

**EFEITO DA QUALIDADE DA IRRIGAÇÃO EM VARIÁVEIS
DE PRODUÇÃO E DE CRESCIMENTO DA CULTURA
DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.)**

ROBERTO REZENDE
Engenheiro Agrícola

Orientador: Prof. Dr. **JOSÉ ANTONIO FRIZZONE**
Co-orientador: Prof. Dr. **ANTÔNIO CARLOS ANDRADE GONÇALVES**

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de
São Paulo, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia, Área de Concentração:
Irrigação e Drenagem.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Novembro - 2000

ERRATA

p.	item	linha	onde se lê	leia-se
3	1	1	...(Chaudhry, 1975, Paiva, 1980; e Chen & Wallender, 1984).	...Chaudhry (1975), Paiva (1980), e Chen & Wallender (1984).
14	2.3	27	...através...	... por meio
20	2.3	29	Ea	Ed
72	5	14	...isto torna a sua relação...	... isto possivelmente torna a sua relação...
72	5	16	... espaçamento de 18 x 18m o que faz deste espaçamento o mais conveniente para uso em campo.	...espaçamento de 18 x 18m.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

Rezende, Roberto

Efeito da qualidade da irrigação em variáveis de produção e de crescimento da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) / Roberto Rezende. - - Piracicaba, 2000.
88 p. : il.

Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2000.
Bibliografia.

1. Crescimento vegetal 2. Feijão 3. Irrigação por aspersão 4. Qualidade I. Título

CDD 635.652

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

À minha esposa ***Dulce Helena.***

Aos meus filhos ***Luiz Fernando e Graziela,*** que ensinam-me que é preciso estar sempre aprendendo.

Aos meus pais ***Antônio Pinto e Vera Teixeira*** (in memoriam)
e a todos da minha família.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida, pela saúde e por ter tido condições e possibilidade de realizar o curso;

A minha esposa Dulce Helena Silva Rezende e a meus filhos Luiz Fernando Silva Rezende e Graziela Silva Rezende que, além do grande estímulo e entusiasmo que me deram, também souberam entender minha ausência;

Ao Prof. orientador Dr. José Antonio Frizzone, pelo exemplo, por motivar este trabalho, pela orientação competente, pela amizade e confiança, e pela importante contribuição na minha formação e crescimento profissional;

Ao Prof. co-orientador Dr. Antônio Carlos Andrade Gonçalves, inicialmente pela sincera e grande amizade, pelo coleguismo incansável e constante, pelos vários ensinamentos e pelo enorme apoio dado na realização deste trabalho;

Aos Professores Dr. Marcos Vinicius Folegatti, Dr. Tarlei Arriel Botrel, Dr. Sérgio Nascimento Duarte, pelo acolhimento, apoio e ensinamentos no decorrer do curso, e pelas contribuições dadas ao trabalho;

Aos Professores Dr. Joel Augusto Muniz, Dr. Manoel Alves de Faria e Dr. Antônio Marciano da Silva, pelos ensinamentos, apoio e suas valiosas contribuições na realização deste trabalho;

Aos amigos e colegas Professores Dr. Altair Bertonha, Dr. Cássio Tormena, Dr. Marcos Nanni, Dr. Paulo Sérgio, Dr. José Viana e Dr. Carlos Alberto de Bastos Andrade, pela amizade, convívio, apoio e incentivo para realização do curso;

Aos Professores e funcionários da ESALQ/USP, colegas, e às demais pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho;

À Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Agronomia, pela liberação para a realização deste curso de pós-graduação;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Engenharia Rural, pela oportunidade de realização deste curso;

À CAPES/PICD, pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	viii
RESUMO.....	x
SUMMARY.....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Aspectos gerais.....	4
2.2 Uniformidade de aplicação de água.....	6
2.3 Eficiência de irrigação.....	14
2.4 Uniformidade abaixo da superfície do solo.....	21
2.5 Cultura do feijoeiro.....	23
2.5.1 Crescimento e desenvolvimento do feijoeiro.....	23
2.5.1.1 Parte aérea.....	24
2.5.1.2 Sistema radicular.....	25
2.5.2 Necessidades hídricas.....	27
2.6 Análise estatística dos dados.....	29
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.1 Caracterização do local.....	32
3.1.1 Clima.....	33
3.1.2 Solo.....	33
3.2 Sistema de irrigação.....	34
3.3 Condições ambientais.....	37

	Página
3.4 Distribuição superficial da água aplicada.....	37
3.5 Distribuição de umidade abaixo da superfície do solo.....	38
3.6 Coeficientes de uniformidade.....	38
3.7 Eficiência de irrigação.....	38
3.8 Cultura.....	39
3.8.1 Variáveis avaliadas.....	40
3.8.1.1 Índice de área foliar.....	40
3.8.1.2 Número de vagens por planta.....	41
3.8.1.3 Número de grãos por vagem.....	41
3.8.1.4 Massa de cem grãos.....	41
3.8.1.5 Rendimento de grãos.....	42
3.9 Análises dos dados.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1 Condições climáticas.....	44
4.2 Irrigações.....	44
4.2.1 Estatística das irrigações.....	45
4.2.2 Eficiência das irrigações.....	49
4.3 Umidade do solo antes e após as irrigações.....	51
4.4 Coeficientes de uniformidade.....	53
4.5 Variáveis de produção.....	56
4.6 Índice de área foliar.....	59
4.7 Análise dos dados no espaço.....	60
4.7.1 Lâminas de irrigação.....	61
4.7.2 Umidade do solo.....	63
4.7.3 Rendimentos de grãos.....	66
4.7.4 Distribuição espacial das variáveis analisadas.....	69
5 CONCLUSÕES.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

LISTA DE TABELAS

	Página
01 Análise granulométrica e densidade do solo.....	33
02 Características do aspersor, bocais, pressão de serviço (P.S.), vazão (Q), diâmetro molhado (D.M.), espaçamento (E) e intensidade de aplicação (Ia)..	34
03 Estatísticas descritivas para as lâminas coletadas (mm) no cenário 1, média (\bar{X}), mediana (Md), desvio padrão (s), coeficiente de variação (Cv) e d do teste de Kolmogorov-Smirnov (d).....	46
04 Estatísticas descritivas para as lâminas coletadas (mm) no cenário 2, média (\bar{X}), mediana (Md), desvio padrão (s), coeficiente de variação (Cv) e d do teste de Kolmogorov-Smirnov (d).....	46
05 Estatísticas descritivas para as lâminas coletadas (mm) no cenário 3, média (\bar{X}), mediana (Md), desvio padrão (s), coeficiente de variação (Cv) e d do teste de Kolmogorov-Smirnov (d).....	48
06 Estatísticas descritivas para as lâminas coletadas (mm) no cenário 4, média (\bar{X}), mediana (Md), desvio padrão (s), coeficiente de variação (Cv) e d do teste de Kolmogorov-Smirnov (d).....	48

	Página
07 Lâmina média (\bar{Y}) e Lâmina requerida (Y_r), Área deficientemente irrigada (AD), Volume de déficit (VD), Eficiência de distribuição (Ed), Eficiência de armazenamento (Es) e Perda por percolação (Pp).....	49
08 Estatísticas descritivas para umidade média do solo (%), base massa, antes e após as irrigações, média (\bar{X}), mediana (Md), desvio padrão (s), coeficiente de variação (Cv), e d do teste de Kolmogorov-Smirnov (d).....	51
09 Valores médios dos coeficientes de uniformidade determinados para lâmina (CUC_L , CUD_L) e para umidade do solo antes (CUC_{UA} , CUD_{UA}) e depois da irrigação (CUC_{UD} , CUD_{UD}), média (\bar{X}), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (Cv) para os quatro cenários.....	53
10 Estatísticas descritivas para as variáveis de produção: rendimento de grãos (RG), número de vagens por planta (NV), número de grãos por vagem (NG) e massa de cem grãos (MC).....	57
11 Valores médios de índice de área foliar para cinco épocas, caracterizadas pelo número de dias após a emergência (DAE).....	59

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Relações entre lâminas aplicada e requerida e demais elementos geométricos.....	16
2 Curva de retenção de água no solo.....	34
3 Sistema de irrigação no campo, mostrando os quatro cenários (C_1 , C_2 , C_3 e C_4).....	35
4 Lâminas de água aplicadas via irrigação e decorrentes de chuva, durante o ciclo da cultura. As quatro irrigações em destaque, marcadas por uma seta, foram seguidas de chuva.....	45
5 Valores dos coeficientes para lâminas e umidades.....	56
6 Valores mínimo. máximo. mediana e coeficiente de variação para dados de lâmina coletada, nas colunas e nas linhas para os cenários 1,2,3 e 4.....	62
7 Valores mínimo, máximo, mediana e de coeficiente de variação para dados de umidade do solo após as irrigações, nas colunas e nas linhas, para os cenários 1,2,3 e 4.....	64

	Página
8 Valores mínimo, máximo, mediana e de coeficiente de variação para dados de rendimento de grãos, nas colunas e nas linhas, para os cenários 1,2,3, e 4.....	67
9 Distribuição espacial da lâmina de irrigação no cenário 4.....	70
10 Distribuição espacial da umidade do solo após as irrigações, com base em massa, cenário 4.....	71
11 Distribuição espacial do rendimento de grãos no cenário 4.....	71

**EFEITO DA QUALIDADE DA IRRIGAÇÃO EM VARIÁVEIS
DE PRODUÇÃO E DE CRESCIMENTO DA CULTURA
DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.)**

Autor: **ROBERTO REZENDE**

Orientador: Prof. Dr. **JOSÉ ANTONIO FRIZZONE**

RESUMO

A uniformidade de aplicação de água, descrita por coeficientes estatísticos, tem sido usada para caracterizar a qualidade da irrigação por aspersão. Os diversos sistemas de irrigação têm sido avaliados pela uniformidade de aplicação de água na superfície do solo. Uma vez que a planta retira água do volume de solo no qual o seu sistema radicular se encontra, pode-se supor que a uniformidade de distribuição da água no perfil do solo seja mais importante que na sua superfície. A uniformidade da irrigação pode ser alterada pela redistribuição da água aplicada ao solo e isto pode afetar a produção de uma cultura irrigada. Esse trabalho teve como objetivo estudar os efeitos da qualidade da irrigação em variáveis de produção e de crescimento da cultura de feijão, objetivando o aprimoramento dos projetos e manejo dos sistemas de irrigação por aspersão. O trabalho foi conduzido na área experimental do Centro Técnico de Irrigação, no campus da

Universidade Estadual de Maringá. A irrigação por aspersão foi realizada com quatro níveis de uniformidade (quatro cenários), estabelecidos em função dos espaçamentos entre aspersores. Foram obtidos os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de uniformidade de distribuição (CUD), para as lâminas coletadas e para as umidades de solo, nos quatro cenários. As variáveis de produção estudadas foram o número de vagem por planta, o número de grãos por vagem, a massa de cem grãos e o rendimento de grãos. Para a avaliação do crescimento vegetativo, foi usado o índice de área foliar. Os resultados obtidos mostraram que a uniformidade da umidade do solo é maior que a identificada para a lâmina aplicada, o que pode ser devido à redistribuição da água no solo, e também pelo consumo de água pelas plantas. O maior espaçamento entre aspersores (cenário 4), promoveu menor uniformidade acima e abaixo da superfície. No entanto, a uniformidade da umidade do solo foi alta o bastante para aproximar-se do limite que atende aos critérios usualmente adotados na irrigação por aspersão, ao contrário do identificado acima da superfície. Os resultados mostraram também que a máxima uniformidade de aplicação de água não implicou em maiores valores das variáveis de produção. O crescimento vegetativo, expresso pelo índice de área foliar, apresentou relação direta com a uniformidade das irrigações realizadas. A uniformidade da irrigação influenciou mais no crescimento vegetativo que na produção da cultura.

