simuladas para a cultura do feijão.



**Figura 2.43** – Armazenamento de água em cada estratégia de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas para a cultura do feijão.

Através da Figura 2.43 observou-se que o aumento nas lâminas de irrigação e frações de chuva ocasionou em aumento no armazenamento de água no solo em todas as estratégias de irrigação e fração de chuva. Nos valores de CC (%) necessário para elevar a umidade do solo à capacidade de campo (Tabela 2.35) observa-se que, quanto maior o volume de água aplicada, maior é a disponibilidade de água as plantas.

A Tabela 2.36 apresenta os valores de total de água aplicada (mm), precipitação efetiva (mm), produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e produção de matéria seca ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) para a cultura do feijão, obtidos em função da transpiração diária fornecida pelo modelo de extração de água no solo pelas raízes das plantas.

**Tabela 2.36** – Total de água aplicada (irrigação e precipitação - mm), precipitação efetiva (mm), produção de grãos (kg.ha<sup>-1</sup>) e produção de matéria seca (kg.ha<sup>-1</sup>) obtidos na simulação de diferentes lâminas de irrigação para a cultura do feijão.

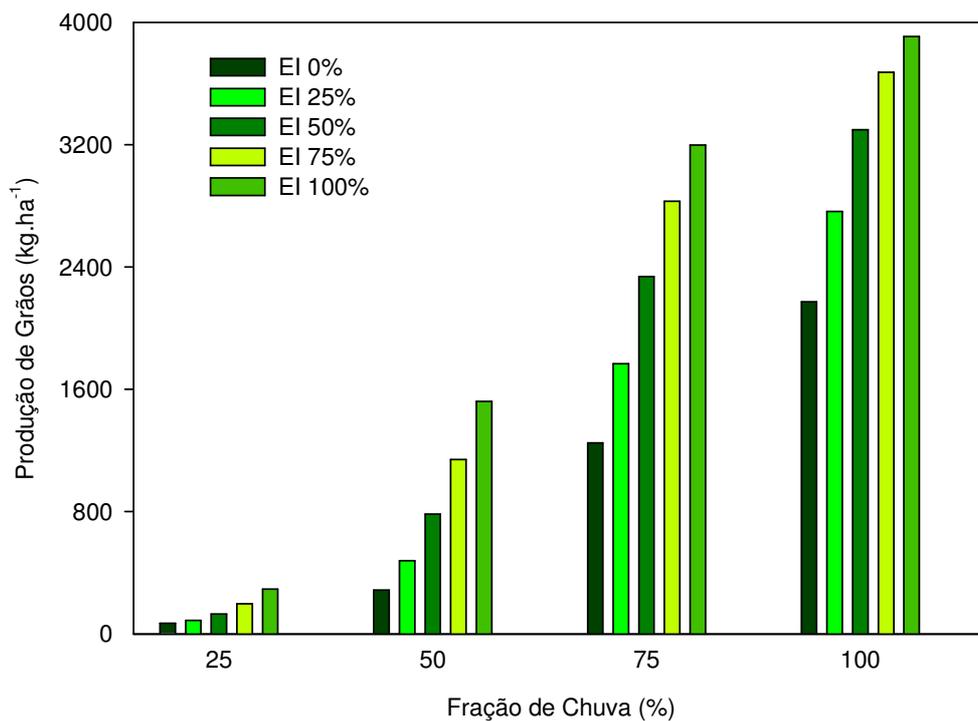
Fração de Chuva (%)	Irrigação (%)	Total de água aplicada (mm)	Precipitação efetiva (mm)	Prod. Grãos. (kg.ha <sup>-1</sup> )	Prod. MS. (kg.ha <sup>-1</sup> )
100	0	336,2	336,2	2172,2	6547,6
	25	382,3	336,2	2762,9	7934,0
	50	398,0	336,2	3298,3	9084,7
	75	474,4	336,2	3674,1	9830,5
	100	520,4	336,2	3909,0	10269,6
	<b>Média</b>			<b>3163,3</b>	<b>8733,3</b>
	<b>D.P.</b>			<b>703,2</b>	<b>1508,6</b>
<b>CV (%)</b>			<b>22,2</b>	<b>17,3</b>	
75	0	280,2	280,2	1248,9	4126,0
	25	326,3	280,2	1767,0	5524,9
	50	372,3	280,2	2337,3	6947,3
	75	418,4	280,2	2829,3	8082,3
	100	464,4	280,2	3198,6	8878,2
	<b>Média</b>			<b>2276,2</b>	<b>6711,7</b>
	<b>D.P.</b>			<b>786,6</b>	<b>1918,5</b>
<b>CV (%)</b>			<b>34,6</b>	<b>28,6</b>	
50	0	191,5	191,5	286,2	1160,2
	25	237,6	191,5	479,8	1811,2
	50	283,6	191,5	783,7	2767,7
	75	329,7	191,5	1141,9	3823,2
	100	375,7	191,5	1520,1	4871,8
	<b>Média</b>			<b>842,3</b>	<b>2886,8</b>
	<b>D.P.</b>			<b>498,3</b>	<b>1497,4</b>
<b>CV (%)</b>			<b>59,2</b>	<b>51,9</b>	
25	0	97,8	97,8	69,0	388,1
	25	143,9	97,8	88,8	450,7
	50	189,9	97,8	130,4	601,5
	75	236	97,8	197,4	845,9
	100	282	97,8	293,0	1183,8
	<b>Média</b>			<b>155,7</b>	<b>694,0</b>
	<b>D.P.</b>			<b>91,1</b>	<b>325,7</b>
<b>CV (%)</b>			<b>58,5</b>	<b>46,9</b>	

Através da Tabela 2.36, verificou-se, que as estratégias de irrigação, independente da fração de chuva apresentaram variabilidade superior a 20% nas produções simuladas. Valores acima de 30% foram encontrados nas frações de chuva de 75%, 50% e 25%, tanto para produção de grãos quanto para produção de

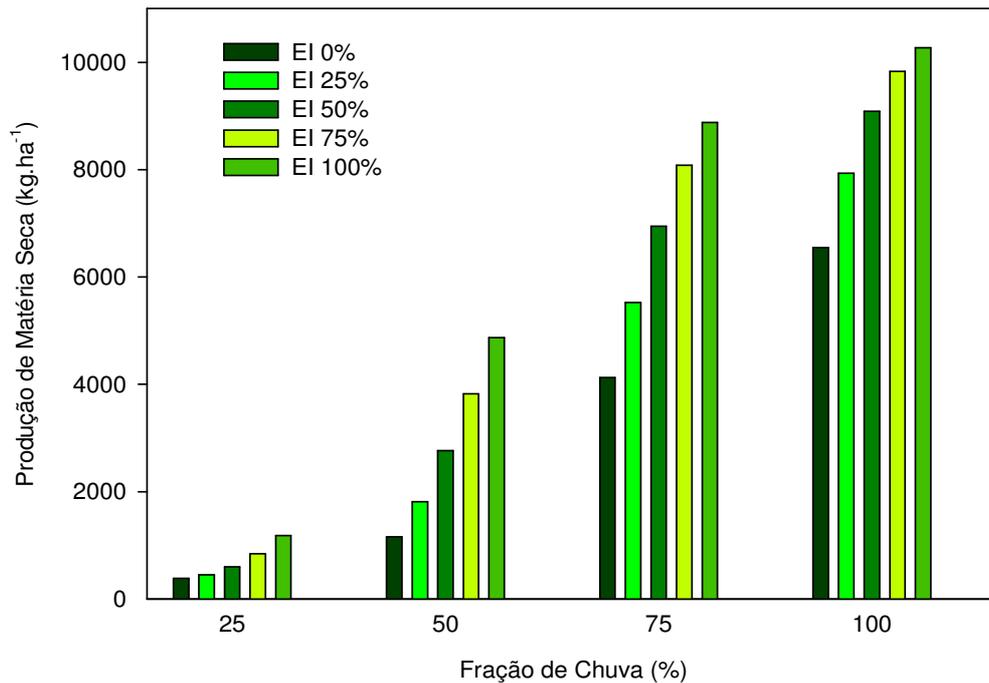
matéria seca. Isso comprova alta variabilidade, quando se utiliza diferentes estratégias de irrigação na cultura do feijão.

Observou-se ainda, que os rendimentos encontrados foram acima da média Nacional e da média do Estado do Rio Grande do Sul quando aplicou-se um total de água a partir de 280,2 mm. No entanto, superou a média de produtividade da variedade em estudo, quando aplicou-se um total de 520,2 mm. Este valor está na faixa relatada na literatura (DOORENBOS & KASSAM, 1994; MATZENAUER et al. 1983, SHAW et al., 1977).

As Figuras 2.44 e 2.45 mostram o comportamento das estratégias de irrigação e frações de chuva simuladas, na produção de grãos e na produção de matéria seca da cultura do feijão.



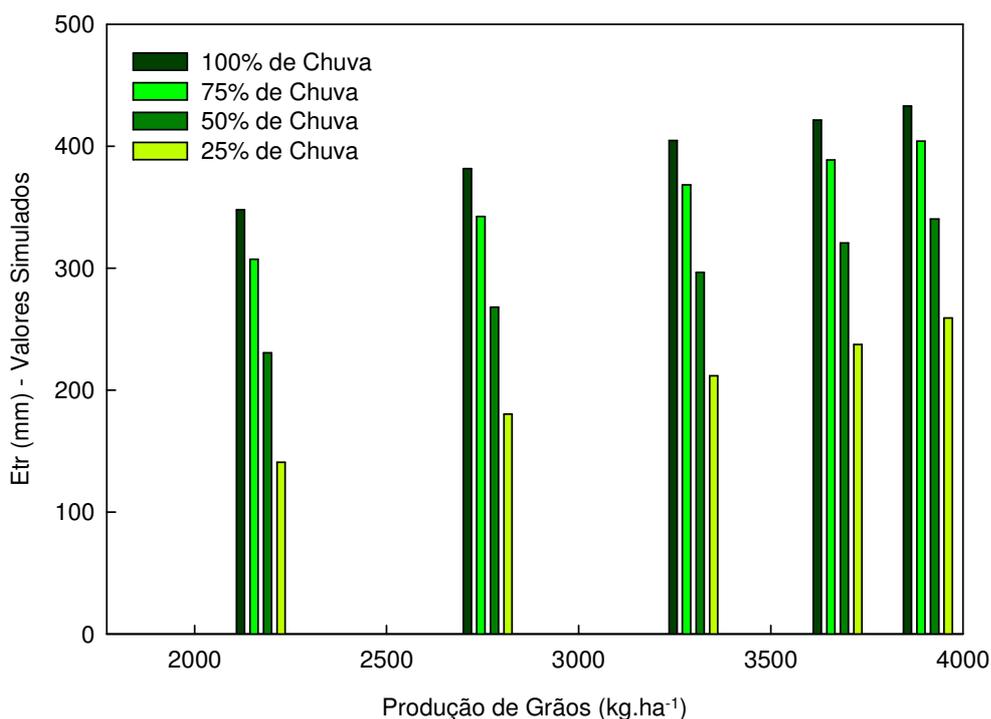
**Figura 2.44** – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de grãos da cultura do feijão.



**Figura 2.45** – Comportamento das estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) simuladas na produção de matéria seca da cultura do feijão.

De acordo com as Figuras 2.44 e 2.45, observou-se que da mesma forma como ocorreu na cultura do milho, o aumento nas frações de chuva e estratégias de irrigação ocasionaram em aumento da produtividade de grãos e matéria seca para a cultura do feijão, ou seja, quando diminuiu a umidade do solo, diminuíram os valores das produções, pois diminuiu a água disponível no solo em relação à capacidade de campo (CC) (Tabela 5.35).