**EFFECT OF SPRINKLER IRRIGATION UNIFORMITY ON BEAN
VEGETATIVE GROWTH AND YIELD.**

Author: **ROBERTO REZENDE**

Adviser: Prof. Dr. **JOSÉ ANTONIO FRIZZONE**

SUMMARY

The irrigation uniformity can be described by statistical coefficients and has been used to characterize the quality of the sprinkler irrigation. Irrigation systems performance has been described by uniformity coefficients obtained from water depth applied above soil surface. Plants remove water from the soil in which its root system is growing. Thus, uniformity of soil water content can be more important than uniformity of applied water in soil surface. The effect of non-uniform irrigation on crop yield can be influenced by soil water redistribution, which makes the soil water content more uniform than the applied water. The objective of this study was to verify the effects of non-uniform sprinkler irrigation on bean yield and on bean vegetative growth. The experiment was conducted in the experimental area of the Technical Center for Irrigation, in the State University of Maringá campus. The water was applied by sprinkler irrigation system,

with four uniformity levels (four treatments), corresponding to four sprinkler spacings. The Christiansen's uniformity coefficient (CUC) and the distribution uniformity coefficient (CUD) for depth of applied water and for the soil water content were obtained for all treatments. The variables: pods number per plant, number of grains per pod, mass of a hundred grains and grain yield were studied. To evaluate vegetative growth, leaf area index (LAI) was used. Results showed that the soil water content was more uniform than applied water. This probably occurs due to the soil water redistribution and differential plant water use. The largest spacing between sprinklers (treatment 4) correspond to the lower uniformity above and below the surface. However, the uniformity of soil water content was great enough to come closer to the limit that usually fulfills the criteria adopted in sprinkler irrigation. The results also showed that the higher uniformity did not imply higher bean yield. The crop vegetative growth and irrigation uniformity shows linear correlation between them. These results show that crop vegetative growth was more affected by irrigation uniformity than crop yield.

1 INTRODUÇÃO

A produtividade média nacional da cultura do feijoeiro é de aproximadamente 500 kg ha⁻¹, enquanto a de outros países como Estados Unidos, Turquia e Japão é 1486, 1471 e 1420 kg ha⁻¹, respectivamente. Entretanto no Brasil, com o uso intenso de tecnologia, tem-se obtido com facilidade na época de plantio de inverno, algo em torno de 3.600 kg ha⁻¹, produtividade esta que pode ser considerada a mais elevada do mundo para a cultura do feijoeiro. Existe, portanto, um grande potencial de produção a ser conquistado, exigindo na agricultura a aplicação de técnicas mais adequadas e eficientes, de forma a melhorar os índices de rendimento da cultura, contornando as adversidades climáticas e fazendo uso mais racional dos fatores de produção.

O feijoeiro é uma cultura sensível ao déficit de água no solo, sendo este fator um dos mais limitantes para obtenção de altas produtividades. Numerosos estudos com a cultura do feijoeiro irrigado têm sido realizados a fim de otimizar a exploração dessa leguminosa.

A produtividade da cultura do feijoeiro é função de vários fatores, dentre eles pode-se citar: sementes selecionadas, variedade, clima e aspectos físico-químicos do solo. Dentre os fatores climáticos, a precipitação pluviométrica é uma das principais causas do insucesso na obtenção da alta produtividade de feijão. Em regiões onde a distribuição de chuvas é irregular, podem ocorrer perdas significativas, principalmente quando a falta, ou excesso de água, ocorre na fase mais sensível a este fator. Nesses casos, a irrigação é uma tecnologia que pode não só reduzir os riscos de insucessos, como também aumentar produtividade de feijão, e até proporcionar um maior número de safras durante o ano.

A necessidade de alimentos é cada vez mais crescente e, no Brasil, se for considerada uma melhoria na renda “per capita”, haverá um aumento na demanda por

alimentos básicos. A irrigação poderá então ser o propulsor do aumento da produção brasileira nas mais diversas regiões do país.

A importância da irrigação deve ser destacada não apenas em regiões áridas ou semi-áridas, mas é também de grande valor onde a precipitação total anual é suficiente, mas mal distribuída ao longo do tempo, prejudicando sobremaneira a produção e a qualidade dos produtos colhidos. Em 1979 a FAO estimou que apenas 13% das áreas agricultáveis no mundo eram irrigadas e, no entanto, o valor de suas produções correspondiam a 34% do valor total. A irrigação foi de enorme importância no passado e ainda desempenha um papel fundamental na produção mundial de alimentos. Hoffman et al (1990) já faziam referência ao fato de que mais da metade desta produção vinha de áreas irrigadas, as quais correspondiam a menos de 20% da área total cultivada no mundo.

Apesar do crescente uso, a irrigação tem apresentado problemas ocasionados por diagnósticos mal elaborados, por projetos dimensionados sem os devidos critérios e, principalmente, por manejo inadequado dos recursos hídricos e edáficos, resultando em baixa produtividade das culturas e reduzido retorno dos investimentos. Para o estabelecimento de condições ótimas de desenvolvimento vegetal, torna-se indispensável adotar medidas de planejamento do uso dos recursos hídricos e de operação dos sistemas, baseadas nas condições locais.

O método de irrigação por aspersão é recente, se considerarmos a história da irrigação. Porém, é o que mais se desenvolveu e mereceu atenção por parte dos estudiosos da área desde o seu surgimento no início deste século. A uniformidade de aplicação da água tem recebido tratamento diferenciado por parte dos técnicos e dos produtores. Os técnicos têm procurado estabelecer valores mínimos de coeficientes a serem obtidos, como uma especificação de projeto (Christiansen 1937, 1941 e Criddle et al., 1956). Por outro lado, sistemas de aspersão têm sido instalados e operados por agricultores que dão pouca importância à uniformidade e também à eficiência do uso da água.

Nesse método de irrigação, a uniformidade de aplicação de água é um parâmetro que influi no custo do sistema e na produção, devendo ser ajustada de forma a

proporcionar o maior retorno líquido para o agricultor, conforme enfatizam (Chaudhry, 1975; Paiva, 1980; e Chen & Wallender, 1984).

A irrigação por aspersão tem sido avaliada pela uniformidade de aplicação da água na superfície do solo. No entanto, há que se considerar que a planta retira água no volume de solo que contém o sistema radicular. Em sendo assim, espera-se que a distribuição da água abaixo da superfície seja mais importante do que aquela na superfície.

O planejamento e a operação dos sistemas de irrigação deve ser definido com base em parâmetros de desempenho que expressem sua qualidade, determinada a partir dos valores de lâmina aplicada, armazenada e perdida por percolação.

Simultaneamente aos esforços concentrados no aprimoramento dos próprios métodos de aplicação de água, notáveis avanços tecnológicos têm sido relatados em quase todos os aspectos agronômicos associados à agricultura irrigada, principalmente em relação ao manejo da irrigação.

A irrigação se caracteriza como uma tecnologia que sempre está apresentando expressivas inovações, capazes de assegurar níveis de desempenho cada vez mais elevados dos sistemas, nas mais diferentes e adversas condições. Esses notáveis avanços tecnológicos têm sido resultados de trabalhos de pesquisa, os quais promovem o desenvolvimento da ciência de irrigação, numa busca permanente do melhor resultado aliado a um menor custo.

A hipótese deste trabalho é que, a resposta de uma cultura à irrigação, em termos de produção e de crescimento vegetativo, está mais relacionada com a uniformidade da umidade do solo que com a uniformidade da lâmina aplicada. Embora exista uma relação de dependência entre estas, existe diferença entre as mesmas, decorrente do efeito da redistribuição de água no solo.

Dessa forma, esse trabalho foi conduzido com o propósito de estudar os efeitos da qualidade da irrigação sobre variáveis de produção e de crescimento da cultura do feijoeiro, objetivando o aprimoramento dos projetos e manejo dos sistemas de irrigação por aspersão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais

Devido à necessidade de conservação do recurso água, à competitividade pela água, ao custo da energia, ao custo de insumos e à estabilização dos preços dos produtos agrícolas, os sistemas de irrigação e os métodos de manejo da água devem proporcionar uma aplicação de água uniforme e eficiente.

A disponibilidade do recurso água é cada dia mais preocupante e com a utilização da técnica da irrigação essa disponibilidade tende a se agravar, tornando-se cada vez mais necessário o uso criterioso dessa técnica, com altos níveis de uniformidade e eficiência no uso da água. Para atender essas exigências as preocupações com a qualidade da irrigação se fazem necessárias tanto no processo de planejamento e operação dos sistemas assim como no manejo das irrigações (Frizzone 1992).

Os equipamentos de irrigação têm ocupado lugar de destaque em função dos avanços tecnológicos que se verificam, tanto no âmbito das indústrias que os fabricam, como no campo do conhecimento agrônomico sobre as relações água-solo-planta. Todavia essa evolução foi acompanhada por crescente complexidade, não só no nível da fabricação, das áreas de engenharia do produto, da engenharia de fabricação e da tecnologia básica (normatização, controle de qualidade, propriedade industrial entre outros), mas, principalmente, quanto à seleção e ao manejo otimizados desses equipamentos pelos usuários. Devido ao avanço tecnológico referido, os processos de tomada de decisão tornam-se mais dependentes de dados e informações, sobre especificações e parâmetros de desempenho, cuja obtenção constitui o objetivo fundamental dos ensaios dos equipamentos (Frizzone 1998).

O mesmo autor afirma que, a inserção da irrigação no processo de produção agrícola é uma decisão tomada com base na probabilidade de atingir-se um maior nível

de eficácia na aplicação dessa técnica. A eficácia é definida como a relação entre o custo e o benefício e cuja maximização depende de fatores que vão desde as condições de mercado para produtos agrícolas, até as características de desempenho dos emissores de água. Há casos de sistemas que, por terem sido empiricamente projetados, apresentam baixa eficácia. Nesses casos, e também naqueles em que a eficácia do sistema nunca foi avaliada, a avaliação de desempenho constitui a única via para o levantamento dos dados necessários à tomada de decisão sobre melhorias a serem introduzidas objetivando a elevação do nível de eficiência da irrigação. O autor define a avaliação de desempenho como a avaliação do sistema de irrigação, ou seja, o conjunto dos ensaios dos elementos utilizados num sistema de irrigação, voltados a determinados atributos funcionais, de resistência ou durabilidade, como: máquinas, equipamentos, dispositivos, utensílios, entre outros.