A Figura 2.46 apresenta a evapotranspiração real (Etr) calculada a partir da simulação dos componentes do balanço hídrico para a cultura do feijão nas diferentes estratégias de irrigação e frações de chuva.



**Figura 2.46** – Evapotranspiração real (mm) para diferentes estratégias de irrigação (EI) e frações de chuva (%) para a cultura do feijão.

A Figura 2.46 mostrou um expressivo aumento na produção de grãos com o aumento da Etr ocasionada pelo aumento a disponibilidade hídrica.

A Tabela 2.37 apresenta os valores os valores de eficiência do uso da água (EUA) e eficiência de aplicação de água (EAA), obtidos com relação a produção de grãos e a produção de matéria seca nas diferentes estratégias de irrigação simuladas para a cultura do feijão.

**Tabela 2.37** – Valores eficiência de uso da água obtidos para a produção de grãos (EUA/GR), eficiência de uso da água obtidos para a matéria seca (EUA/MS), eficiência de aplicação da água para a produção de grãos (EAA/GR) e eficiência de aplicação da água para a produção de matéria seca (EAA/MS) encontrados para diferentes lâminas de irrigação na simulação da cultura do feijão.

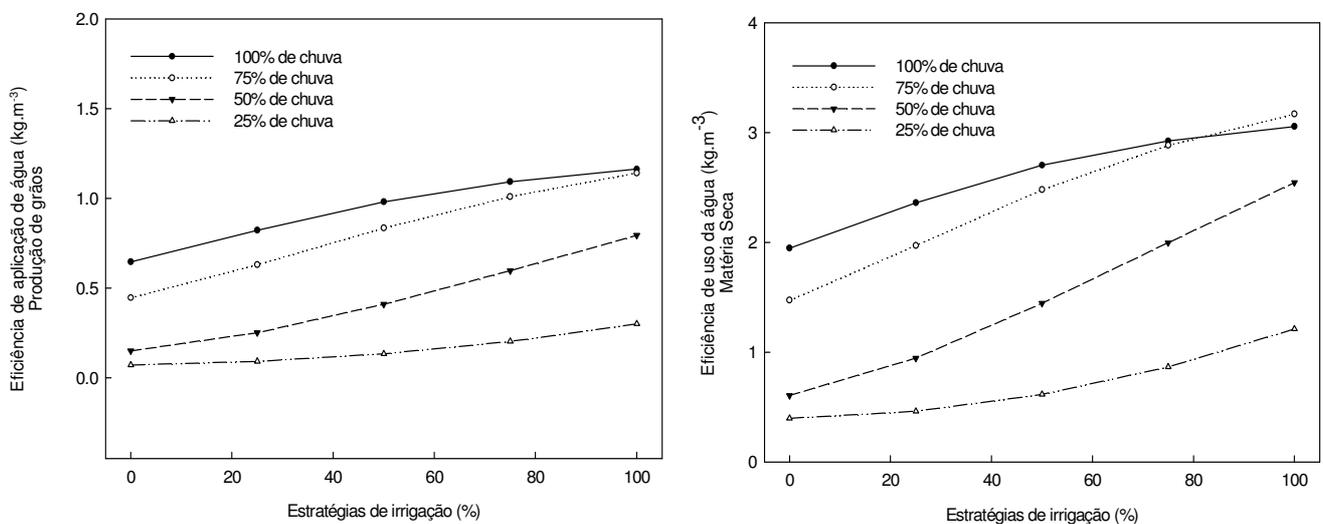
Fração de Chuva (%)	Irrigação (%)	EUA/GR (kg.m <sup>-3</sup> )	EUA/MS (kg.m <sup>-3</sup> )	EAA/GR (kg. m <sup>-3</sup> )	EAA/MS (kg. m <sup>-3</sup> )
100	0	0,65	1,95	0,65	1,95
	25	0,82	2,36	0,72	2,08
	50	0,98	2,70	0,83	2,28
	75	1,09	2,92	0,77	2,07
	100	1,16	3,05	0,75	1,97
75	0	0,45	1,47	0,45	1,47
	25	0,63	1,97	0,54	1,69
	50	0,83	2,48	0,63	1,87
	75	1,01	2,88	0,68	1,93
	100	1,14	3,17	0,69	1,91
50	0	0,15	0,61	0,15	0,61
	25	0,25	0,95	0,20	0,76
	50	0,41	1,45	0,28	0,98
	75	0,60	2,00	0,35	1,16
	100	0,79	2,54	0,40	1,30
25	0	0,07	0,40	0,07	0,40
	25	0,09	0,46	0,06	0,31
	50	0,13	0,62	0,07	0,32
	75	0,20	0,86	0,08	0,36
	100	0,30	1,21	0,10	0,42

Os valores de EUA apresentaram variações de 0,07 a 1,16 kg.m<sup>-3</sup> para a produção de grãos e de 0,40 a 3,05 kg.m<sup>-3</sup> para a produção de matéria seca. Calvache et al. (1997) em trabalho com diferentes regimes de irrigação da cultura do feijão cultivar INIAP404, tais como, irrigação ótima durante todo o ciclo, irrigação deficiente durante todo o ciclo, irrigação tradicional, estresse no período vegetativo, estresse na floração e formação de vagens, estresse no enchimento de vagens e estresse na maturidade, verificaram para EUA os valores de 0,60; 0,64; 0,71; 0,75; 0,60; 0,46 e 0,61 kg.m<sup>-3</sup>, respectivamente.

A EAA variou de 0,06 a 0,77 kg.m<sup>-3</sup> para a produção de grãos e 0,31 a 2,28 kg.m<sup>-3</sup> para a produção de matéria seca. Robaina (1992) trabalhando com simulação de diferentes estratégias de irrigação para a cultura do feijoeiro irrigado, encontrou valores de EAA entre 0,35 a 0,53 para a produção de grãos e 0,64 a 1,04 para a produção de matéria seca.

Doorenbos & Kassam (1979), citam que o valor da EAA para a cultura do feijão varia de 0,3 a 0,6  $\text{kg.m}^{-3}$ , referente a produção de grãos com 10% de umidade, sendo que Hillel (1972) relata valor médio de 0,8  $\text{kg.m}^{-3}$ .

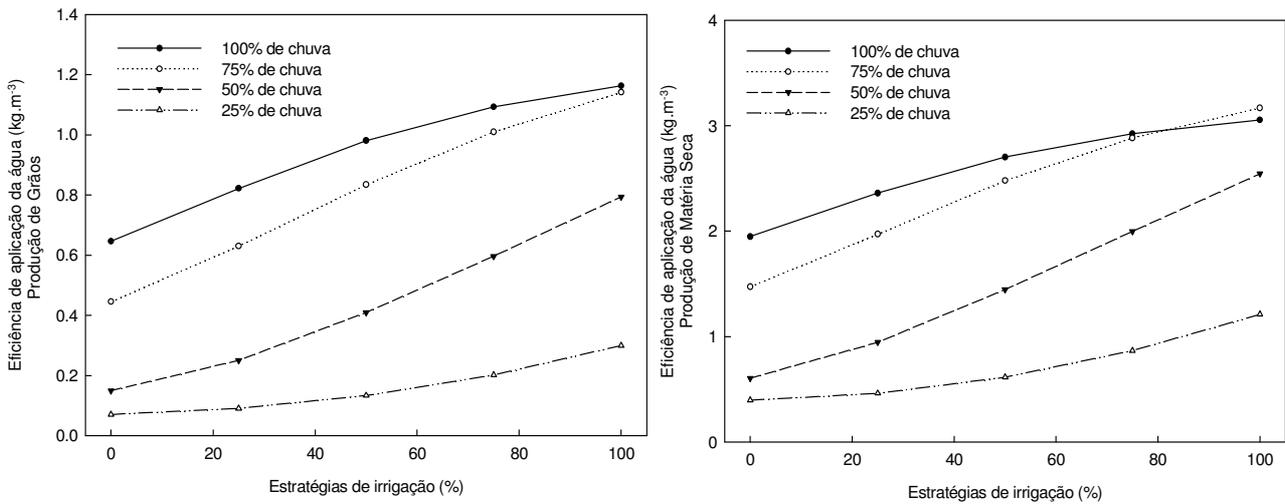
A Figura 2.47 mostra o comportamento da eficiência de uso da água (EUA) obtida para a produção de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) e para produção de matéria seca ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) em relação às diferentes estratégias de irrigação e fração de chuva para a cultura do feijão.



**Figura 2.47** – Relação entre a eficiência de uso da água ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) obtida para produção de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) e para produção de matéria seca ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) nas diferentes estratégias de irrigação na cultura do feijão.

Através da Figura 2.47, observou-se que com o aumento da estratégia de irrigação respondeu em aumento na EUA, tanto na produção de grãos, quanto na produção de matéria seca.

A Figura 2.48 mostra o comportamento da eficiência de aplicação de água (EAA) obtida para a produção de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) e para produção de matéria seca ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) em relação às diferentes estratégias de irrigação e fração de chuva para a cultura do feijão.



**Figura 2.48** – Relação entre a eficiência de aplicação de água (kg.m<sup>-3</sup>) obtida para produção de grãos (kg.ha<sup>-1</sup>) e para produção de matéria seca (kg.ha<sup>-1</sup>) nas diferentes estratégias de irrigação na cultura do feijão.

De acordo com a Figura 2.48, verificou-se que o aumento das estratégias de irrigação responderam em maiores valores de EAA e as reduções nas frações de chuva reduziram estes valores, tanto para produção de grãos quanto para produção de matéria seca. A fração de chuva de 100% ocasionou em reduções de EAA para produção de matéria seca na estratégia de irrigação de 100%.

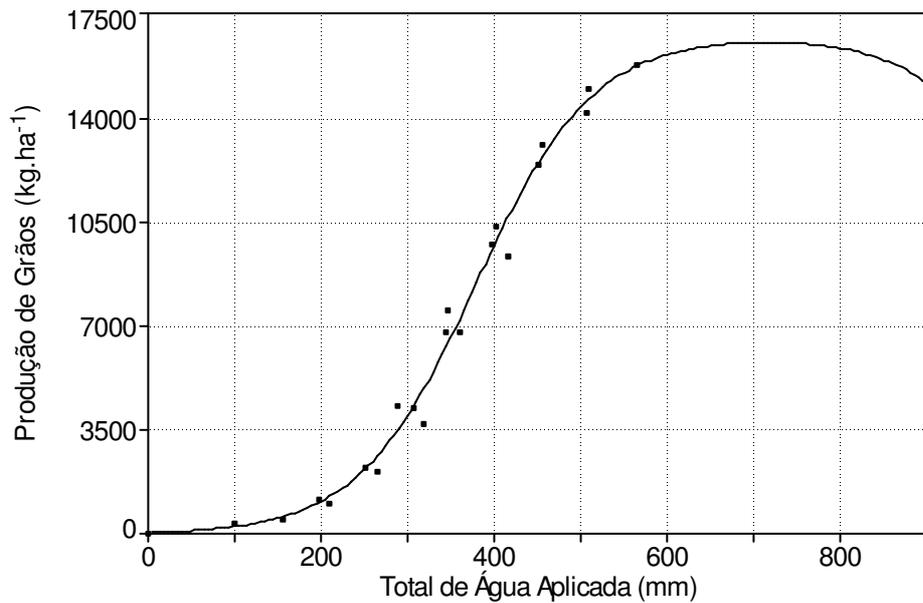
#### 2.3.7.4.3 Funções de produção

A Figura 2.49 apresenta a relação entre a produção de grãos (kg.ha<sup>-1</sup>) simuladas pelo modelo para diferentes estratégias de irrigação e o total de água aplicado para a cultura do milho. Para o ajuste, simulou-se uma fração de chuva e lâmina de irrigação superiores as testadas acima, para verificar o ponto de decréscimo na produção.

A curva de produção ajustou-se a uma equação do tipo

$$y = a \cdot \exp\left(-0,5\left(\frac{|x-b|}{c}\right)^d\right), \text{ com coeficientes iguais a: } a = 16281,779, b =$$

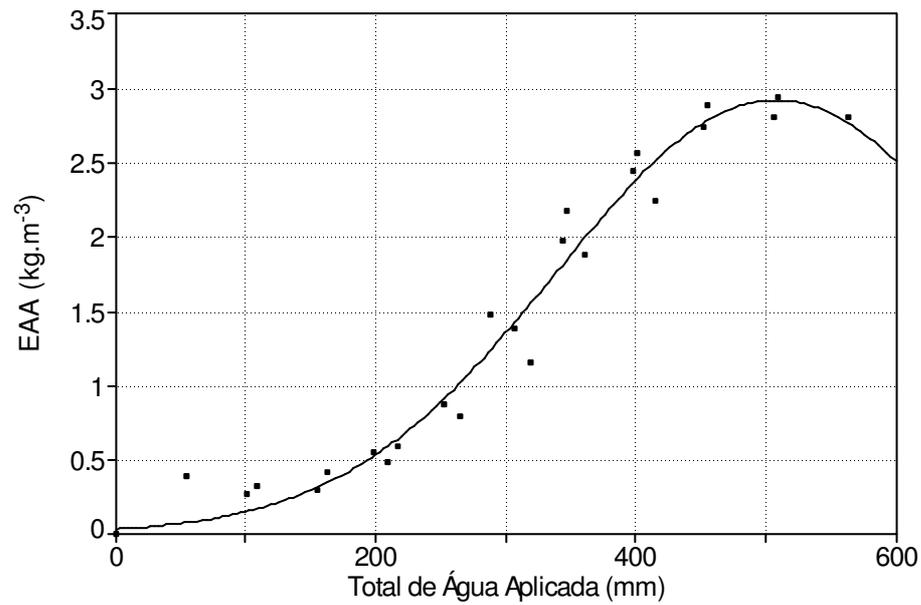
730,637,  $c = 327,378$ ,  $d = 3,821$  e  $r^2 = 0,9951$ .



**Figura 2.49** – Relação entre a produção de grãos (kg.ha<sup>-1</sup>) simuladas pelo modelo para diferentes estratégias de irrigação e o total de água aplicado para a cultura do milho.

Através da Figura 2.49 observou-se que o aumento da lâmina aplicada a partir de 800 mm causou redução na produção de grãos da cultura do milho. Estes valores estão de acordo aos relatados na literatura para o adequado requerimento hídrico da cultura (DOORENBOS & KASSAM, 1994).

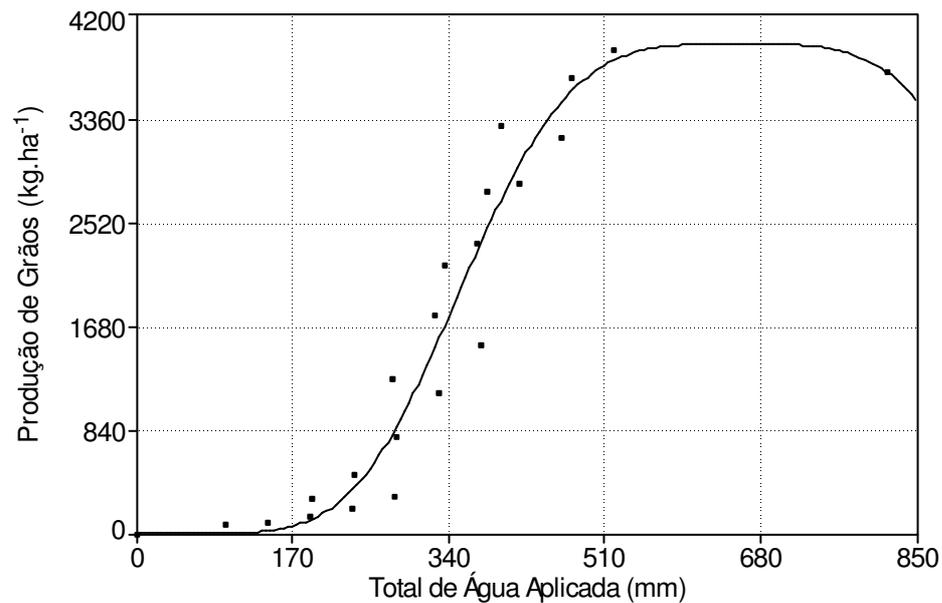
A Figura 2.50, mostra a resposta da eficiência de aplicação de água (EAA) em função do total de água aplicada (mm). A curva de produção ajustou-se a uma equação do tipo  $y = a \cdot \exp\left(-0,5 \left(\frac{|x-b|}{c}\right)^d\right)$ , com coeficientes iguais a:  $a = 2,909$ ,  $b = 507,713$ ,  $c = 167,308$ ,  $d = 2,021$  e  $r^2 = 0,981$ .



**Figura 2.50** – Relação entre a variação da produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e o total de água aplicada (mm) para a cultura do milho.

Através da Figura 2.50, observou-se que a EAA apresentou decréscimo a partir da lâmina de 550 mm, aproximadamente. Isso nos remete a dizer, que em lâminas superiores a esta, o aproveitamento pela planta será reduzido.

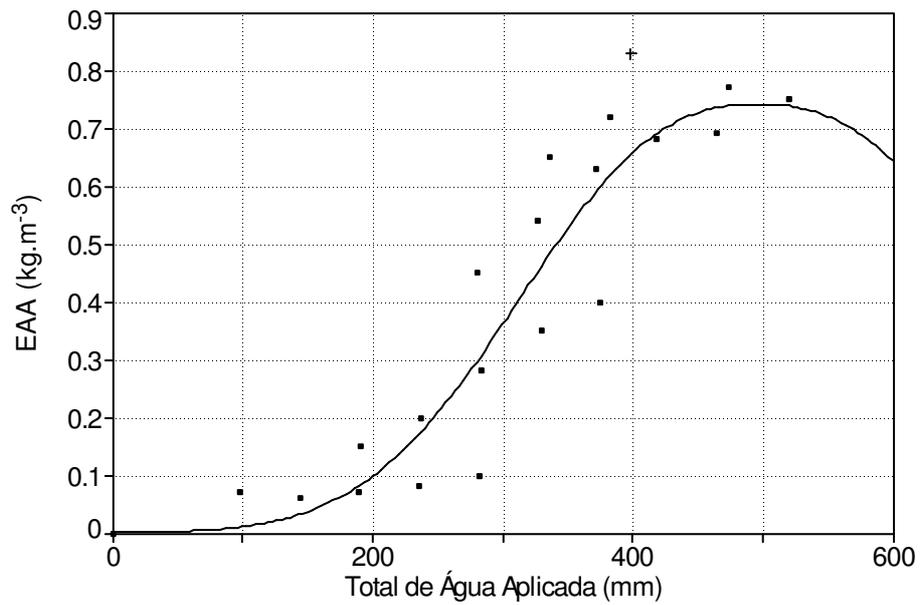
A Figura 2.51 apresenta a relação entre a produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) simuladas pelo modelo para diferentes estratégias de irrigação e o total de água aplicado para a cultura do feijão.



**Figura 2.51** – Relação entre a produção de grãos (kg.ha<sup>-1</sup>) simuladas pelo modelo para diferentes estratégias de irrigação e o total de água aplicado para a cultura do feijão.

Através da Figura 2.51 observou-se que o aumento da lâmina aplicada a partir de 500 mm, aproximadamente, causou redução na produção de grãos da cultura do feijão, causado pelo excesso hídrico. Este valor está de acordo aos encontrados na literatura para o adequado requerimento hídrico da cultura do feijão (SILVEIRA & STONE, 2001; DOORENBOS & KASSAM, 1994).

A Figura 2.52, mostra a resposta da eficiência de aplicação de água (EAA) em função ao total de água aplicada (mm) em cada fração de chuva. A curva de produção ajustou-se a uma equação do tipo  $y = a \cdot \exp\left(-0,5 \left(\frac{|x-b|}{c}\right)^d\right)$ , com coeficientes iguais a:  $a = 0,740$ ,  $b = 496,360$ ,  $c = 170,090$ ,  $d = 2,523$  e  $r^2 = 0,921$ .



**Figura 2.52** – Relação entre a variação da produção de grãos ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) e o total de água aplicada (mm) para a cultura do feijão.

Da mesma forma como ocorreu com a cultura do milho, observou-se que a EAA apresentou decréscimo a partir da lâmina de 500 mm, aproximadamente. Isso nos remete a dizer, que em lâminas superiores a esta, o aproveitamento pela planta será reduzido.

### 3 CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos propostos, a análise dos resultados obtidos e nas condições em que a pesquisa foi realizada, conclui-se que:

#### 3.1 Experimento de Campo

- a) As variações de índice de área foliar (IAF), matéria seca total (MST) e profundidade do sistema radicular (Prz), nas culturas de milho e feijão podem ser representadas por modelo sigmoidal. Estes parâmetros apresentam ajuste adequado quando relacionados com o acúmulo térmico ocorrido no período;
- b) A disponibilidade hídrica altera o ajuste dos dados de IAF, MST e Prz em função da temperatura;
- c) Para ambas as culturas, a evolução do IAF segue o padrão característico de plantas anuais e apresenta crescimentos com aumento da oferta de irrigação. O Tratamento T5 (100% da evapotranspiração) alcança o valor máximo obtido de IAF, sendo  $7 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$  no estágio de enchimento de grãos;
- d) A MST apresenta taxas de variação no estágio inicial das culturas, porém, à medida que a planta cresce estas taxas aumentam e tendem a se estabilizar ao final do ciclo. Seu acúmulo nos tratamentos com disponibilidade hídrica menor em relação ao bem irrigado é reduzido, demonstrando que ocorre deficiência hídrica e esta influencia na produção de MST;
- e) A Prz é expressivamente reduzida nas menores lâminas de irrigação para ambas as culturas, que apresentam profundidades máximas de aproximadamente 35cm para a cultura do feijão e 60cm para a cultura do

milho. Disponibilidades hídricas inferiores e superiores ocasionam redução na Prz;

- f) Os componentes de produção das culturas em estudo apresentam crescimento ocasionado pelo aumento das lâminas de irrigação;
- g) O índice de colheita (IC) determinado para as culturas em estudo permite estimar a produção de grãos a partir da MST e eleva-se com o incremento de disponibilidade hídrica;
- h) O uso da irrigação suplementar na cultura do milho através de sistema de irrigação convencional aumenta a produção de grãos em 20,4%, 52,2%, 77,1%, 84,8% e 95,4%, para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente, em relação ao tratamento testemunha sem irrigação suplementar; já para a cultura do feijão, os acréscimos são de 23,2%, 43,2%, 63,6%, 87,9%, 88,3%, para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente, em relação ao tratamento testemunha sem irrigação suplementar;

### 3.2 Experimento Simulado

- a) O IAF, MST e Prz podem ser estimados a partir dos coeficientes da equação sigmoideal e da soma de graus dia acumulado no período. Os coeficientes linear  $a$ , angular  $b$  e de correlação  $r^2$ , demonstram adequada eficiência na simulação realizada;
- b) O modelo de produção para as condições em estudo apresenta uma calibração dentro da faixa aceitável para modelos de simulação de produção de culturas agrícolas;