O manejo racional da irrigação deve ser precedido por um programa de ensaio dos equipamentos em operação. Segundo Merriam & Keller (1978), os ensaios têm aplicações locais práticas, mais imediatas, relacionadas à calibração dos equipamentos de forma a aumentar o grau de aproximação entre os valores de lâmina bruta, que se deseja aplicar, e aqueles realmente aplicados. Também têm como função a identificação de componentes que necessitam ser reparados e/ou substituídos (Bride, 1984).

De acordo com Hanson & Lancaster (1986), uma avaliação de desempenho, a qual descreve as características de funcionamento do equipamento, tais como uniformidade e quantidade de água aplicada, entre outras, pode ajudar a identificar problemas no projeto e/ou no manejo de sistemas de irrigação por aspersão, os quais podem influenciar no custo de energia e no rendimento das culturas.

Avaliações de desempenho de sistemas de irrigação são importantes para assegurar que os mesmos sejam instalados conforme especificados em projetos, devendo incluir ensaios das condições de operação do conjunto motobomba, rede de tubulação e uniformidade de distribuição da água dos emissores (Heermann, 1990). É sempre recomendável fazer avaliações periodicamente nos equipamentos de irrigação. Essa prática torna-se mais enfática quando se faz a quimificação por meio desses mesmos equipamentos (Ramos & Mantovani, 1994).

Conforme Frizzone (1995), destacam-se na avaliação de desempenho de sistemas de irrigação, quatro objetivos:

- determinar a eficiência do sistema na forma como vem sendo operado;
- determinar quão efetivamente o sistema pode ser operado e aperfeiçoado;
- obter informações que auxiliem os engenheiros em projeto de outros sistemas;
- obter informações que permitam a comparação de vários métodos de irrigação, sistemas e formas de operação, como base para tomada de decisões.

2.2 Uniformidade de aplicação de água

A uniformidade de aplicação de água, se encontra atualmente entre os poucos parâmetros de desempenho de irrigação, que muitos especialistas na área consideram importantes para a averiguação do desempenho de irrigação. Sendo basicamente três parâmetros: uniformidade, eficiência e grau de adequação/conformidade.

O termo uniformidade é aplicado aos parâmetros de desempenho associados à variabilidade da lâmina de água ao longo da extensão da superfície do terreno irrigado, sendo comum expressar suas medidas utilizando-se vários coeficientes (Frizzone 1998).

A uniformidade depende, basicamente, dos critérios considerados quando da elaboração do projeto, do manejo e da operação do sistema de irrigação, além dos elementos climáticos (Walker, 1979; Pair, 1968).

A uniformidade tem impacto na eficiência dos sistemas de irrigação, a qual está relacionada com a quantidade de água necessária ao desenvolvimento e ao rendimento de uma determinada cultura. Bernardo (1989), Daker (1984), Letey (1985), Hunsaker & Bucks (1987) e Solomon (1984) afirmam que a uniformidade dos sistemas de irrigação influenciam no rendimento das culturas.

Na irrigação por aspersão, os aspersores são dispostos na área de forma a aplicar uma lâmina uniforme sobre a superfície, o que se consegue promovendo a superposição dos círculos irrigados. Com a evolução desse método, foram desenvolvidos sistemas adequados às diversas combinações de solo, planta, clima e outros fatores locais.

Conforme salienta Bernardo (1989), para se obter uma boa uniformidade na distribuição da água sobre uma área irrigada, os emissores devem ser espaçados de modo que ocorra uma sobreposição entre os perfis de distribuição de água dos mesmos, ao longo da linha lateral e entre linhas laterais, ao longo da linha principal. A porcentagem de sobreposição recomendada dependerá do tipo de emissor e da intensidade do vento na área a ser irrigada.

Normalmente, o coeficiente de uniformidade de distribuição é utilizado apenas como um indicador quantitativo da uniformidade de distribuição da água, sem um significado físico. Ben-Asher & Ayars (1990), em um estudo teórico, prognosticaram o impacto da não uniformidade nas perdas de água por percolação. Segundo esses autores, com o decréscimo do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), maior é a quantidade de água percolada para uma dada aplicação de água.

A melhora da uniformidade de um sistema de irrigação é a decisão mais importante para o manejo adequado da água aplicada. De acordo com Duke et al. (1992), aumentar o coeficiente de uniformidade de Christiansen de 81,8% para 96,8% equívale a aumentar a vazão em 27%, quando se usa a estratégia de manejo com um grau de adequação de 75% (75% da área irrigada recebe no mínimo a lâmina média). Heinemann & Frizzone (1995) concluíram que o aumento do coeficiente de uniformidade de Christiansen, em um sistema pivô central, de 81,21% para um nível de 94,00%, para os graus de adequação de 75, 80 e 85%, foi responsável por uma economia no volume de água aplicada de 11,86%, 14,24% e 16,68%, respectivamente.

Geralmente o coeficiente de uniformidade é utilizado para avaliar somente uma irrigação. Entretanto, de acordo com Pair (1968), torna-se mais interessante avaliar várias irrigações, porque o coeficiente de uniformidade, de modo geral, aumenta quando se utilizam os valores das lâminas coletadas de várias irrigações.

Klar (1991) considera o CUC pouco sensível, devido ao mesmo utilizar, como medida de dispersão, o desvio médio absoluto (média aritmética do valor absoluto das diferenças entre cada lâmina de irrigação aplicada ao terreno e à lâmina média). Desvios negativos e positivos são considerados de igual efeito, o que não é verdadeiro para as plantas. Diferentes distribuições de água podem produzir valores de CUC semelhantes.

Frizzone (1992) afirma que nenhum dos coeficientes de uniformidade, já apresentados como alternativa, mostrou vantagens significativas sobre o CUC.

A determinação da uniformidade de distribuição é feita em testes utilizando-se um ou mais aspersores, dispendo ao seu redor um número suficiente de pluviômetros. Tais pluviômetros devem estar regularmente espaçados e captar a lâmina aplicada em um tempo de funcionamento superior a uma hora ou suficiente para aplicação de 5 mm de lâmina (Frizzone, 1992).

Merriam et al. (1983) afirmam que 20 coletores espaçados de 3 metros entre si seriam necessários para uma razoável precisão do teste, que o mesmo deveria ter uma duração suficiente para que se captasse no mínimo 10mm de lâmina nos coletores. Afirmam também que erros menores que 3% não devem ser esperados.

Davis (1966) realizou um estudo aprofundado sobre a densidade de coletores em campo de ensaio. Os resultados obtidos demonstraram que para sistemas com uma boa uniformidade de aplicação, cada coletor não deve representar mais do que 6,7% da área total de ensaio. Em sistemas com baixa uniformidade, cada coletor deve no máximo representar 2,5% da área ensaiada.

Segundo a Norma NBR 8989 (1985) da Associação Brasileira de Normas Técnicas, os coletores devem ser instalados seguindo uma disposição quadrangular e no mínimo 50 coletores deverão receber água durante o ensaio de campo. Com relação ao tempo de ensaio, estabelece que a duração mínima deverá ser de uma hora, sendo que outros períodos poderão ser adotados, desde que sejam suficientes para proporcionar um volume médio de água nos coletores, equivalentes à uma lâmina de aplicação de 5mm.

Segundo Hermann et al. (1990), os pluviômetros devem ter paredes finas, ser altos o suficiente para evitar respingos e ser instalados rigorosamente na horizontal. A evaporação durante o teste deve ser considerada e seu valor somado às lâminas coletadas.

Keller & Bliesner (1990), apresentam uma compreensão prática das implicações da uniformidade de distribuição de água. Citam uma combinação dessa uniformidade com área adequadamente irrigada para fornecer a eficiência de distribuição, apresentando as relações em forma de uma tabela, válida para valores de CUC quando a

distribuição de água segue um padrão normal. Como exemplo, para um CUC de 80%, supondo-se que se deseje irrigar adequadamente 75% da área, tem-se que a eficiência de distribuição seria de 83%, ou seja, para cada 1mm de lâmina que se deseje aplicar ao solo deve-se aspergir $1/0,83=1,2$ mm de água. Já com um sistema que forneça CUC de 70%, para irrigar adequadamente o mesmo percentual da área ter-se-ia uma eficiência de aplicação de 75%, ou seja, seriam necessários $1/0,75=1,33$ mm de água, ou aproximadamente 11% a mais. É interessante notar que, para uma área adequadamente irrigada de 80%, os valores de CUC e eficiência de distribuição são praticamente coincidentes. Soares (1992) sugere que a área deficientemente irrigada varie entre 10 e 20%, de acordo com o valor comercial da cultura implantada.

O critério de adotar-se um valor de CUC ao redor de 80% em projetos de irrigação por aspersão é amplamente aceito. Segundo Keller & Bliesner (1990), mesmo reconhecendo a relatividade das definições de “alta” e “baixa” uniformidades, valores de CUC acima de 85% seriam recomendáveis para culturas sensíveis e de raízes rasas, entre 75 e 83% para culturas com sistema radicular de média profundidade, e acima de 70% para o caso de sistemas radiculares profundos. No caso de quimigação, altos valores de CUC seriam necessários, até mesmo porque a uniformidade de distribuição dos produtos químicos pode ser inferior à uniformidade de distribuição da água, como ocorre por exemplo, com os formulados em óleo (Vieira, 1994).

Von Bernuth (1983) argumenta que a definição de um valor desejável de uniformidade só é válida na ausência de restrição legal ou econômica ao uso da água. Havendo tal restrição, o que quase sempre ocorre em projetos de aspersão, a uniformidade deixaria de ser um critério e passaria a ser um parâmetro de projeto, e seu valor função de custos e expectativas de receita. Baseado nisso apresenta um método para determinar a uniformidade ótima de projeto quando o fator água é limitante e elabora um exemplo do uso de sua função para a cultura do milho. Observa-se no seu modelo que o coeficiente de uniformidade de Hart (CUH) ótimo aumenta com o valor do produto e com a lâmina média possível de ser aplicada ou seja, com a disponibilidade de água. Valores de CUH entre 52,7% e 93,3% são sugeridos de acordo com os dois fatores considerados.

Várias pesquisas têm demonstrado que a uniformidade de aplicação de água relaciona-se com o rendimento da cultura (Gohring & Wallender, 1987; Mantovani, 1993). Culturas de maior valor econômico são diretamente afetadas pela baixa uniformidade. Porém, em condições de limitada disponibilidade de água, a uniformidade pode ser compensada por um manejo eficiente da lâmina a ser aplicada, proporcionando melhor eficiência na sua utilização.

Solomon (1984) afirma que em alguns casos a produção pode ser expressa como função da uniformidade e da eficiência de irrigação. Von Bernuth (1983) utiliza uma função de produção para demonstrar que, trabalhando-se com níveis de irrigação abaixo do ótimo econômico a uniformidade de distribuição influenciará significativamente a produção. Acima daquele nível, no entanto, isto não se verifica.