- c) O teste dos dados simulados para as culturas em estudo demonstra variação inferior a 10% e igualdade estatística na comparação dos dados medidos no experimento de campo com os dados simulados pelo modelo;
- d) Aplicação do modelo de produção para o acúmulo de matéria seca total diária:
- O modelo de produção é capaz de simular adequadamente o acúmulo de matéria seca total diária demonstrando coeficientes linear  $a$  próximos de 0, angular  $b$  próximos de 1 e de correlação  $r^2$  acima de 0,99 obtidos pela análise de regressão para ambas as culturas na comparação dos dados medidos no experimento de campo, com os dados obtidos pelo modelo de simulação;
- e) Aplicação do modelo de produção para a comparação de diferentes estratégias de irrigação:
- As diferentes estratégias de irrigação (EI) influenciam nos componentes do balanço hídrico;
  - O aumento no total de água aplicada aumenta o armazenamento de água no solo, no entanto, aumenta também as perdas por escoamento superficial, evaporação pelo solo, transpiração pelas plantas e drenagem;
  - Os valores de eficiência de uso da água (EUA) aumentam com o aumento da EI. Na cultura do milho o maior valor de EUA é obtido para EI de 100%, com uma fração de chuva de 75%, na produção de grãos e na produção de matéria seca; já para a cultura do feijão, obteve-se maior EUA para a produção de grãos na fração de chuva de 100% e EI de 100%, sendo que a produção de matéria seca a máxima EUA ocorreu na fração de chuva de 75% e EI 100%;
- f) Aplicação do modelo de produção para funções de produção:
- Aplicação de água acima de 800 mm e 500 mm acarreta em redução na produção de milho e feijão, respectivamente. Estes valores estão nos limites encontrados na literatura;
  - A eficiência de aplicação de água a partir de 550 mm e 500 mm para o milho e o feijão, respectivamente, é reduzida;

- g) O modelo proposto pode ser utilizado como ferramenta para o planejamento regional da implantação da cultura de milho e feijão em condições de irrigação e possibilita a identificação das melhores estratégias de irrigação para ambas as culturas que resultem em elevadas produções de grãos;
- h) O modelo de produção mostrou ser uma excelente ferramenta para previsão de rendimento das culturas (milho e feijão) em condições de irrigação e auxiliando a tomada de decisão de produtores e técnicos da região em estudo.

### **3.3 Sugestões**

Como sugestões para futuras pesquisas, com o uso do modelo matemático em estudo, recomenda-se:

- a) A aplicação da viabilidade econômica, com a utilização dos dados simulados pelo modelo;
- b) A aplicação do modelo em outras regiões, próximas a região em estudo, que apresentem diferentes características físicas de solo;
- c) O teste de modelo utilizando experimentos de campo oriundos de anos com disponibilidade hídrica limitada para as culturas, uma vez que, o modelo tem como principal vantagem indicar a estratégia ideal (quando e quanto irrigar).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFHOLDER, F.; RODRIGUES, G. C.; ASSAD, E. D. Modelo agroclimático para a avaliação do comportamento do milho na região dos cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.10, p.993-1002, 1997.

AFUKWA, J.J.; CROOKSTON, R. K.; JONES, R. J., Effect of temperature and sucrose availability on black layer formation in maize. **Crop Science**, Madison, v. 24, p. 285-288, 1984.

AGRIANUAL. **Anuário da agricultura brasileira**. 13 ed. São Paulo: FNP. Consultoria, 2008.

ALDRICH, S. R.; SCOTT, W. O.; LENG, E. R. **Modern corn production**. 2.ed. Champaign: A & L Publication, 1982. 371 p.

ALVIM, R.; ALVIM, P. T. Efeito da densidade de plantio no aproveitamento da energia luminosa pelo milho (*Zea mayz*) e pelo feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), em culturas exclusivas e consorciadas. **Turrialba**, v. 19, p.389-393, 1969.

ANDRADE, L.M. de. **Efeito de diferentes profundidades freáticas sobre a evapotranspiração e sobre a produção e os componentes da produção do milho doce (*Zea mays* L.)**. Viçosa. 1991. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

ANDRADE F. H.; UHART S. A.; CIRILO A. Temperature affects radiation use efficiency in maize. **Field Crops Research**. v. 32, p. 17-25, 1993a.

\_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; FRUGONE M. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize: Shade versus plant density effects. **Crop Science**. v. 33, p. 482-485 1993b.

ANDREATTA, J. A. et al. Monitoramento da irrigação e da aplicação de defensivos agrícolas em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. cv., IAC Carioca 80). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 7., 1991, Viçosa. **Resumos...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia; Universidade Federal de Viçosa, 1991. p. 268-270.

ARAUJO, R. S.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, M. J. O. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Potafos, 1996. 786 p.

ASSIS, J. P. **Modelo estocástico para estimação da produtividade potencial de milho em Piracicaba, SP**. 2004, 168p. Tese (Doutorado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2004.

\_\_\_\_\_. Dados climáticos simulados e produtividade potencial do milho, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 5, p. 731-737, 2006.

BAIER, W. Noto on the terminology of crop-weather models. **Agricultural Meteorology**, Amsterdã, v. 20, n. 2, p. 137-145, 1979.

BARRETO, A. C. **Efeito do sistema de rotação, sucessão e níveis de calagem sobre características físicas e químicas do solo e no desenvolvimento radicular e produção de grãos de milho (*Zea mays* L.)**. Piracicaba, 1991. 154 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

BASCUR, G.; OLIVA, M. A.; LAING, D. Termometria infrarroja em seleccion de genotipos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) resistentes a la sequia. I. Bases fisiologicas. **Turrialba**, São José, v. 35, p. 43-47, 1985a.

\_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. Termometria infrarroja em seleccion de genotipos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) resistentes a sequia. II. Crecimiento y productividad. **Turrialba**, São José, v. 35, p. 49-53, 1985b.

BELSHE, D. et al.. **Economic issues with dry-edible eans**. Kansas: Kansas State University Agricultural, 2001. 6 p.

BENTO, D. A. V. **Mapeamento de QTLs para produção de grãos e seus componentes em uma população de milho tropical**. 2006. 134 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo. Piraciaba, 2006.

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". **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 4, p. 387-392, 1989.

\_\_\_\_\_. et al. Efeito de variáveis micrometeorológicas e disponibilidade hídrica no solo sobre resistência estomática à difusão gasosa em feijoeiro. **Turrialba**, São José, v. 41, n. 4, p. 445-451, 1991.

\_\_\_\_\_. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. Brasília: **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 9, p.831-839. 2004.

\_\_\_\_\_. et al. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 2, p. 243-249, 2006.

BERGONCI, J. I. et al. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 7, p. 949-56, 2001.

BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. In: Bergamaschi, H. et al. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**, Porto Alegre: UFRGS, 1992. p.11-23.

BERNARDES, M. S. **Modelagem matemática aplicada à agricultura**. Anuário de agricultura brasileira. São Paulo, 2000. p.80-81.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5. ed. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 1989. 596 p.

\_\_\_\_\_. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 2008. 625 p.

BERNARDON, T. **Componentes de produtividade de grãos de milho (Zea mayz L.), visando obter parâmetros para a agricultura de precisão**. 2005. 95 f. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

BOORGES, W. G.; RITCHIE, J. T. Economic and risk analysis of irrigation decisions in humid regions. **Journal Production Agricultural**. v. 1, n. 2, p. 116-122, 1998.

BRANDES, D. et al. Efeito da população de plantas e da época de plantio no crescimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), mudanças morfológicas e produção de matéria seca. **Experientiae**, Viçosa, v. 14, n. 1, p. 1-48, 1972.

BROOKS, R. H., & COREY, A.J . Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Paper 3**, Colo. State Univ., Fort Collins, CO, 1964.

BRUNINI, O.; THURTELL, G. W. Resistência ao fluxo de água no sistema solo planta – um estudo com plantas de milho cultivadas sob condições controladas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 33-40, 1998.

CALVACHE, A. M. et al. Efeito da deficiência hídrica e da adubação nitrogenada na produtividade e na eficiência do uso de água em uma cultura do feijão **Scientia Agricola**. v. 54 n. 3, 1997.

CALVACHE, A. M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Efeito de épocas de deficiência hídrica na evapotranspiração atual da cultura do feijão cv. Imbabello. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55, n. 3, p. 485-497, 1998.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extrível e a produtividade das culturas. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 183-188, 1995.

\_\_\_\_\_. Disponibilidade de água às plantas em solos arenosos. In: **Plantio direto em solos arenosos: alternativa de manejo para a sustentabilidade agropecuária**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Dept<sup>o</sup> de solos, 1998. p.21-51.

\_\_\_\_\_. et al. Efeito da lâmina de irrigação na senescência foliar do feijoeiro. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 4, p. 545-556, 2007.

CHARLES-EDWARDS, **Physiological determinants of crop growth**. London: Academic Press, 1982. 1965 p.

CHRISTOFIDIS, D. **A água e a crise alimentar**. Disponível em: <http://www.iica.org.br/Aguatab/Demetrios%20Christofidis/P2TB01.htm>. 1997. Acesso em: 04 jan. 2007.

CIRILO, A. G.; ANDRADE, F. H. Sowing date and maize productivity. I. Crop growth and dry matter partitioning. **Crop Science**, Madison, v. 34, p. 1039-1043, 1994a.

\_\_\_\_\_. Sowing date and maize productivity. II. Kernel number determination. **Crop Science**, Madison, v. 4, p. 1044-1046, 1994b.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 394 p.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/>. Acesso em: 31 mar. 2007.

COSTA NETO, P. O. Correlação e Regressão. In: ESTATÍSTICA. São Paulo: E. Blucher, p.178-228, 1977.

COSTA, L. C. Modelagem e simulação em agrometeorologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9., 2001, Santa Maria. **Anais...**Santa Maria: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2001. p. 75-82.

\_\_\_\_\_.; BARROS, A. H. C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 75-82, 2001.

CRUZ, J. C. et al. In: MANEJO DA CULTURA DO MILHO. 4 ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br>>. Acesso em 12 fev. 2008.

DAKER. A. **Irrigação e drenagem**. 4. ed. Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos, 1970. 453 p. (Água na Agricultura, 3 v.)

DAVIES, W. J.; ZHANG, J. Root signals and the regulation of growth and development plants in drying soil. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Standford, v. 2, p. 55-76, 1991.

DE WITT, C. T. Simulation for assimilation, respiration, on transpiration of crop. Ageningen: A Halsted.J. Wiley, 1978. 140 p.

DENMEAD, O. T.; SHAW, R. H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 43, p. 385-390, 1962.

DIDONET, A. D.; SILVA, S. C. Elementos climáticos e produtividade do feijoeiro. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 25, n. 223., p.13-19, 2004.

DONALD, C. M.; HAMBLIN, J. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. **Advances in Agronomy**, v. 28, p. 351-405, 1976.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Roma : FAO, 1979. 306p. ( FAO. Irrigação e Drenagem, 33).

\_\_\_\_\_. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução: Gheyi, H. R. et al. Paraíba. ed. da UFPb. 1994. 307 p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1984. 144 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A.L. Produção de feijão. Guaíba: Agropecuária, cap. 1: Ecofisiologia e fenologia, 2000. p. 23-48 FANCELLI, A. L. **Tecnologia para a produção do feijoeiro**. Piracicaba: SEBRAE, 1994. 154 p.

\_\_\_\_\_. et al. Modelo fisiológico para estimativa da produtividade da cultura de feijão. In: Congresso Nacional de Feijão, 7, 2002, Viçosa. **Anais...** Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002. v. 1, p. 66-69.

\_\_\_\_\_. Modelos matemáticos-fisiológicos para estimar matéria seca da parte aérea e produtividade de grãos de milho. **Revista Brasileira Agrociência**, Pelotas, v. 11, n. 4, p. 409-418, 2005.

DURÃES, F. O. M.; et al. Partição de fitomassa e limitações do rendimento de milho (*Zea mays* L.) relacionadas com a fonte-dreno. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, São Carlos, 1993, v. 5, n. 1, p. 90-91.

DWYER, L. M.; STEWART D. W., Effects of leaf age and position on net photosynthetic rates in maize (*Zea mays* L.) **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 37, p. 29-46, 1986.

EARLEY E. B., et al. Effect of shade on maize production under field Conditions. **Crop Science**. v.6, p. 1-7, 1966.

EMATER. Informe técnico. Disponível em : < <http://www.emater.tche.br/site/>> Acesso em 21 set. 2009.

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

\_\_\_\_\_. Origem e história do feijão. Disponível em: <[www.cnpat.embrapa.br/feijao/historia](http://www.cnpat.embrapa.br/feijao/historia)>. Acesso em 17 nov. 2006.

\_\_\_\_\_. Arroz e feijão. Disponível em: <[http://www.embrapa.br/kw\\_storage/keyword.2007-07-19.4200885731](http://www.embrapa.br/kw_storage/keyword.2007-07-19.4200885731)>. Acesso em 28 dez. 2008.

ENGLISH, M.; RAJA, S. N. Perspectives on deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 32, n. 1, p. 1-14, 1996.

FANCELLI, A. L. Fenologia e exigências climáticas do feijoeiro. In: \_\_\_\_\_.; DOURADO NETO, D. (Eds.) **Feijão irrigado**. 3. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 1992. p. 5-22.

\_\_\_\_\_.; DOURADO NETO, D. Fenologia do milho. In: \_\_\_\_\_. (Coord.). **Tecnologia da produção de milho**. Piracicaba: 1997. p. 131-134.

\_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. Milho: fisiologia da produção. In: SEMINÁRIO SOBRE FISILOGIA DA PRODUÇÃO E MANEJO DE ÁGUA E DE NUTRIENTES NA CULTURA DO MILHO DE ALTA PRODUTIVIDADE, 1996. **Palestras....** Piracicaba: ESALQ/USP-POTAFÓS, 1996. p. 1-29.

\_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. **Tecnologia da produção de milho**. Piracicaba: FEALQ/ ESALQ/ USP, 1999. 360 p

\_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. **Produção de milho**. Guaíba, RS: Agropecuária, 2000. 360 p.

\_\_\_\_\_. Ecofisiologia de plantas de lavouras. In: CARLESSO, R. (Ed.). **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Reimar Carlesso, 2001. p. 59-73.

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.

\_\_\_\_\_ et al. Simulação da fenologia e produção do feijoeiro pelo modelo BEANGRO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., Piracicaba, 1997. **Anais...** Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997. p. 141-142.

FARINELLE, R.; LEMOS, L. B.; NAGATA, C. C, Desempenho agrônômico de genótipos de feijão. In: VIII CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISAS DE FEIJÃO. Goiânia, 2005 Doc 182, CNPAF – Embrapa. **Anais...** Santo Antônio de Goiás, 2005, p. 785-788.

FEDDES, R. A.; KOVALIK, P. J.; ZARADNY, H., **Simulation of Field water use and crop yield**. New York: John Wiley & Sons, 1978, 188 p.

FERREIRA, V. M.; MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M., Produtividade de genótipos de milho (*Zea mays L.*) sob manejo diferenciado de irrigação e adubação. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 24, n. 3, p. 663-670, 2000.

FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M. **Modelo para estimativa de produtividade da cultura de milho no Estado de São Paulo**. 2004. 100 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

FIGUERÊDO, S. F. **Estabelecimento do momento de irrigação com base na tensão da água no solo para a cultura do feijoeiro**. 1998. 94 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem)- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

FIGUEIREDO, M. G. escolha da lâmina ótima de irrigação para feijão, de acordo com o nível de aversão ao risco por parte do produtor. In: 55º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 55, Foz de Iguaçu, 2006. **Anais...** Disponível em: < [www.sober.org.br/palestra/anais\\_sober\\_final\\_4\\_16.pdf](http://www.sober.org.br/palestra/anais_sober_final_4_16.pdf) >

FORNASIERI FILHO, D. **A cultura do milho**. Jaboticabal: Funep, 1992. 273 p.

FORSYTHE, W. M. Las propiedades físicas, los factores físicos de crecimiento y la productividad del suelo. **Fitotecnia Latinoamericana**, San Jose, v. 4, n. 2, 1967.

FRANÇA, S. **Modelagem do crescimento de milho em função da radiação solar e da temperatura do ar, com e sem irrigação**. 1997. 87 f. Dissertação. (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

\_\_\_\_\_.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G. Modelagem do crescimento do milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de graus-dia, com e sem irrigação, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria. v. 7, n. 1, p.59-66, 1999.

FREITAS, J. G. et al. Trigo: efeito de três faixas de umidade na evapotranspiração real e na produção de grãos e seus componentes. **Bragantia**, Campinas, n. 44, v. 2, p. 515-530, 1985.

FREITAS, S. L. et al. Simulação da produtividade do milho pelo modelo CERES-Maize em função da lâmina e da uniformidade de aplicação de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 2/3, p. 225-232, 2004.

FRIZZONE, J. A. **Irrigação por aspersão: uniformidade e eficiência**. Piracicaba: ESALQ - Depto. Engenharia Rural, 1992. 53p. Série Didática, 003.

GADIOLI, J. L. et al. Temperatura do ar, rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma calórica. **Scientia Agrícola**, v. 57, n. 3, p. 377-383, 2000.

GARCIA, A. G. et al. Logistic rice model for matter and nutrient uptake. **Scientia Agrícola**, v. 60, n. 3, p. 481-488, 2003.

GOMES, H.P. **Engenharia de irrigação**. 2. ed. Campina Grande: UFPB, 1997.

GOMES, A. A. et al. Acumulação de biomassa, características fisiológicas e rendimento de grãos em cultivares de feijoeiro irrigado e sob sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 10, p. 1927-1937, 2000.

GOMES, P. F. **Curso de estatística experimental**. 9 ed. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, Editora Nobel, 1981, 430p.

\_\_\_\_\_. **Curso de estatística experimental**. São Paulo: Nobel, 1985. 467 p.

GOMIDE, C. A. M.; GOMIDE, J. A.; ALEXANDRINO, E. Índices morfogênicos e de crescimento durante o estabelecimento e a rebrotação do capim-mombaça (*Panicum maximum* Jacq.). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, n. 4, p. 795-803, 2003.

GONZAGA NETO, L. Produtividade e competitividade dependem do aumento de hectares irrigados. **Revista dos Agrônomos**, v. 3, n. 1, p. 14-20, 2000.

GOUDRIAAN, L.; van LARR, H. H., **Modeling potential crop growth processes: text book with exercises**. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 1994. 283 p.

GREGORY, F. G. The effect of climatic conditions on the growth of barley. **Annals of Botany**, London, 40:1-26, 1926.

GUANDIQUE, M. E. G. **Balanço hídrico no solo e consumo de água pela cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado**. Piracicaba. 1993. 94 p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia)- Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz", USP, 1993.

GUIMARÃES, C. M. Relações hídricas. In: Araújo, R.S.; Rava, C.A.; Stone, L.F. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Potafos, 1996. 786 p.

\_\_\_\_\_. Efeitos fisiológicos do estresse hídrico. In: ZIMMERMANN, M. J. de O.; ROCHA, M.; YAMADA, T. **Cultura do feijoeiro: Fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: POTAFÓS, 1988. p. 157-174.

GUISCHEM, J. M. et al. Crescimento e desenvolvimento da cultura do milho (*Zea mays*, L.) em semeadura tardia e sua relação com graus-dia e radiação solar global. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 2, p. 251-260, 2001.

HAAG, H. P. et al. Absorção de nutrientes pela cultura do feijoeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 26, n. 30, p. 381-391, 1967.

HATTERSLEY, P. W. Characterization of C<sub>4</sub> type leaf anatomy in grasses (Poaceae). Mesophyll:bundles sheath area ratios. **Annual of Botany**, v. 53, p. 163-179, 1984.

HEINMANN, A. B. et al. Center pivot irrigation management optimization using the CROPGRO model. **Transaction ASAE**, St. Joseph, v. 43, n. 6, p. 1507-1516, 2000.

HENCKEL, P. A. Physiology of plants under drought. **Annual review of plant physiology**, v.15, p.363-86, 1964.

HESKETH J. D.; WARRINGTON I. J., Corn growth response to temperature: rate and duration of leaf emergence. **Agronomy**. v. 81, p. 696-701, 1989.

HILLEL, D. The field water balance and water use efficiency. In: **Optimizing the soil physical environment towards greater crop yields**. New York: Academic Press, 1972. p. 79-100.

HOOGENBOOM, G. et. al. Crops models. In: TSUJI, G.Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. (Ed.). DSSAT v3, **decision support system for agrotechnology transfer**. Honolulu: University of Hawaii, 1994. cap. 2, v. 2, p. 95-244.

\_\_\_\_\_. et al. BEANGRO: a process-oriented dry bean model with a versatile user interface. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 182-190, 1994.

**IAPAR** – Instituto Agrônômico do Paraná. Características da variedade Uirapuru. Disponível em: [www.iapar.br](http://www.iapar.br). Acesso em 28 jun. de 2008.

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Agricultura. Disponível em < [www.sidra.ibge.gov.br](http://www.sidra.ibge.gov.br) >. Acesso em: 03 ago. 2009.

INFORZATTO, R.; MIYASAKA, S. Sistema radicular do feijão em dois tipos de solo no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 22, p. 477-481, 1963.

JAUER, A. et al. Comportamento da cultivar BR-IPAGRO 44- Guapo Brilhante de feijoeiro em quatro populações de plantas na safrinha em, Santa Maria–RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 201-206, 2003.

JOBIM, C. Análise de viabilidade econômica da irrigação em face de cenários econômicos: aplicação ao feijão irrigado no RS, Porto Alegre, 2007. 150 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, URGs, 2007.

JONES, L. H. Adaptive responses to temperature in dwarf french beans, *Phaseolus vulgaris* L. **Annals of Botany**, London, v. 35, p. 581-596, 1971.

JONG, S. K.; BREWBAKER, J. L.; LEE, C. H. Effects of solar radiation on the performance of maize in 41 successive monthly plantings in Hawaii. **Crop Science**, n. 22, p. 13-18. 1982.

KATTAN, A. A; FLEMING, J. W. Effect of irrigation at specific stages of development on yield, quality, growth and composition of beans. Proceedings of the **American Society Horticultural Science**, New York, v. 68, p. 329-342, 1956.

KINIRY, J. R. et al. Evaluation of two maize models for nine U.S. locations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 421- 426, 1997.

\_\_\_\_\_. et al. The photoperiod sensitive interval in maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 687, 1983b.

KLAR, A.E. **Irrigação**: frequência e quantidade de aplicação de água. São Paulo: Nobel, 1991. 156 p.

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.

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic, 1995. 495 p.

KUNZ, J. H., et al. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 11, p. 1511-1520, 2007.