Letey et al. (1984) analisam conceitualmente essa relação. Segundo eles, em culturas pouco sensíveis ao encharcamento, quando as lâminas aplicadas são insuficientes, menor uniformidade leva a maiores retornos econômicos, uma vez que pelo menos parte da área receberia água suficiente, ao contrário do que ocorreria numa irrigação de alta uniformidade. Os danos da baixa uniformidade, ainda segundo estes autores, são maiores em solos com tendência a encharcamento, baixa capacidade de retenção, pequena profundidade efetiva e em épocas de maior evapotranspiração. Admitem no entanto que baixas uniformidades levam a baixas produções, e que estas podem ser contrabalançadas pelo aumento da lâmina aplicada quando seu custo é baixo. Há no entanto que se considerar neste caso também a lixiviação de nutrientes.

Percebe-se que a uniformidade ótima para um projeto depende das condições locais e de preços do produto e de insumos, os quais variam no tempo, podendo-se utilizar valores menores que os tradicionais de projeto quando se tem restrição na quantidade de água disponível (Von Bernuth, 1983).

Chaudhry (1975) afirma que “a principal desvantagem do uso dos vários coeficientes de uniformidade disponíveis na literatura, é a negligência de fatores que afetam diretamente o projeto do sistema, fatores esses, tipo de cultura, solo, clima, colheitas e custos anuais”, com o que concorda Frizzone (1992).

Ao longo de algumas décadas, pesquisadores propuseram diferentes coeficientes para expressar a uniformidade da lâmina aplicada, com base em observações pontuais. O coeficiente de Christiansen (CUC), desenvolvido por Christiansen (1942), foi o primeiro índice proposto sendo o mais utilizado para quantificação da uniformidade na distribuição da água em irrigação por aspersão convencional. Este coeficiente é expresso pela seguinte equação:

$$CUC = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - X_m|}{nX_m} \right] \quad (1)$$

em que:

- CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen, %;
- n - número de coletores na área entre quatro emissores;
- X_i - lâmina de água coletada no i-ésimo coletor, mm; e
- X_m - valor médio das lâminas de água coletadas, mm.

Outra medida de uniformidade utilizada é a razão entre a média dos 25% dos menores valores de lâminas de irrigação e a lâmina média aplicada na superfície do solo. Sua origem é creditada ao SCS-USDA, por quem é chamada de eficiência padrão. Kruse (1978) denominou-a de uniformidade de distribuição, mas é também conhecido por coeficiente de uniformidade de distribuição.

A ABNT (1985) recomenda, no seu projeto de norma 12:02.08-005, a análise da distribuição de água por meio da uniformidade na porção da área irrigada, que recebe menos água, isto é utilizando o coeficiente de uniformidade de distribuição. Esse coeficiente pode ser obtido por meio da equação:

$$CUD = \frac{X_{25}}{X_m} 100 \quad (2)$$

em que:

- CUD - coeficiente de uniformidade de distribuição, %; e
- X_{25} - média de 25% do total de pluviômetros, com menores lâminas, mm.

Conforme Frizzone (1992), o coeficiente de uniformidade de distribuição de água é uma medida freqüentemente utilizada como indicador dos problemas de distribuição da irrigação. Um baixo valor de CUD indica perda excessiva de água por percolação profunda, se a lâmina mínima aplicada corresponde à lâmina necessária. Os valores de CUD são em geral menores que os valores de CUC. Depois que Christiansen (1942) propôs seu coeficiente para caracterizar a uniformidade de distribuição de água em um sistema de irrigação por aspersão, muitos outros coeficientes foram apresentados. Nenhum deles porém, foi suficientemente completo, de forma a possibilitar a substituição, apresentando vantagens sobre o coeficiente anteriormente proposto.

Conforme relatam alguns pesquisadores (Peri et al. 1979; Walker, 1979), a aplicação de água por qualquer sistema de irrigação é naturalmente desuniforme. Em geral, para um método particular de irrigação, alta uniformidade de aplicação somente pode ser alcançada com aumento nos gastos em capital ou nos custos de operação. Esses autores afirmam que, sob o aspecto econômico, alguns níveis particulares de desuniformidade podem ser aceitáveis para cada tipo de irrigação. Ao irrigante facultase escolher entre aplicar água suficiente para que a lâmina mínima seja igual à lâmina real necessária (aplicando excesso de água em parte da área) ou aplicar uma lâmina mínima menor, permitindo que parte da área seja deficientemente irrigada (provocando redução na produção).

Gilley et al. (1983), afirmam que um importante fator a ser considerado nos sistemas com pressão reduzida é a uniformidade de aplicação de água. Sistemas operando com altas pressões geralmente apresentam boa uniformidade de aplicação de água, devido à maior sobreposição, desde que o valor da pressão não supere aquele correspondente ao alcance máximo do aspersor. Em situações com pressões reduzidas, o raio de alcance dos aspersores ou difusores será menor quando comparado com alta pressão, resultando em uma menor sobreposição, especialmente em sistemas com difusores.

A otimização de sistemas de irrigação tem levado a estudos econômicos dos parâmetros que expressam a qualidade da irrigação. Solomon (1984), apresentou uma análise, mostrando como as medidas de uniformidade e eficiência de irrigação podem

ser interpretadas para previsão de produção. Varley (1976) verificou o efeito da uniformidade de aplicação de água no rendimento da cultura, enfatizando a importância de se considerar a relação água-rendimento para as condições de irrigação deficiente e excessiva. Von Bernuth (1983) e Chen & Wallender (1984) desenvolveram modelos que relacionam o coeficiente de uniformidade e quantidade de água aplicada à cultura, usando a maximização da receita líquida total.

Gohring & Wallender (1987) estudaram a otimização econômica de sistemas de irrigação por aspersão, relacionando a uniformidade de distribuição e a lâmina aplicada. Os autores verificaram que a uniformidade, associada a uma condição de operação do sistema, influencia efetivamente na obtenção de lucro ou rendimento da cultura.

Matsura (1987), investigando o desempenho de dois diferentes aspersores tipo canhão, concluiu que, por meio do coeficiente de uniformidade de Christiansen e da eficiência padrão de Criddle, juntamente com a precipitação de menor valor, pode-se determinar o espaçamento mais adequado entre aspersores.

Em geral, pode ser dito que, quando o espaçamento entre aspersores aumenta, a uniformidade de distribuição decresce. Entretanto, a combinação de outros fatores deve ser considerada na seleção do melhor espaçamento, como pressão de operação, diâmetro de bocal, condições de vento, raio de alcance do jato, e principalmente os custos (Zocoler et al., 1995).

Estudando o efeito da pressão de operação dos aspersores sobre a uniformidade de distribuição de água em diferentes espaçamentos, Coelho (1990), utilizando o aspersor Dantas, modelo MD-20A, com diâmetro de bocais de 4,4 x 2,5mm, verificou que: i) nos espaçamentos de 6 x 12m e 12 x 12m e pressões de 300 e 400kPa foram obtidos os melhores valores médios do CUC, 89,7% e 92,0%, respectivamente; ii) nos espaçamentos de 18 x 18m, 18 x 24m e 24 x 24m e pressão de 200kPa os valores do CUC foram 73,9%, 58,1% e 49,7%, respectivamente, valores estes semelhantes aos obtidos nas pressões de 300 e 400kPa.

Estudo da uniformidade e sua influência na produção da cultura do feijão e na economia dos projetos de irrigação por aspersão foi realizado por Faria (1993). Tal pesquisador utilizou aspersores da marca Asbrasil, modelo ZE-30 D, com seis diferentes

combinações de bocais, obtendo-se a uniformidade de distribuição por simulação, em condição de velocidade média máxima do vento de $3,3 \text{ Km h}^{-1}$. Algumas das principais conclusões verificadas foram:

- i) o espaçamento é altamente determinante na uniformidade de aplicação, que diminui com o seu aumento;
- ii) os melhores espaçamentos em termos de uniformidade dependem, no entanto, do bocal do aspersor e da pressão utilizada, em estreita relação com tais variáveis;
- iii) a produção mostrou ser altamente sensível à uniformidade, sendo sua taxa de variação maior para menores uniformidades.

2.3 Eficiência de irrigação

A eficiência de aplicação de água é um dos parâmetros mais importantes que deve ser considerado quando da elaboração de projetos de irrigação. Para tanto, é necessário conhecer o padrão da cultura durante o ciclo, o sistema a ser utilizado, uma previsão das práticas de cultivos, características do solo e, provavelmente, o mais importante de todos, o manejo da irrigação. Valores acima ou abaixo da eficiência efetivamente requerida para o projeto podem provocar total insucesso do mesmo.

Nos estudos da eficiência de irrigação por aspersão, além dos problemas com a uniformidade de distribuição, as perdas de água também reduzem a eficiência do sistema. Segundo Keller e Bliesner (1990), o excesso de irrigação é talvez a maior causa das perdas de água em qualquer sistema. Além do excesso devido a um manejo inadequado, as principais causas associadas ao desperdício de água na aspersão são: evaporação das gotas aspergidas e da água da superfície do solo, gotas de pequeno diâmetro arrastadas pelo vento (deriva), desperdícios nas bordas dos campos irrigados, em vazamentos e no esvaziamento da tubulação.

A grande dificuldade de determinar os efeitos das perdas de água, segundo Cuenca (1989), está no fato de que os testes de campo feitos para quantificar esse fenômeno têm sido realizados através de metodologia que utilizam coletores sob variadas condições de pressão de serviço, diferentes diâmetros de bocais, velocidade do

vento, temperatura do ar e umidade relativa. O volume de água aplicado através do aspersor que não foi observado nos coletores é assumido como perdido devido ao arraste das gotículas pelo vento e ou pela evaporação. Essas perdas, segundo esse mesmo autor, são provavelmente superestimadas, uma vez que essa água é considerada perdida, sem levar em conta se ela serve ou não para atenuar a demanda hídrica atmosférica sobre o dossel das plantas umedecidas.

Para o cálculo dos parâmetros que caracterizam a performance da irrigação, é relacionado o padrão de aplicação de água pelo sistema ou a distribuição de frequência dessa aplicação com um valor constante de armazenamento de água no solo (Walker, 1979). Nos pontos onde a lâmina aplicada supera a lâmina armazenada, ocorre a perda de água por percolação profunda, base para os cálculos da perda por percolação e da eficiência de distribuição. Segundo esse procedimento, a qualidade da irrigação é função apenas das características do sistema. Evans et al. (1995) salientam que o uso de uma função de distribuição fornece a probabilidade de ocorrência de uma determinada lâmina, mas nada informa sobre onde ela ocorre.

Elliott et al. (1980), estudando os modelos estatísticos uniforme (chamado por eles de “Linear”), normal e beta que aproximam-se das distribuições de água em sistemas de irrigação por aspersão, concluíram que para coeficientes de uniformidade acima de 65%, a distribuição normal fornece melhor ajuste do que o modelo linear. Para baixos coeficientes de uniformidade, o oposto verifica-se. Para o cálculo dos volumes de água necessários na determinação das eficiências de irrigação, os modelos normal e linear são atualmente mais práticos para o uso do que o modelo beta.

Nogueira (1987), em trabalho de avaliação técnica de dois sistemas de irrigação por aspersão, empregou os modelos linear e normal, e concluiu que para as condições do estudo realizado (coeficientes de variação entre 28 e 59%), os modelos linear e normal podem ser indistintamente aplicados para a determinação dos parâmetros de desempenho da irrigação por aspersão. No entanto a aplicação do modelo linear é mais simples e prática.

Hart (1961), utilizando dados de vários testes de aspersores, conclui que o modelo de distribuição de água pode ser definido pela função de distribuição normal.

Sendo conhecidos o desvio padrão (s), e a média dos dados de precipitação do sistema de irrigação (\bar{Y}), Hart & Reynolds (1965) afirmam que a forma da curva de distribuição normal pode ser estabelecida, permitindo determinar vários parâmetros relacionados à aplicação de água e à fração de área molhada.

Hart & Reynolds (1965) e Walker (1979) elaboraram um esquema, para descrever a aplicação de água via irrigação, definindo alguns parâmetros a partir do mesmo. Este esquema é apresentado na Figura 1 conforme Gonçalves (1997). Parte da água aplicada é armazenada na região radicular (A), parte é perdida por percolação (B) e parte da área (C) recebe uma lâmina menor que a mínima necessária. Os autores supõem que a distribuição da lâmina aplicada é normal.

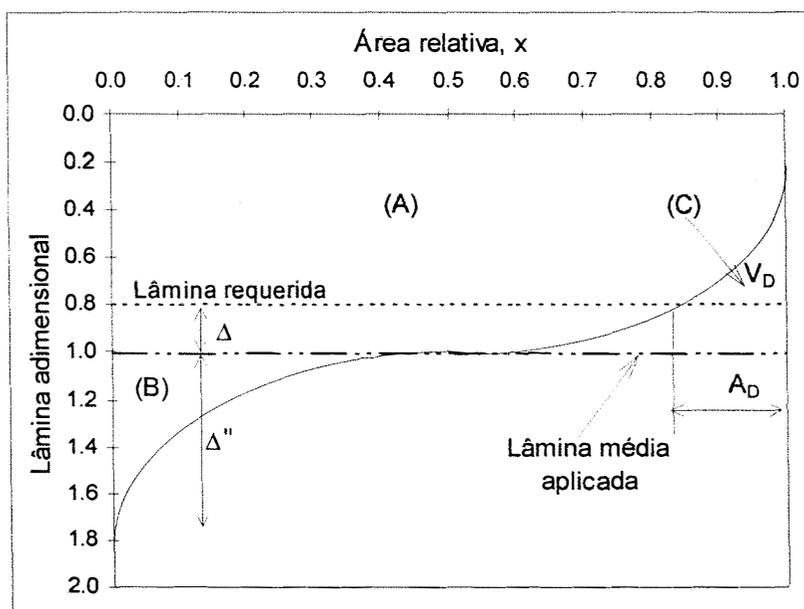


Figura 1 – Relações entre lâminas aplicada e requerida e demais elementos geométricos.

O ajuste das lâminas de água a uma distribuição de frequência, como a normal, permite o uso de expressões analíticas para o cálculo dos coeficientes de uniformidade e de eficiência de aplicação de água pelo sistema, conforme Warrick (1983). A partir dessa distribuição, pode-se estabelecer as áreas com excesso e com déficit, as quais variam em função da lâmina média aplicada e da lâmina requerida, determinando diferentes valores de eficiência.

Frizzone (1992) define a adequabilidade da irrigação como sendo um parâmetro que expressa o percentual da área que recebe no mínimo a lâmina necessária para suprir o déficit hídrico. Essa área corresponde ao complemento da área C (Figura 1).

A lâmina necessária para suprir o déficit hídrico (Y_r) é calculada supondo que o solo apresenta uma capacidade de armazenamento constante na área, sendo obtida por:

$$Y_r = 1000(\theta_{cc} - \theta_{lim})H \quad (3)$$

em que:

- Y_r - lâmina necessária para suprir o déficit hídrico ou capacidade de armazenamento de água no solo, mm;
- θ_{cc} - umidade do solo na capacidade de campo, $m^3 m^{-3}$;
- θ_{lim} - umidade do solo no momento da irrigação, $m^3 m^{-3}$; e
- H - profundidade efetiva do sistema radicular, m.

Após a infiltração, a água aplicada por irrigação pode ser perdida principalmente por percolação profunda. Na área com déficit (C), toda a água infiltrada é armazenada. No restante da área, parte da água é armazenada e parte (B) é perdida por percolação.

Segundo Karmeli (1978), o modelo tendendo à distribuição normal, a curva de frequência acumulada das lâminas de irrigação tem a forma de “S”. O modelo pode ser bastante uniforme e a distribuição pode ocorrer em torno da média caso o coeficiente de variação (C_v), que é definido pela relação entre s e \bar{Y} , tiver um valor relativamente baixo. No entanto quando o modelo tende a ser menos uniforme, o C_v aumenta e a forma em “S” da curva de distribuição tenderá a uma reta.

A eficiência de distribuição (E_d) expressa a relação entre o volume de água armazenado na região radicular e o volume de água infiltrado. De acordo com Frizzone (1992), pode ser calculada por:

$$Ed = \frac{v_s}{v_p + v_s} \quad (4)$$

em que :

v_s - volume armazenado na região radicular;

v_p - volume percolado.

A perda por percolação (P_p) é a relação entre o volume de água percolado para baixo da região radicular (B) e o volume de água infiltrado ($A+B$). Esta perda é expressa pela seguinte equação:

$$P_p = \frac{v_p}{v_p + v_s} \quad (5)$$

sendo portanto igual a $1 - Ed$.

Esses dois parâmetros são calculados supondo necessidade de água em toda a área, igual a Y_r , e se baseiam no valor calculado do volume de água percolado.

Conforme Walker (1979), se a lâmina média requerida na área é igual à lâmina média aplicada ($\Delta = 0$), então na metade da área ocorrerá percolação profunda e na outra metade ocorre sub-irrigação. Com base em critérios econômicos, pode ser conveniente reduzir a área deficientemente irrigada, aplicando uma lâmina maior que a média requerida em um dado momento. À medida que se aumenta o valor da lâmina média aplicada, a curva se desloca para baixo, aumentando o valor de Δ e reduzindo a área sub-irrigada. Sendo Δ igual à diferença entre a lâmina média aplicada e a média requerida e Δ'' o seu complemento em relação à lâmina máxima, conforme Figura 1, o autor apresenta que:

$$\Delta'' = 3,634 * C_v \quad (6)$$

em que C_v é o coeficiente de variação da distribuição dos valores de água aplicada.

O valor de Δ se relaciona com a área irrigada com déficit segundo a expressão:

$$\Delta = Cv(3,634 - 1,123(A_D)^{0,301}) \quad (7)$$

Isolando-se A_D na expressão (7) obtém-se:

$$A_D = \left[\frac{3,634Cv - \Delta}{1,123Cv} \right]^{3,3223} \quad (8)$$

Se $\Delta = 0$, então a A_D independe de Cv , sendo próxima a 50%. Se a distribuição se afasta da normal, essa expressão, assim como as demais, deixa de ser válida.

O volume adimensional de déficit (V_D) apresenta relação linear com o coeficiente de variação, além de se relacionar com a área A_D e pode ser obtido por:

$$V_D = 0,003C_v(A_D)^{1,233} \quad (9)$$

A eficiência de distribuição (Ed) é um indicador do excesso de água aplicado durante a irrigação e pode ser obtida por:

$$Ed = 100 \left[1 - Cv \left(3,634 - 1,123(A_D)^{0,3} + 0,003(A_D)^{1,233} \right) \right] \quad (10)$$

Avaliando a reposição da água ao solo para a cultura, calcula-se a eficiência de armazenamento (Es) segundo a expressão:

$$Es = \frac{Ed}{1 - Cv(3,634 - 1,123A_D^{0,301})} \quad (11)$$

A porcentagem de água perdida por percolação profunda (Pp) é calculada por:

$$Pp = 1 - Ed \quad (12)$$

Se a aplicação de água é feita com uniformidade absoluta, então o C_v é nulo e a eficiência se torna igual a 100%. Na medida em que cresce a desuniformidade e a relação entre as lâminas varia, a eficiência é alterada. Essa equação se mostra útil para o cálculo de eficiência para diferentes formas de manejo da irrigação, onde o valor de Δ varia conforme critérios de ordem técnica e econômica.

De acordo com Scaloppi (1985), a quantidade total de água a ser aplicada por meio de um sistema de irrigação por aspersão depende da quantidade real de água requerida e da eficiência de aplicação. A quantidade real de água requerida, geralmente expressa como lâmina de irrigação, é determinada em função do déficit de água disponível no solo, até a profundidade definida pelo sistema radicular da cultura, e eventuais exigências de lixiviação para remoção do excesso de sais solúveis da zona radicular. Quanto à eficiência de aplicação, o autor afirma que tem havido controvérsias em relação ao valor a ser adotado para proporcionar quantidade e distribuição satisfatórias em toda a área irrigada.

Jensen et al. (1967) afirmam que conhecendo-se o perfil de distribuição dos aspersores, pode-se avaliar a adequação de uma irrigação, ou mesmo ajustar a duração da mesma por intermédio de um valor numérico, obtendo-se a lâmina desejada. Dividindo a lâmina média necessária pelo coeficiente de uniformidade de distribuição garante-se que a área selecionada receba uma lâmina adequada. Por razões econômicas, parte da área pode ficar sub-irrigada e o restante irrigado adequadamente. A porcentagem da área sub-irrigada depende do valor econômico e da sensibilidade das plantas tanto ao déficit hídrico quanto ao excesso de água.

Para uma irrigação em particular, definindo-se a distribuição da água na área, torna-se possível determinar alguns parâmetros de desempenho do sistema de irrigação, como a eficiência de aplicação de água. Este índice, quando analisado conjuntamente com outros fatores, determina a adequação da irrigação (Elliot et al, 1980).

Afirmações são feitas no sentido de que a utilização de somente um parâmetro não avalia o desempenho da irrigação. Em condições extremas de irrigação deficiente, a E_a pode chegar a 100%, enquanto em condições de aplicação excessiva E_s assume valores de até 100%.

Alguns dos fatores que afetam a uniformidade de distribuição são amplamente discutidos: pressão de serviço, bombeamento inadequado, desuniformidade de fabricação, variações na linha dos aspersores, espaçamento entre eles, taxa de aplicação, evaporação, velocidade do vento, topografia, altura do tubo de elevação, velocidade de rotação, tensão da mola do aspersor e outros (Hermann et al, 1990 e Frizzone, 1992).

Os principais elementos climáticos que influem no uso da irrigação por aspersão são vento, umidade relativa e temperatura do ar. O vento influencia a uniformidade de distribuição dos aspersores e, juntamente com a temperatura e umidade relativa do ar, favorece a perda de água por evaporação (Forst, 1963; Solomon, 1979).

De acordo com Lopez (1975), o elemento climático de consideração mais importante na aspersão é o vento, devendo-se ter, por um lado, uma idéia aproximada de sua velocidade que desempenha um papel significativo na eficiência de aplicação e, por outro, sua direção, que deve ser levada em conta nas disposições das tubulações. O autor esclarece, ainda, que as altas temperaturas e a baixa umidade relativa do ar diminuem a eficiência do sistema, aumentando as perdas por evaporação.