LAFITTE, H. R.; EDMÉADES, G. O. Association between traits in tropical maize inbred lines and their hybrids under high and low soil nitrogen. **Maydica**, p. 259-267, 1995.

LAING, D. R.; JONES, P. G.; DAVIS, J. H. C. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In: GOLDWORTHY, P. R.; FISHER, N. M. (Ed.). **The physiology of tropical field crops**. New York: J. Wiley, 1984. p. 305-351.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2000. 531 p.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba: ESALQ/ESALQ, 1995, 497 p.

LIEDGENS, M. M. **Modelos numéricos para a descrição do crescimento da planta de soja (*Glycine max* L. Merrill, cultivar IAC15) em condições sazonais diferenciadas**. 1993. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

LUCCHESI, A. A. Fatores da produção vegetal. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p. 1-11.

MACHADO, E. C., FURLANI, P. R., Deficiência hídrica no consume de água de dois cultivares de milho crescidos em solução nutritive. **Bragantia**, Campinas, n. 44, v. 1, p. 492-504, 1985.

MACKAY, D. C.; EAVES, C. A. Influence of irrigation treatments on yields and on fertilization by sweet corn and snap beans. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 42, p. 219-228, 1962.

MAFRA, R. C. et al. Efeitos da população de plantas e da época de semeadura na crescimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **IV. Absorção de nutrientes.**, Viçosa, v. 17, n. 9, p. 217-239, 1974.

MAGALHÃES, P. C.; JONES, R. Aumento de fotoassimilados na taxa de crescimento e peso final dos grãos de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 12, p. 1747-1754, 1990a.

\_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. Aumento de fotoassimilados sobre teores de carboidratos e nitrogênio em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 12, p. 1755-1761, dez. 1990b.

MAGGI, F. **Irrigação na produção de grãos e silagem de milho e sorgo em sucessão ao arroz de sequeiro**. Dissertação. 2003. 51 f (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 2003.

MANFRON, P. A. et al. Efeito do método de preparo do solo na distribuição radicular do milho (*Zea mays* L.) em terra roxa estruturada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 353-366, 1991.

MANFRON, P. A. et al. Modelo do índice de área foliar da cultura de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 2, p. 333-342, 2003.

MANTOVANI, E. C. et al. **Irrigação: princípios e métodos**. Viçosa: Ed.UFV, 2006.

MARIOT, E. J. Ecofisiologia do feijoeiro. In: \_\_\_\_\_. **O feijão no Paraná**. Londrina: IAPAR, 1989. p. 25-41. (Circular, 63).

MATZENAUER, R.; WESTPHALEN, S. L.; BERGAMASCHI, H. Relações entre a evapotranspiração do milho e as fórmulas de Penman e Thornthwaite. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 18, p. 1207-1214, 1983.

MATZENAUER, R. **Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul**. 1994. 172 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

\_\_\_\_\_. et al. Modelos agrometeorológicos para a estimativa do rendimento do milho, em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 225-241, 1995.

\_\_\_\_\_.; MALUF, J.R.T.; 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.

\_\_\_\_\_ et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja, no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Fepagro, 2002. 105 p. (BOLETIM Fepagro, 10).

MASSIGNAM, A. M.; VIEIRA, H. J.; HEMP, S. Ecofisiologia do feijoeiro. I. Determinação do período mais crítico de deficiência hídrica do solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 35-39, 1998.

MEDEIROS, G. A. **Influência do desenvolvimento do dossel vegetativo sobre o consumo de água e coeficiente de cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1996. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

MEDEIROS, G. A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI. Eficiência do uso da água do feijoeiro irrigado. Influência da densidade do plantio. **Revista Ecosystema**, v. 28, n. 1, 2, p. 83-90, 2003.

MEIRELES, E. J. L., PEREIRA, A. R. **Utilização do modelo CROPGRO-DRY BEAN para a simulação do crescimento e desenvolvimento do feijoeiro**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Documentos), 2001, 38 p.

MIGLIORANZA, E. **Modelo matemático-fisiológico para simular o crescimento e a produtividade da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 1992, 184 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1992.

MODA-CIRINO, V.; FONSEGA JÚNIOR, N. S. Seleção de genótipos de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) tolerantes a alta temperatura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 2001, Goiânia, GO. **Anais...** Goiânia: EMBRAPA, 2001. CD-ROM.

MOTA, F. S Weather – Technology models for corn and soybeans in the South of Brasil. **Agricultural Meteorology**, n. 28, p. 49-64, 1983.

MUCHOW, R. C. Effect of high temperature on grain growth in field-grown maize. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 23, p. 145-158, 1990.

MÜLLER, A. G. Estimativa do índice de área foliar do milho a partir da soma de graus-dia, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 1, p. 65-71, 2005.

MUNDSTOCK, C. M.; SILVA, P. R. F. da. **Manejo da cultura do milho**. Porto Alegre: UFRGS, 1989. 76 p.

MUNDSTOCK, C. M.; SILVA, P. R. F. da. **Manejo da cultura do milho para altos rendimentos de grãos**. Porto Alegre: Departamento de Plantas de Lavoura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Evangraf, 2005. 51 p.

NAYLOR, T. H.; BALINTFY, J. L.; BURDICK, D. S.; CHU, K. **Computer simulation techniques**. New York: John Wiley & Sons, 1971.

NAYLOR, T. H. et al. **Técnicas de Simulação em computadores**. São Paulo: Vozes, 1977. 402 p.

NORMAN, J. M.; CAMPBELL, G. S. Canopy structure. In: PEARCY, R.W.; EHLERINGER, J.R.; MOONEY, H.A.; RUNDEL, P.W. **Plant physiological ecology - field methods and instrumentation**. London: Chapman and Hall, 1989. p. 301-325.

OLIVEIRA, E. C. **Desempenho do modelo cropgro-dry bean em estimar a data de semeadura e a produtividade do feijoeiro**. 2007. 186 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

OLIVEIRA, J. S. et al. Potencial de utilização de híbridos comerciais de milho para silagem na Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 2, n. 1, p. 62-71, 2003.

OLIVEIRA, O. J. et al. Modelo Co-senoidal referente a curva de crescimento do sistema radicular da cultura do milho (*Zea mays* L.) sob irrigação em condições de campo. **Ciência Agrotécnica**. Lavras, v. 17, n. Especial, p. 197–204, 2000.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ceres, 1981.

ORTOLANI, A. A.; CAMARGO, M. B. P. Influência dos fatores climáticos na produção. In: Castro, P.R.C.; Ferreira, S.O.; Yamada, T. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potássio e do Fosfato, 1987. p. 71-81.

OTEGUI M. E.; BONHOMME R. Grain yield components in maize: I. Ear growth and kernel set. **Field Crops Res**, v. 56, p. 247-256, 1998.

PANDEY, R. K.; MARANVILLE J. W.; CHETIMA, M. M., Deficit irrigation and nitrogen effects on mayze in a Sahelian environment. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.46, n.1, p. 15-27, 2000.

PARIZI, A. R., **Efeito de diferentes estratégias de irrigação sob as culturas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e milho (*Zea mays* L.) na região de Santiago, RS**. 2007. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PAZ, V .P. S; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C.. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 465-473, 2000.

PEITER, M. X. ; CHAUDHRY, F. H. . Previsão da Produção de Milho Submetido A Diferentes Níveis de Manejo de Irrigação Via Modelo de Simulação. **Revista IRRIGA**, Botucatu, SP, v. 3, n. 2, p. 76-95, 1998.

\_\_\_\_\_. **Estudo do manejo de irrigação via modelo de simulação**. 1998. 183 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1998.

PEREIRA, A. R., MACHADO, E. C., **Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1987. 33 p.

\_\_\_\_\_.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C., Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: **Agropecuária** , 2002. 478 p.

PERROCHET, P. Water uptake by plant roots – A simulation model: conceptual model. **Journal of hydrology**. Amesterdã: 1987, p. 55-61.

PIMENTA, H. S.; FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Modelo matemático para estimular o acúmulo de matéria seca e prever as épocas de florescimento e do ponto de maturidade fisiológica da cultura do feijão. **Scientia Agrícola**, v. 56, n. 4, p. 915-920, 1999.

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

PLA, G. P.; LOPES, N. F. Estimativa de crescimento e produtividade do feijoeiro pela utilização de modelo matemático-fisiológico, para algumas regiões de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 8, p. 1281-1289, 1998.

PORTES, T. A. Ecofisiologia. In: ARAUJO, R.S.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, M. J. O., **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Potafos, 1996. p 101-137.

\_\_\_\_\_.; SILVEIRA, P. M. Efeito do sombreamento artificial sobre características morfológicas e produção de grãos em feijão. In: RENAFE, 1., 1982, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CNPF, 1982. p. 151-153.

PORTO, A.L.P. **Efeitos do déficit hídrico e do nitrogênio em cobertura em folhas de sorgo granífero (*Sorghum bicolor*, L)**. 1993. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, SP, 1993.

PRETT, S. Comparison of seasonal thermal indices for measurement of corn maturity in a prairie environment. **Canadian Journal of Plant Science**, v.72, p. 1157-1162, 1992.

RAMOS JUNIOR, E. U.; LEMOS, L. B.; SILVA, T. R. B. Componentes da produção, produtividade de grãos e características tecnológicas de cultivares de feijão. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 1, p. 75-82, 2005.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987.

\_\_\_\_\_. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990.

REZENDE, R. et al. Uniformidade de aplicação de água, variáveis de produção e índice de área foliar da cultivar de feijão lapar 57. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 24, n. 5, p. 1561-1568, 2002.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous médiums. **Physics**, 1931, p. 318-33.

ROBAINA, A. D. **Estudo experimental e de simulação numérica da aplicação da água na produção das culturas**. 1992. 144 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1992.

\_\_\_\_\_. **Programa computacional MFLUXO**. Comunicação pessoal, em 28 jun. 2009, 2009.

ROCHA, O. C., GUERRA, A. F., AZEVEDO, H. M. de, Ajuste do modelo Christiansen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 263-268, 2003.

RUBIN, R.B. **Prod utividade do feijoeiro irrigado influenciado pelo armazenamento de água no solo e métodos de preparo do solo**. 2003 82 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SAAD, A. M. **Uso do tensiômetro no controle da irrigação por pivô central**. Piracicaba, ESALQ/USP, 1991. 141 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. São Paulo, Piracicaba, 1991.

SANGOI, L. et al. Níveis de manejo na cultura do milho em dois ambientes contrastantes: análise técnico econômica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1021-1029, 2003.

\_\_\_\_\_, SCHMITT, A.; ZANIN, C. G. Área foliar e rendimento de grãos de híbridos de milho em diferentes populações de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 6, n. 3, p. 263-271, 2007.

SANTI, A. L. et al. Adubação nitrogenada na cultura do feijoeiro em plantio convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1079-1085, 2006.

SANTOS, C. A. F.; ARAUJO, F. P. Produtividade e morfologia de genótipos de caupi em diferentes densidades populacionais nos sistemas irrigado e de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1977-1984, 2000.

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

SCHOPER, J. B.; JOHNSON, R. R.; LAMBERT, R. J. Maize yield response to increased assimilate supply. **Crop Science**, Madison, v. 22, p. 1184-1189, 1982.

SHAW, R. H. Climate requirement. In: SPRAGUE, G.F. **Corn and corn improvement**. Madison: American Society of Agronomy, 1977 p. 599-617.

SILVA, J. C., **Parâmetros de irrigação para o feijoeiro em diferentes solos e épocas de semeadura na região central do Rio Grande do Sul**. 2008. 113 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SILVA, S. C. **Relação entre o tamanho das sementes de milho (Zea Mays L.) com a germinação, o vigor e os componentes da produção de grãos**. 2000. 69 f. Dissertação (Mestrado em Produção e Tecnologia de Sementes) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2000.