2.4 Uniformidade abaixo da superfície do solo

Em relação à distribuição da água no solo, sabe-se que quando cessa a chuva ou a irrigação e a reserva de água na superfície do solo se esgota, o movimento de água ao longo do perfil persiste por mais tempo, com a água movendo-se para camadas mais profundas, principalmente sob influência do potencial gravitacional. Esse fenômeno pós-infiltração é denominado de redistribuição e se caracteriza por aumentar a umidade de camadas mais profundas a expensas da água contida nas camadas superficiais, inicialmente umedecidas (Reichardt, 1996).

Diferentes pesquisas têm mostrado a importância da redistribuição de água no solo em relação à distribuição da água na superfície com os equipamentos de irrigação.

A aplicação desuniforme de água ao solo cria gradientes de tensões que provocam o movimento da água de pontos de menores tensões para pontos de maiores

tensões. Há uma intensa redistribuição dentro do solo e conseqüentemente uma uniformização da distribuição de umidade.

Hart & Reynolds (1965) estudando a influência de diversas variáveis de irrigação na redistribuição da água dentro do solo, concluíram que a avaliação de sistemas de aspersão pelas medidas obtidas na superfície subestima a sua uniformidade, sendo, portanto, inadequada se o objetivo do projeto é implantar o sistema mais econômico possível.

Para aumentar a uniformidade de distribuição por um sistema de irrigação, ou substituí-lo por outro sistema com maior capacidade de aplicar água uniformemente, deve-se levar em consideração as respostas biológicas das culturas e a relação custo/benefício que irá proporcionar. Os modelos biológicos e econômicos são complexos e devem ser avaliados em conjunto com a uniformidade de distribuição. Todavia esses modelos não podem ser expressos somente em função da uniformidade da irrigação (Heermann et al. 1990).

Hart (1972), chegou à conclusão de que existe uma redistribuição horizontal da água aplicada ao solo, na camada superficial, de tal maneira que ocorre um sensível acréscimo da uniformidade de umidade do solo. O autor dá exemplos de um coeficiente de uniformidade de 0,60 para a distribuição de água na superfície do solo, atingindo 0,76 e 0,86 depois da redistribuição no solo por um e dois dias, respectivamente. Conclui também que:

- a redistribuição é maior quando o solo está com umidade inicial mais alta, do que quando ocorre o contrário;
- a uniformidade máxima foi atingida mais facilmente quando a irrigação foi feita com taxa de aplicação mais elevada, partindo de uma mesma uniformidade inicial;
- a uniformidade da distribuição da água aplicada pode não ser tão importante como suposto inicialmente. A máxima uniformidade subsuperficial foi alcançada, tanto para um coeficiente de uniformidade superficial de 0,60 como para um de 0,70;
- para um mesmo tempo de aplicação, uma maior taxa de aplicação resulta em uma distribuição mais uniforme da água dentro do solo. Porém, do ponto de vista de muitos projetos de irrigação, ambas as distribuições podem ser consideradas satisfatórias.

Paiva (1980), analisando o efeito da uniformidade de distribuição de água aplicada na superfície do solo pelo sistema de aspersão convencional, sobre a uniformidade de redistribuição de água no perfil do solo concluiu que:

- ao longo do tempo, após o fim da irrigação, houve um aumento nos coeficientes de uniformidade, em todas as profundidades estudadas;
- nas maiores profundidades a distribuição foi mais uniforme;
- mesmo nos ensaios onde a uniformidade de água aplicada na superfície foi muito baixa, em curtos espaços de tempo os coeficientes de uniformidade de umidade alcançaram altos valores.

Penaforte (1992) e Rezende et al. (1993) acrescentam que as maiores variações de uniformidade ocorrem nas camadas superiores. Os mesmos autores afirmam que para baixas uniformidades de aplicação, em curtos espaços de tempo, a uniformidade da umidade alcança valores altos.

Perrens (1984), em trabalho de pesquisa, concluiu que a intensidade de redistribuição da água no solo está inteiramente relacionada com a textura do solo. Avaliando a uniformidade de umidade a 50 cm de profundidade, durante o processo de redistribuição da água no solo, para um período de dois dias, a uniformidade aumentou de 60% para 73% em um solo do tipo areno-siltoso.

2.5 Cultura do feijoeiro

2.5.1 Crescimento e desenvolvimento do feijoeiro

Originário da América Central, o feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.), é uma planta anual, herbácea, com ciclo vegetativo variável entre 75 a 120 dias e que apresenta hábitos de crescimento do tipo determinado e indeterminado.

O crescimento de um organismo é definido como uma alteração em seu volume e peso conforme Fernández et al., (1982), ou ainda, como a variação temporal da quantidade de matéria das plantas (Pereira & Machado, 1987). É um fenômeno

quantitativo, afetado pela altitude e longitude e que pode ser mensurado por meio de parâmetros tais como acúmulo de matéria seca, número de nós, índice de área foliar (IAF), entre outros.

Segundo Doorenbos & Kassam (1979) a cultura do feijoeiro pode-se desenvolver com temperaturas médias diurnas entre 10°C e 27°C, sendo que a temperatura ótima para a produção situa-se na faixa dos 15°C aos 20°C.

A produtividade média da cultura do feijoeiro no Brasil tem-se mantido estabilizada nestes últimos anos em torno de 600 kg ha⁻¹, apesar do potencial produtivo da espécie situar-se próximo dos 3000 kg ha⁻¹, (Fancelli & Dourado-Neto, 1997).

2.5.1.1 Parte aérea

A fase vegetativa do feijoeiro tem seu início na germinação da semente, prosseguindo até o aparecimento dos primeiros botões florais. É favorecida pela ocorrência de temperaturas moderadamente elevadas (entre 21 e 29,5°C), disponibilidade hídrica adequada e luminosidade abundante. Já a fase reprodutiva é delimitada pela emissão dos botões florais e pleno enchimento de vagens e maturidade das sementes (Fernández et al., 1982). Sendo extremamente sensível à deficiência hídrica e ao excesso de água (Fancelli & Dourado-Neto, 1997).

O índice de área foliar (IAF), é uma medida de área foliar correspondente à superfície de tecido foliar produzida sobre determinada área de solo. Como a folha é o principal local da fotossíntese, a taxa de produção de matéria seca pelas comunidades vegetais é função da superfície foliar, conforme estabelecido por Shibles & Weber (1965).

Segundo Kûet & Marshall (1971), o IAF reflete a capacidade produtiva atual de uma comunidade vegetal, sendo que esse índice, o arranjo das folhas e a altura das hastes são usualmente os fatores mais importantes na competição por luz.

Embora a área foliar seja uma característica genética, o IAF pode ser modificado pela densidade populacional e pela aplicação de água e de fertilizantes (Yoshida, 1972). A produção de matéria seca é função do IAF até um determinado valor. Brougham

(1958) observou um aumento de produção até um certo valor do IAF, por ele denominado de “crítico”, correspondendo àquele em que há interceptação de 95% da luz solar incidente ao meio dia. Por conveniência, o IAF crítico é definido como o valor além do qual a taxa de produção de matéria seca não aumenta ou aumenta muito pouco.

Em 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).

O índice de área foliar de uma cultura mostra-se como um parâmetro eficaz para indicar a capacidade fotossintética, sendo sua determinação importante em estudos que relacionam nutrição de plantas, competição e relações solo-planta-atmosfera (Luchiari Junior 1978; Bergamaschi 1984 e Oliveira & Silva 1990).

Alvim & Alvim (1969) observaram valores de IAF de 1,4 a 7,6 na cultura do feijoeiro solteiro, enquanto que Portes (1996) relatou valores experimentais de IAF variando de 0,75 a 2,20 e de 0,80 a 4,0, respectivamente, durante o ciclo de plantas de feijoeiro dos cultivares Carioca e Aporé, ambos de hábitos de crescimento indeterminado, submetidos ou não a adubações nitrogenadas foliares dos 25 dias até o final do florescimento. Para os dois cultivares o máximo valor de IAF foi observado ao redor dos 55 dias do ciclo, declinando rapidamente a partir dos 85 dias.

2.5.1.2 Sistema radicular

A distribuição de raízes no solo resulta de uma série de processos complexos e dinâmicos, incluindo-se aqui as interações entre o ambiente, o solo e as plantas em pleno crescimento. Como as raízes são imprescindíveis no processo de absorção de água e de nutrientes, seu desenvolvimento, sua concentração e distribuição no perfil do solo são características fundamentais ao entendimento da produção das culturas (Pearson, 1974; Taylor & Arkin, 1981; Brown & Scott, 1984; Glinski & Lipiec, 1990).

O feijoeiro possui um sistema radicular pivotante ramificado e sua amplitude varia de acordo com as condições físicas do solo, tais como estrutura, porosidade,

aeração, capacidade de retenção de umidade e temperatura. Em condições muito favoráveis, as raízes podem atingir mais de um metro de comprimento (Ospina, 1981; Vilhordo et al., 1996). Seu sistema radicular lateral é extenso e concentra-se principalmente nos primeiros 0,30m no perfil do solo. Podem ser atingidas as profundidades de cerca de 0,07m na emergência; 0,30 a 0,90m por ocasião do início do florescimento e 1,00 a 1,50m na maturidade das plantas, sendo que a absorção de água ocorre sobretudo até 0,50 a 0,70m de profundidade (Doorenbos & Kassam, 1994).

O sistema radicular do feijoeiro, embora possa atingir profundidades no perfil do solo entre 1 a 1,5m, como indicado anteriormente, possui uma distribuição lateral de raízes abundante e superficial, concentrando-se principalmente nos primeiros 0,20 a 0,30m do solo (Inforzato & Miyasaka 1963; Reichardt et al. 1974; Stone et al. 1988; Fancelli & Dourado-Neto 1992). Trabalhos desenvolvidos com feijoeiro irrigado têm mostrado também valores de profundidade efetiva do sistema radicular ao redor de 0,30m (Caixeta et al. 1983; Oliveira & Silva 1990 e Pires et al. 1991).

No Brasil, em condições de sequeiro e por ocasião do florescimento das plantas, Inforzato & Miyasaka (1963) determinaram que cerca de 84% e 97% das raízes do feijoeiro se distribuíam até 0,20m de profundidade, respectivamente em solo podzólico vermelho-amarelo de Monte Alegre do Sul e em solo podzólico de Lins e Marília, São Paulo. A profundidade máxima atingida pelas raízes nos dois tipos de solo foi 0,90m. Resultados similares foram posteriormente obtidos por Avilan-Rovira (1975) e Caixeta et al. (1983), enquanto que Reichardt et al. (1974) e, mais recentemente, Pires et al. (1991) verificaram que 90% e 80% das raízes de feijoeiro situavam-se, respectivamente, nos primeiros 0,30m do perfil de um latossolo roxo e de um podzólico vermelho-amarelo latossólico eutrófico, este em Votuporanga, na região noroeste de Estado de São Paulo e em três ocasiões após o florescimento das plantas (aos 45, 62 e 78 dias após a semeadura).

2.5.2 Necessidades hídricas

O feijoeiro é sensível tanto à deficiência hídrica quanto ao excesso de água no solo, principalmente nas fases de florescimento e de desenvolvimento das vagens. O consumo de água pela cultura varia basicamente com o estágio de desenvolvimento, cultivar e condições climáticas locais. Em geral, o consumo total de água pode variar de 300 a 500mm por ciclo, quando cultivado no sistema de preparo de solo convencional e de 250 a 400mm, em plantio direto (Moreira & Stone, 1995).

Conforme Doorenbos & Kassam (1979) as necessidades hídricas exigidas para a produção máxima do feijoeiro, estariam entre 300 a 500mm, sendo a variação deste valor dependente das condições climáticas locais. Fancelli (1987) indica que a cultura do feijoeiro exige um mínimo de 250mm de água, sendo muito mais importante a sua distribuição do que a disponibilidade total, refletindo-se principalmente nos períodos considerados críticos quanto à exigência de água: emergência, o início do florescimento e a formação de vagens.

Essa leguminosa necessita de baixa tensão de água no solo para que o seu potencial produtivo seja manifestado (Peloso et al., 1996). Garrido et al. (1978) não observaram diferenças significativas no rendimento dessa leguminosa quando a tensão da água nos primeiros 0,30m de profundidade do solo esteve a 20, 40 e 60kPa. Stone & Moreira (1986) sugeriram o reinício da irrigação quando a tensão da água do solo, medida com tensiômetro, atingisse a faixa de 25 a 30kPa e, Saad et al. (1992) recomendam irrigar quando o tensão da água no solo apresentar valores de 30 a 70kPa.

O controle da irrigação por aspersão, no sistema convencional, autopropelido e, sobretudo, via pivô central, deve ser feito por meio de métodos precisos, sendo mais utilizados o do tanque classe A e o de tensiômetros associados a curvas de retenção de água (Peloso et al. 1996).

Ao avaliarem a otimização do uso da água, Dourado-Neto et al. (1992) relataram as vantagens do tensiômetro em relação aos demais métodos, por conferir uma boa estimativa do armazenamento de água no solo, além de ser de simples

operacionalização. Também Saad et al. (1992) obtiveram um controle eficiente da água disponível no solo utilizando o método do tensiômetro para controle da irrigação.

A eficiência da utilização da água pela cultura em relação ao rendimento obtido é um parâmetro de grande importância, sobretudo em locais onde a atividade de produção de feijão é diretamente determinada pela prática da irrigação, refletindo na rentabilidade e eficiência da produção. Para a cultura do feijoeiro, o valor da eficiência de uso da água no caso da produção de grãos com umidade de 10%, é da ordem de 0,3 a 0,6 kg m⁻³, segundo Doorenbos & Kassam (1979).

Resende et al. (1981), e Stone et al. (1988), observaram que o IAF no florescimento foi bastante afetado pelos níveis de estresse hídrico, concordando com resultados similares obtidos por Guimarães (1992), de 11,6 e 41,5% no IAF do cultivar Carioca, sob estresses de moderado a severo, respectivamente. Bascur et al. (1985) obtiveram maior manutenção da área foliar sob deficiência hídrica para o cultivar Negro Argel de feijoeiro, que é bem resistente à seca, com conseqüentes maiores pesos de matéria seca e de produtividade.

A fase de pré-florescimento ou início da fase reprodutiva é considerada uma das mais críticas à deficiência de água, por diversos autores citados em Fancelli & Dourado-Neto (1997). Em decorrência de um possível estresse hídrico pode haver a suspensão brusca da emissão de novas folhas nas plantas de hábito de crescimento indeterminado, com perdas de produtividade de 15 a 30% (Fancelli & Dourado-Neto, 1997). O consumo de água nessa fase varia entre 4,0 e 4,5mm dia⁻¹, podendo exceder 5 mm dia⁻¹ quando as condições ambientais forem de intenso calor e baixa umidade relativa do ar (Caixeta, 1978). Também a fase de formação de vagens é extremamente sensível à deficiência hídrica, porque pode provocar a diminuição da produtividade pela redução da fotossíntese e do metabolismo das plantas. Essa diminuição na produtividade foi de 38% no período efetivo de formação de vagens, conforme observado por Garrido et al. (1979). Podem contribuir também para o aumento da queda de vagens imaturas (abortamento), além de causar a retração no tamanho das vagens em crescimento (Fancelli & Dourado-Neto, 1997).

2.6 Análise estatística dos dados

Para a avaliação dos efeitos dos diferentes níveis de uniformidade de irrigação sobre as diversas variáveis, conforme salientado por Gonçalves (1997), torna-se necessário o tratamento estatístico dos dados, buscando descrever o comportamento de cada variável por meio de um conjunto de parâmetros, os quais descrevem a distribuição de frequência dos dados.

De acordo com Trangmar et al. (1985), a estatística assume que um valor medido é em parte explicado por um modelo e em parte pela variação devida ao acaso. Assim, cada variável pode ser descrita por um valor de tendência central (média populacional) e pelo desvio, correspondente à diferença entre este valor e o medido. Segundo Gonçalves (1997), assumindo-se as hipóteses de independência e normalidade dos valores da variável, a média aritmética dos dados pode ser adotada como bom estimador da posição central dos valores da população.

A média é o parâmetro mais conhecido e utilizado na estatística básica, devido, principalmente, à simplicidade de sua obtenção e às fortes propriedades matemáticas a ela inerentes, que permitem sua utilização em problemas tanto teóricos como práticos (Iemma, 1992). No entanto, segundo esse autor, em certos casos a média pode não ser o parâmetro mais adequado para descrever os valores extremos ou discrepantes.

Segundo Dourado Neto (1989), o uso da estatística clássica pressupõe que os valores da variável em estudo sejam independentes e apresentem distribuição normal, o que nem sempre se tem na prática. Conclusões obtidas sem o atendimento destas hipóteses básicas, podem ser falhas, não confiáveis e, por vezes, absurdas.

Outro parâmetro de tendência central é a mediana, que representa o valor central da variável quando as observações são classificadas em ordem crescente. Portanto, a quantidade de valores menores e maiores que a mediana são iguais. Matematicamente a mediana é menos sensível a valores extremos (Webster & Olivier, 1990).

Em algumas situações pode-se ficar em dúvida sobre qual parâmetro de tendência central deve ser utilizado para descrever um conjunto de dados. Iemma (1992) sugere alguns critérios que fornecem uma idéia inicial sobre qual dessas medidas se deve

utilizar. Segundo esse autor, a média deve ser escolhida quando: (i) é necessário o tratamento matemático; (ii) os dados se distribuem, ao menos aproximadamente, de forma simétrica; (iii) for necessário obter posteriormente outros parâmetros a partir da média (variância, desvio padrão, coeficiente de variação, entre outros). Deve-se escolher a mediana quando: (i) há valores discrepantes que podem “distorcer” a média; (ii) deseja-se conhecer o ponto central exato da distribuição, (iii) a distribuição dos dados é muito assimétrica.

Para associar a uma estimativa um nível de precisão, é necessário adotar uma medida que expresse a dispersão dos valores em torno da média. A variância ou o desvio padrão dos dados descrevem esta dispersão. De acordo com Webster e Olivier (1990), o coeficiente de variação pode ser obtido pela relação entre o desvio padrão e a média de um conjunto de dados, sendo útil para a comparação do nível de dispersão entre conjunto de dados, por ser adimensional.

Segundo Libardi et al. (1996), o desvio padrão é particularmente recomendável como estatística de avaliação da variabilidade, pois possui a unidade original dos dados. Porém a utilização do desvio padrão para comparação de duas propriedades diferentes é inadequada, visto que as unidades são diferentes, necessitando-se, nesse caso, de uma medida relativa da variabilidade.

O coeficiente de variação foi utilizado como medida de variabilidade e serviu de base para os estudos de Warrick & Nielsen (1980). Esses autores, estudando a variabilidade de diversas propriedades do solo, verificaram que, para algumas, a variabilidade expressa pelo coeficiente de variação pode ser inferior a 10%, enquanto para outras, pode superar 1000%. Classificaram a variabilidade em três níveis: baixo (abaixo de 12%), médio (entre 12 e 80%) e alta (acima de 80%).

A dispersão dos dados em torno do valor médio dentro de cada tratamento e entre tratamentos, constitui a base da análise de variância, ferramenta empregada para a análise estatística do efeito de tratamentos sobre as variáveis estudadas e de uso generalizado em experimentação agronômica.

A distribuição normal, também denominada de curva normal ou de gauss, é a distribuição de probabilidade contínua mais importante e utilizada (Spiegel, 1993).

Conforme Assis et al. (1996), sua importância resulta do fato de que muitas técnicas estatísticas, como análise de variância, de regressão e alguns testes de hipótese assumem e exigem a normalidade dos dados.

A normalidade dos dados é base dos diversos métodos da estatística e deve, sempre que possível, ser avaliada. Para fins de irrigação, o emprego dos métodos apresentados por Walker (1979) pressupõe que os dados de lâmina aplicada seguem a distribuição normal. De acordo com Gonçalves (1997), para verificar o ajuste dos dados à distribuição normal, pode-se fazer uso de gráficos em papel de probabilidade normal (Nielsen et al., 1973), pode-se usar critérios associados aos momentos de terceira e quarta ordem da distribuição (Beiguelman, 1994), ou pode-se fazer uso de um teste não paramétrico, como o de Kolmogorov-Smirnov, apresentado por Kreyzig (1970), Campos (1983) e Assis et al. (1996).

Para complementar a análise baseada nas medidas de posição e dispersão, uma análise descritiva dos dados no espaço é conveniente e pode ser realizada segundo métodos apresentados por Isaaks e Srivastava (1989). Libardi et al. (1996) apresentam ferramentas para a análise de dados distribuídos no espaço, tais como o diagrama de ramos e folhas. Outra ferramenta muito útil é o gráfico “box-plot”, conforme afirmam Isaaks & Srivastava (1989).

De acordo com Mateos et al, (1997), a uniformidade da irrigação por aspersão é usualmente quantificada por um coeficiente estatístico de uniformidade. Estes coeficientes no entanto se mostram insuficientes para quantificar a influência da desuniformidade da irrigação sobre a produção da cultura, uma vez que os mesmos não levam em conta efeitos relacionados com características do solo e, principalmente, da distribuição espacial da água aplicada.

Assim, a análise do comportamento das variáveis adotadas, bem como das inter-relações entre as mesmas, pode ser complementada com grandes benefícios à compreensão dos processos envolvidos, com o uso de técnicas de análise exploratória dos dados, principalmente levando-se em conta a distribuição dos dados no espaço.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Em um período que antecedeu a condução dos ensaios propriamente dita, foram realizadas algumas tentativas para se obter os dados necessários para a realização deste trabalho. Inicialmente, várias tentativas foram frustradas, devido a alguns fatores, principalmente o excesso de chuvas em épocas de coleta dos dados. Como era de se esperar essas frustrações, foi escalonado o plantio da cultura possibilitando sempre uma nova oportunidade de obtenção dos dados necessários.

As tentativas, mesmo frustradas, foram muito válidas, porque possibilitaram o treinamento na condução do trabalho em campo, tornando a obtenção dos dados em definitivo mais criteriosa, pelo conhecimento das dificuldades que poderiam ocorrer. Esses testes preliminares foram válidos mesmo em relação à adequação do equipamento de irrigação, calibração das pressões e até mesmo na definição dos quatro espaçamentos entre aspersores a ser utilizados.