SILVEIRA, P .M.; STONE, L.F. **Irrigação do feijoeiro**. Goiânia: Embrapa, CNPAF, 201. 230 p.

SNYDER, F. W.; CARLSON, G. E. Selecting for partitioning of photosynthetic products in crops. **Advances in Agronomy**. v. 37, p. 47-72, 1984.

SOLER, C. M. T.; FOLEGATTI, M. V.; FARIA, R. T. Uso do modelo Ceres-mayze para identificação de características genéticas desejáveis e de práticas adequadas de manejo em milho "safrinha". *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 9, n. 2, p. 339-346, 2001. SÃO IGUAIS? VER DEPOIS

SOLER, C. T.; FOLEGATTI, M. V.; FARIA, R. T. de. Uso do modelo CERES-Maize para identificação de características genéticas desejáveis e de práticas adequadas de manejo em milho safrinha. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 339-346, 2001.

SOUZA, L. S. B. et al. Ajuste do modelo de crescimento exponencial para o feijão caupi no semi-árido brasileiro. In: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. **Anais...**Aracaju, SE, 2007.

STEWART, COBER, E. R.; BERNARD, R. L. Modeling Genetic Effects on the Photothermal Response of Soybean Phenological Development. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 65–70, 2003.

STEWART, D. W. et al. Canopy structure, light interception and photosynthesis in maize. **Agronomy Journal**, v. 95, p. 1465-1474, 2003.

STICKLER, F. C.; WERDEN, S.; PAULI, A. W. Leaf area determination in grain sorghum. **Agronomy Journal**, v. 53, p. 197-188, 1961.

STOCKLE, C.; CAMPBELL, G. A. simulation model for predicting effect of water stress on yield: An example using corn. **Advances in Irrigation**, New York, v.3, p.283-311, 1985.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Tradução Eliane Romanato Santarém et al. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TEIXEIRA, J. L., PEREIRA, L. S., ISAREG, an irrigation scheduling model. *ICID, Bulletin*, 41: 29-48, 1992.

TELES NETO, M. S. **Feijão**: caracterização fitotécnica, extração e exportação de macronutrientes. 2001. 84 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

TOLLERNAR, M., HUNTER, R.B., A photoperiod and temperature sensitive period for leaf number in maize. **Crop Science**, Madison v. 23, p. 457-460, 1983.

\_\_\_\_\_.; DAYNARD, T. B.; HUNTER, R. B., Effect off temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. **Crop Science**, Madison, v. 19, n. 3, p. 365-366, 1979.

\_\_\_\_\_.; DAYNARD, T.B. Effect off defoliation on kernel development in maize. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 58, p. 207-212, 1978.

THORNLEY, J. H. M. **Grassland dynamics**: an ecosystem simulation model. Wallingford: CAB International, 1998. 241 p.

\_\_\_\_\_.; JOHNSON, I. R., Plant and crop modeling. Oxford: Oxford University Press, 1990. 669p.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, n. 38, p. 55-94, 1948.

THORNTON, P. K., Estimating millet production for famine early warning: an application of crop simulation modeling using satellite and ground-based data in Burkina Faso. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 83, p. 95-112, 1997.

THUNG, M. et al., Como atingir novos mercados internos e externos. **Documentos**, IAC, Campinas, 85, 2008.

VALADÃO, L. T.; KLAR, A. E. Evapotranspiração do Feijoeiro Comum (*Phaseolus vulgaris* L.), em dois níveis do lençol freático. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 11., Campinas, 1996. **Anais...**Campinas : Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1996. v. 1, p. 163-176.

VAN KEULEN, H.; PENNING DE VRIES, F. W. T.; DRESS, E. M. A summary model for crop growth. In: PENNING DE VRIES, F. W. T.; VAN LAAR, H. H. (Ed). Simulation of plant growth and crop production. Wageningen: Pudoc, 1982. p. 87-97.

VILLARINO, A. A., Densidade e espaçamento como fatores de produtividade na cultura do milho. **Agroline**, 2005. Disponível em: <http://www.agronline.com.br/artigos/artigo>. Acesso em 24 ago. 2009.

WALLACE, D. H.; YAN, W. K. **Whole system plant physiology-breeding for plant maturity, adaptation, and yield**. Wallingford, Oxon, UK: CAB International, 1998. 462 p.

WARRINGTON, I. J.; KANEMASU, E. T. Corn growth response to temperature nad photoperiod I. seedling emergence, tassel initiation and anthesis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 749-754, 1983a.

WHITE, J. W. et al. Evaluation of the dry bean model BEANGRO V1.01 for crop production research in a tropical environment. **Experimental Agriculture**, London, v. 31, p. 241-254, 1995.

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, p. 5-8, 1996.

WILKERSON, G. G. et al. Modeling soybean growth for crop management. **Trans ASAE**, Mishoe, v. 26, p. 63-73, 1983.

WOLSCHICK, D., et al. Implementação e teste de um modelo mecanístico de simulação do crescimento e desenvolvimento de plantas de milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 271–278, 2007.

XAVIER, F. E. **Análise de crescimento de quatro cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em duas épocas de plantio em Viçosa, Minas Gerais**. 1976. 26 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1976.

YOKOYAMA, L. P.; BANNO, K.; J. KLUTHCOUSKI. Aspectos socioeconômicos da cultura, p.1-20. In: ARAÚJO R. S. et al. (Eds.). **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Potafos, 1996. 786p.

YOKOYAMA, L. P; STONE, L. F. Aspectos conjunturais da cultura. In: \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. (eds.). **Cultura do feijoeiro no Brasil: características da produção**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2000. 75 p.

ZHUANG, Q., V. E; ROMANOVSKY, A. D. MCGUIRE, Incorporation of a permafrost model into a large-scale ecosystem model: Evaluation of temporal and spatial scaling issues in simulating soil thermal dynamics, **Journal of Geophysical Research**, v. 24, p. 649-670, 2001.

## **APÊNDICES**

APÊNDICE I: Valores médios do índice de área foliar ( $m^2.m^{-2}$ ) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do milho.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
12	175,60	0,05	0,06	0,06	0,07	0,06	0,07	0,06	0,01	11,93
19	271,50	0,29	0,30	0,31	0,37	0,31	0,38	0,32	0,04	11,72
26	347,00	0,50	0,54	0,59	0,60	0,57	0,72	0,59	0,07	12,45
33	439,60	1,55	1,68	1,71	2,00	1,81	2,61	1,89	0,38	20,18
44	578,30	2,47	2,87	3,17	3,87	3,18	4,51	3,34	0,73	21,96
54	717,80	3,57	3,77	3,92	4,27	4,07	5,48	4,18	0,68	16,29
63	845,90	4,67	4,87	5,01	5,68	5,19	6,45	5,31	0,65	12,32
70	946,30	5,67	5,76	5,86	6,64	6,07	6,93	6,16	0,51	8,35
78	1040,60	5,67	5,77	5,87	6,01	5,90	6,53	5,96	0,30	5,07
86	1147,40	4,69	4,79	4,90	5,01	4,94	5,66	5,00	0,34	6,85
93	1232,80	4,22	4,42	4,72	5,00	4,64	5,32	4,72	0,40	8,46
103	1345,60	3,80	3,90	4,01	4,72	4,18	4,99	4,27	0,48	11,23
110	1438,50	3,34	3,44	3,54	3,65	3,50	3,77	3,54	0,15	4,31
117	1519,50	2,52	2,64	3,00	3,40	2,94	3,62	3,02	0,42	14,05
127	1627,30	1,66	1,76	1,86	1,96	1,80	2,01	1,84	0,13	7,07
137	1711,70	0,60	0,60	0,60	0,61	0,71	1,24	0,73	0,25	34,90

APÊNDICE II – Valores médios do índice de área foliar ( $m^2.m^{-2}$ ) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do feijão.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
12	175,60	0,04	0,05	0,05	0,05	0,10	0,05	0,06	0,02	38,84
19	271,50	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,15	0,13	0,02	12,62
26	347,00	0,69	0,80	0,82	0,94	0,85	1,37	0,91	0,24	26,31
33	439,60	0,98	1,00	1,00	1,01	1,98	2,13	1,35	0,55	40,60
44	578,30	2,98	3,18	3,28	3,48	3,78	5,01	3,62	0,73	20,28
54	717,80	3,84	4,84	4,98	5,01	5,19	6,00	4,98	0,69	13,87
63	845,90	4,85	5,08	5,01	5,86	5,24	6,00	5,34	0,47	8,87
70	946,30	5,44	6,34	6,46	6,35	6,45	6,72	6,29	0,44	6,97
78	1040,60	5,00	5,28	5,79	5,88	5,99	7,19	5,86	0,76	12,93
86	1147,40	4,66	4,80	5,05	5,10	5,53	6,85	5,33	0,80	15,08
93	1232,80	4,31	4,31	4,31	4,33	5,06	6,52	4,81	0,89	18,51
103	1345,60	3,73	3,56	3,74	3,81	3,94	4,53	3,89	0,34	8,74
110	1438,50	1,74	1,74	1,74	1,74	1,77	2,54	1,88	0,33	17,41
117	1519,50	0,01	0,01	0,11	0,01	0,01	0,05	0,03	0,04	119,15

APÊNDICE III – Valores médios de matéria seca total (kg,ha<sup>-1</sup>) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do milho.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
12	175,60	152,00	273,60	319,20	320,80	486,40	547,20	349,87	144,45	41,29
19	271,50	304,00	502,40	532,00	608,00	659,20	684,00	548,27	138,80	25,32
26	347,00	684,00	820,80	1144,00	1460,00	1418,40	1516,00	1173,87	353,34	30,10
33	439,60	1216,00	1277,60	1328,80	1511,20	2189,60	1916,00	1573,20	393,96	25,04
44	578,30	2749,90	3854,40	4169,00	4261,40	3962,00	4185,40	3863,68	566,60	14,66
54	717,80	4326,00	4936,60	5172,60	5336,20	5543,10	5456,00	5128,42	448,34	8,74
63	845,90	5608,10	5928,10	6088,10	6248,20	7213,70	6876,30	6327,08	604,51	9,55
70	946,30	6733,00	6779,90	6882,00	7094,40	8061,10	7492,10	7173,75	515,66	7,19
78	1040,60	9746,30	9902,50	10255,00	10911,20	11181,70	11569,70	10594,40	736,16	6,95
86	1147,40	12759,60	13025,00	13627,90	14727,90	14302,40	15647,30	14015,02	1091,90	7,79
93	1232,80	14790,20	14795,90	14834,30	18287,80	21178,00	21408,20	17549,07	3199,03	18,23
103	1345,60	15893,60	17357,70	19079,40	20353,80	22018,80	23854,80	19759,68	2946,37	14,91
110	1438,50	16240,00	18526,90	20480,90	23990,70	23391,40	24239,20	21144,85	3288,55	15,55
117	1519,50	16811,20	20444,10	23697,30	25237,70	24603,60	25499,60	22715,58	3425,25	15,08
128	1627,30	17013,60	21427,30	25565,90	28119,00	27997,00	29910,50	25005,55	4892,65	19,57
137	1711,70	17144,00	21776,80	26204,80	29348,80	29949,60	31240,00	25944,00	5487,42	21,15

APÊNDICE IV – Valores médios de matéria seca (kg,ha<sup>-1</sup>) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do feijão.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	Desvio Padrão	CV %
12	175,60	328,00	328,00	328,00	328,00	441,00	328,00	346,83	46,13	13,30
19	271,50	535,00	564,70	625,30	705,00	731,50	875,00	672,75	125,14	18,60
26	347,00	1555,00	1552,90	1589,70	1698,20	2091,50	1555,00	1673,72	212,13	12,67
33	439,60	1579,90	1579,90	2022,90	1749,90	1984,90	1409,90	1721,23	244,22	14,19
44	578,30	2257,80	2427,80	2597,80	2716,60	2861,70	2767,80	2604,92	226,65	8,70
54	717,80	3261,30	3495,50	3736,10	3849,40	4624,40	3941,30	3818,00	466,28	12,21
63	845,90	4367,30	4707,30	4894,20	4946,80	5557,50	5421,40	4982,42	444,19	8,92
70	946,30	4953,40	6143,40	6143,80	6167,00	6787,20	6401,80	6099,43	614,22	10,07
78	1040,60	5166,60	6527,00	6870,90	6913,30	8525,10	7267,10	6878,33	1087,91	15,82
86	1147,40	5379,90	6740,70	7598,10	7659,70	8733,10	8132,50	7374,00	1177,44	15,97
93	1232,80	5594,80	6954,80	8484,80	8487,00	8882,80	8882,30	7881,08	1328,35	16,85
103	1345,60	5899,20	7089,20	8279,20	8279,20	9286,20	9979,20	8135,37	1473,80	18,12
110	1438,50	6539,10	7682,30	8632,50	9502,60	9808,80	10338,70	8750,67	1432,01	16,36
117	1519,50	328,00	328,00	328,00	328,00	441,00	328,00	346,83	46,13	13,30

APÊNDICE V – Valores médios de profundidade do sistema radicular (cm) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do milho.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
12	175,60	8,43	9,94	11,14	11,87	11,85	10,84	8,43	9,94	8,13
26	347,00	21,58	25,29	28,90	31,19	31,79	30,06	21,58	25,29	7,12
54	717,80	32,92	37,48	42,21	44,66	44,19	39,73	32,92	37,48	8,97
78	1040,60	41,63	48,95	54,59	56,49	57,27	51,44	41,63	48,95	8,84
86	1147,40	43,52	50,88	56,59	59,62	58,60	52,05	43,52	50,88	8,89
137	1711,70	44,00	51,90	57,30	58,00	58,90	52,50	44,00	51,90	9,59

APÊNDICE VI – Valores médios de profundidade do sistema radicular (cm) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do feijão.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
12	175,60	3,68	4,31	4,91	5,40	5,74	5,85	4,98	0,85	17,07
26	347,00	15,57	18,13	20,47	22,29	23,33	23,30	20,52	3,13	15,25
54	717,80	19,38	22,61	26,10	28,90	29,80	28,38	25,86	4,09	15,82
78	1040,60	20,32	23,59	28,47	30,56	32,53	30,96	27,74	4,78	17,23
86	1147,40	25,00	24,09	29,53	32,73	34,86	32,53	29,79	4,41	14,80
117	1719,50	25,30	25,10	30,03	33,23	35,36	33,03	30,34	4,33	14,27

APÊNDICE VII: Valores médios simulados do índice de área foliar ( $m^2, m^{-2}$ ) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do milho.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
12	276,80	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,04	0,01	0,01	119,84
19	372,70	0,03	0,05	0,08	0,11	0,17	0,32	0,13	0,11	86,13
26	448,20	0,14	0,22	0,32	0,39	0,57	0,91	0,42	0,28	65,82
33	540,80	0,58	0,76	0,98	1,12	1,48	2,09	1,17	0,55	47,07
44	679,50	1,99	2,30	2,64	2,85	3,42	4,29	2,91	0,83	28,60
54	819,00	3,78	4,06	4,36	4,55	5,17	6,03	4,66	0,82	17,65
63	947,10	4,95	5,12	5,32	5,47	6,02	6,74	5,60	0,67	11,92
70	1047,50	5,30	5,40	5,53	5,66	6,13	6,74	5,79	0,54	9,40
78	1141,80	5,21	5,27	5,36	5,49	5,89	6,39	5,60	0,46	8,16
86	1248,60	4,75	4,80	4,87	5,00	5,35	5,76	5,09	0,39	7,73
93	1334,00	4,22	4,28	4,36	4,50	4,80	5,16	4,55	0,36	7,98
103	1446,80	3,45	3,53	3,62	3,77	4,04	4,34	3,79	0,34	8,97
110	1539,70	2,83	2,93	3,03	3,18	3,42	3,70	3,18	0,33	10,25
117	1620,70	2,34	2,45	2,56	2,71	2,93	3,18	2,69	0,31	11,65
127	276,80	1,78	1,89	2,01	2,15	2,35	2,57	2,12	0,29	13,84
137	372,70	1,42	1,53	1,64	1,78	1,95	2,16	1,75	0,27	15,75

APÊNDICE VIII: Valores médios simulados do índice de área foliar ( $m^2, m^{-2}$ ) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do feijão.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
12	175,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	139,74
19	271,50	0,03	0,04	0,04	0,04	0,21	0,10	0,08	0,07	91,00
26	347,00	0,18	0,22	0,21	0,23	0,71	0,43	0,33	0,21	62,81
33	439,60	0,73	0,87	0,86	0,92	1,91	1,35	1,11	0,45	40,34
44	578,30	2,42	2,84	2,86	3,05	4,40	3,55	3,19	0,70	21,93
54	717,80	4,33	4,96	5,05	5,35	6,47	5,53	5,28	0,71	13,48
63	845,90	5,31	5,94	6,09	6,38	7,24	6,32	6,21	0,63	10,19
70	946,30	5,38	5,89	6,08	6,30	7,11	6,20	6,16	0,57	9,22
78	1040,60	5,02	5,37	5,56	5,72	6,58	5,69	5,66	0,52	9,23
86	1147,40	4,30	4,49	4,67	4,75	5,72	4,85	4,80	0,49	10,24
93	1232,80	3,64	3,73	3,89	3,92	4,95	4,12	4,04	0,48	11,78
103	1345,60	2,80	2,78	2,91	2,90	3,97	3,19	3,09	0,45	14,67
110	1438,50	2,18	2,12	2,22	2,20	3,23	2,53	2,41	0,43	17,64
117	1519,50	1,72	1,64	1,73	1,69	2,67	2,03	1,91	0,39	20,61

APÊNDICE IX: Valores médios simulados de matéria seca ( $kg, ha^{-1}$ ) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do milho.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
12	276,80	462,7	582,2	532,4	474,5	846,1	449,0	557,8	149,8	26,86
19	372,70	768,1	845,9	854,2	777,5	1130,7	749,1	854,2	142,0	16,62
26	448,20	1088,7	1127,0	1182,8	1095,5	1435,8	1071,5	1166,9	137,5	11,78
33	540,80	1604,7	1588,6	1700,8	1611,2	1940,4	1605,8	1675,2	135,9	8,11
44	679,50	2695,9	2604,1	2783,6	2731,3	3065,8	2801,2	2780,3	156,6	5,63
54	819,00	4250,3	4150,4	4358,0	4431,8	4819,7	4670,4	4446,8	254,4	5,72
63	947,10	6077,2	6136,2	6335,2	6647,1	7143,9	7154,3	6582,3	482,1	7,32
70	1047,50	7701,3	8076,2	8276,1	8876,4	9495,0	9671,4	8682,8	796,4	9,17
78	1141,80	9281,5	10145,2	10401,1	11352,5	12093,8	12456,0	10955,0	1222,4	11,16
86	1248,60	11006,7	12640,6	13097,3	14512,7	15359,5	15955,4	13762,0	1855,7	13,48
93	1334,00	12255,7	14624,3	15393,2	17193,9	18063,2	18850,3	16063,4	2452,1	15,27
103	1446,80	13654,0	17048,4	18461,5	20726,1	21503,6	22527,8	18986,9	3297,6	17,37
110	1539,70	14572,1	18771,5	20886,7	23449,7	24044,8	25237,2	21160,3	3984,2	18,83
117	1620,70	15209,1	20035,0	22843,1	25586,8	25960,6	27274,6	22818,2	4539,7	19,90
127	276,80	15852,6	21372,6	25138,8	28008,5	28038,4	29477,5	24648,1	5185,4	21,04
137	372,70	16223,2	22172,3	26661,4	29552,9	29305,4	30816,6	25788,6	5606,4	21,74

APÊNDICE X: Valores médios simulados de matéria seca (kg,ha<sup>-1</sup>) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do feijão.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
12	276,80	286,76	209,06	335,52	366,79	313,65	360,73	286,76	209,06	72,90
19	372,70	481,65	354,21	549,91	592,10	535,94	583,75	481,65	354,21	73,54
26	448,20	688,45	522,82	772,74	821,94	778,84	812,42	688,45	522,82	75,94
33	540,80	1020,13	820,58	1126,78	1180,90	1182,89	1171,95	1020,13	820,58	80,44
44	679,50	1697,44	1519,39	1858,62	1908,30	2062,34	1909,89	1697,44	1519,39	89,51
54	819,00	2574,72	2578,72	2865,58	2894,55	3312,92	2931,37	2574,72	2578,72	100,16
63	947,10	3459,74	3786,14	4001,30	4005,51	4710,79	4112,33	3459,74	3786,14	109,43
70	1047,50	4121,91	4748,45	4971,70	4965,23	5853,01	5159,68	4121,91	4748,45	115,20
78	1141,80	4667,11	5553,16	5883,36	5883,90	6858,90	6186,94	4667,11	5553,16	118,98
86	1248,60	5166,16	6276,25	6845,13	6879,72	7832,80	7329,04	5166,16	6276,25	121,49
93	1334,00	5472,90	6701,97	7521,17	7602,01	8456,25	8176,81	5472,90	6701,97	122,46
103	1446,80	5768,21	7087,59	8259,47	8419,20	9073,06	9156,49	5768,21	7087,59	122,87
110	1539,70	5936,54	7291,41	8734,34	8965,40	9430,88	9823,91	5936,54	7291,41	122,82
117	1620,70	6041,87	7410,53	9059,65	9351,80	9656,39	10302,40	6041,87	7410,53	122,65

APÊNDICE XI – Valores médios simulados de profundidade do sistema radicular (cm) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do milho.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
12	175,60	8,43	9,94	11,14	11,87	11,85	10,84	10,68	1,31	8,13
26	347,00	21,58	25,29	28,90	31,19	31,79	30,06	28,14	3,95	7,12
54	717,80	32,92	37,48	42,21	44,66	44,19	39,73	40,20	4,48	8,97
78	1040,60	41,63	48,95	54,59	56,49	57,27	51,44	51,73	5,85	8,84
86	1147,40	43,52	50,88	56,59	59,62	58,60	52,05	53,54	6,03	8,89
137	1711,70	44,00	51,90	57,30	58,00	58,90	52,50	53,77	5,61	9,59

APÊNDICE XII – Valores médios simulados de profundidade do sistema radicular (cm) em seis tratamentos durante o ciclo da cultura do feijão.

DAE	GD	T0	T1	T2	T3	T4	T5	Média	DP	CV (%)
12	175,60	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	16,55
26	347,00	8,153	9,250	10,827	10,977	12,523	12,636	10,728	1,775	16,64
54	717,80	11,516	14,652	16,144	17,538	18,196	18,625	16,112	2,681	16,92
78	1040,60	14,000	18,208	19,903	22,238	22,270	22,697	19,886	3,364	15,82
86	1147,40	21,347	23,661	27,979	30,958	32,187	30,765	27,816	4,400	15,08
117	1719,50	23,184	23,909	28,846	31,532	33,679	31,522	28,779	4,339	16,55