3.1 Caracterização do local

Na área experimental de irrigação do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, no município de Maringá, Paraná, localizada geograficamente a 23°25' de latitude sul e a 51°57' de longitude oeste, com altitude média de 542m acima do nível do mar, foi conduzido o presente trabalho, no primeiro semestre de 1998.

3.1.1 Clima

O clima predominante é do tipo Cfa, mesotérmico úmido com chuvas abundantes no verão e inverno seco, com precipitação média anual de 1500mm, sendo que nos meses de dezembro e janeiro concentram-se os maiores índices de precipitação e nos meses de julho e agosto os menores. A temperatura média anual é de 16,7°C, sendo que a média das mínimas alcança 10,3°C e a média das máximas atinge 33,6°C. O valor médio da umidade relativa do ar é igual a 66%.

3.1.2 Solo

O solo da área experimental foi classificado como terra roxa estruturada eutrófica com horizonte A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia (Embrapa, 1984). O relevo da área experimental é considerado homogêneo, com suave ondulação apresentando declividade média de 6%.

A análise granulométrica e a determinação da densidade do solo foram realizadas com amostras de solo em doze repetições, representando as camadas de 0-15cm; 15-30cm; 30-45cm de profundidade. As amostras foram retiradas em locais distintos dentro da área utilizada para a realização dos ensaios. A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico, com auxílio de anéis de alumínio de 5cm de diâmetro e 3cm de altura. Os resultados dessas análises são mostrados na Tabela 1. A curva de retenção de água no solo é apresentada na Figura 2. A capacidade de campo foi considerada como sendo o conteúdo de água retido a 6kPa (Souza & Reichardt, 1996).

Tabela 1- Análise granulométrica e densidade do solo.

Camada (cm)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Densidade do solo (Mg m ⁻³)
0-15	87	9	4	1,23
15-30	85	11	4	1,28
30-45	78	16	6	1,34

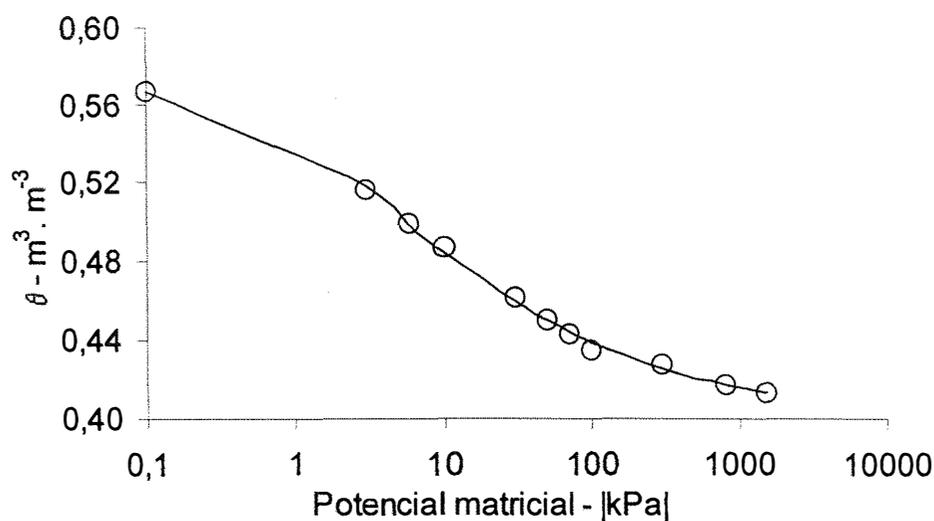


Figura 2 – Curva de retenção de água no solo.

3.2 Sistema de irrigação

O sistema de irrigação por aspersão utilizado para cada nível de uniformidade adotado (cenário) foi composto de cinco linhas laterais adjacentes, com cinco aspersores por linha, funcionando simultaneamente à mesma pressão conforme Figura 3. A pressão foi ajustada atuando-se em registros de gaveta dispostos no tubo de elevação de cada aspersor.

Os aspersores utilizados foram da marca Fabrimar, modelo A 232 ECO, bocais 5,6 x 3,2mm. Em cada cenário funcionavam simultaneamente 25 aspersores, sendo suas características operacionais apresentadas na Tabela 2, destacando-se que os mesmos não funcionaram em condições recomendadas em catálogo do fabricante.

Tabela 2 - Características do aspersor, bocais, pressão de serviço (P.S.), vazão (Q.), diâmetro molhado (D.M.), espaçamento (E.) e intensidade de aplicação (Ia).

Bocais (mm)	P.S. (mca)	Q. (m³/h)	D.M. (m)	E. (m)	Ia (mm/h)
5,6 x 3,2	30	2,52	28	12x12	17,50
	30	2,52	28	18x18	7,78
	25	2,36	25	18x24	5,46
	25	2,36	25	24x24	4,10

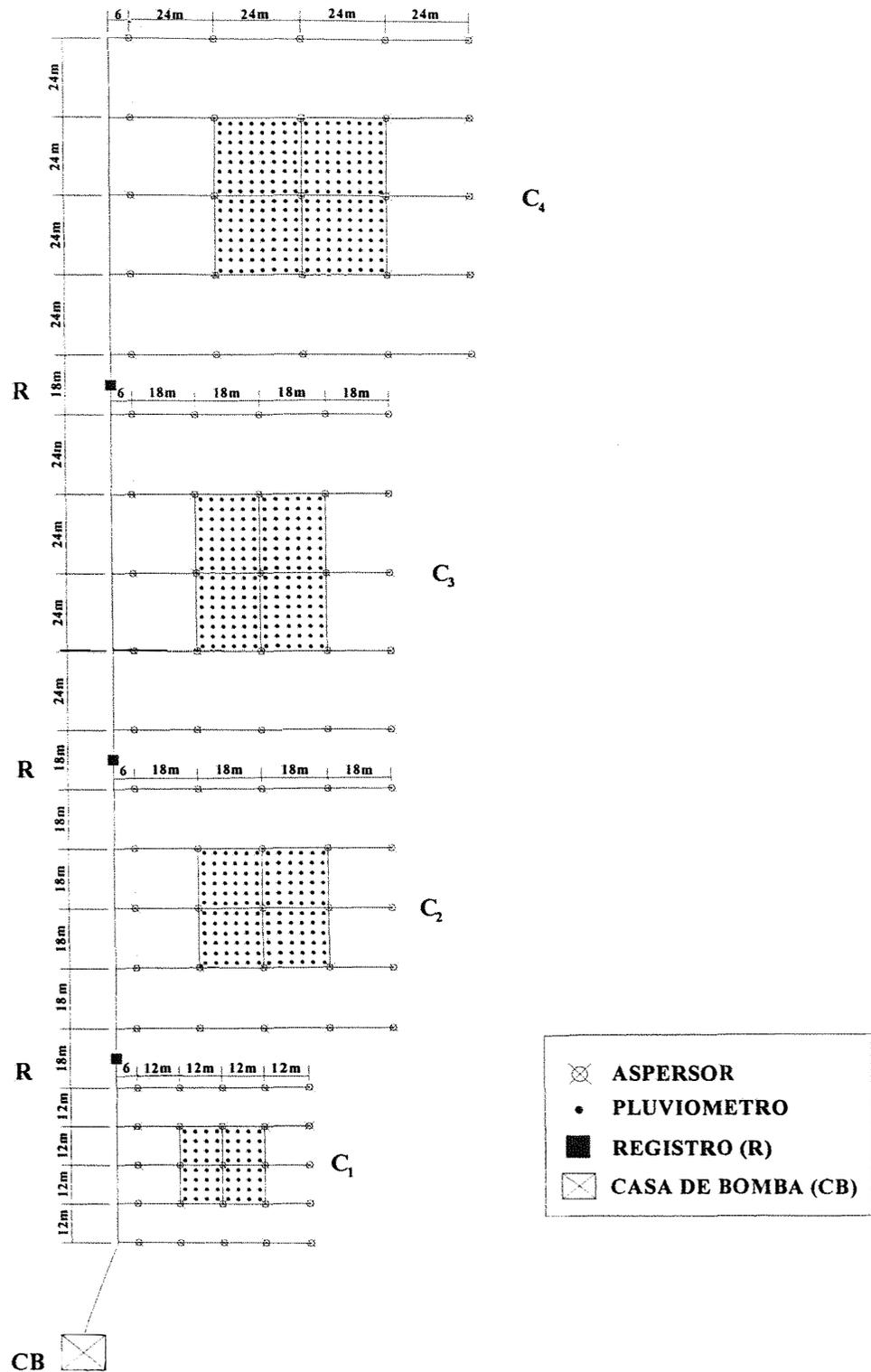


Figura 3 - Sistema de irrigação no campo, mostrando os quatro cenários (C₁, C₂, C₃ e C₄.)

Nas linhas laterais foram usados tubos de PVC de 50mm de diâmetro. Os comprimentos das linhas laterais foram de 54, 78, 78 e 102m, respectivamente, para os espaçamentos de 12 x 12m; 18 x 18m; 18 x 24m e 24 x 24m entre aspersores. As ligações entre os tubos e os aspersores (tubo de elevação) foram feitas com tubos de PVC de 25mm de diâmetro e 0,6m de comprimento. Nestes tubos foram instalados registros de gavetas e manômetros de “Bourdon”, para controle da pressão em cada aspersor.

As linhas principais constituíram-se de tubos de PVC de 75mm, com diferentes comprimentos em função da localização do ensaio na área experimental.

Trabalhou-se com quatro espaçamentos entre aspersores, com a finalidade de obter altos e baixos coeficientes de uniformidade de distribuição na superfície do solo, possibilitando a comparação com coeficientes de uniformidade de umidade abaixo da superfície. Os efeitos dos diferentes níveis de uniformidade sobre as variáveis de produção e de crescimento da cultura do feijoeiro, foram também avaliados.

Os quatro espaçamentos entre aspersores serão denominados neste trabalho de cenários, sendo o cenário 1 correspondente ao espaçamento entre aspersores de 12 x 12m e os cenários 2, 3 e 4 correspondentes, respectivamente, aos espaçamentos de 18 x 18m, 18 x 24m e 24 x 24m.

As irrigações foram realizadas tendo como base a média das leituras de tensiômetros instalados nas parcelas experimentais, nas profundidades de 0,20 e 0,40m, utilizando como limite os valores de umidade nas tensões de 0,05MPa. Em todos os cenários foi aplicada a mesma lâmina bruta de água, em todas as irrigações, igual a 12mm. Consequentemente, foram necessários diferentes tempos de irrigação para cada cenário.

As obtenções dos dados referentes às irrigações foram feitas em todas as irrigações necessárias, mas foram utilizados dados referentes a quinze irrigações apenas, uma vez que ocorreram chuvas após as demais.

3.3 Condições ambientais

Para verificar as possíveis influências do ambiente, foram caracterizadas as condições ambientais. Dados climáticos de velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura, foram obtidos próximo da área dos ensaios, no posto meteorológico do Centro Técnico de Irrigação. A umidade relativa do ar foi obtida por meio de um termohigrógrafo. A velocidade do vento foi medida por meio de um anemômetro de conchas totalizador, instalado a dois metros de altura em relação à superfície do solo. As leituras desse instrumento foram feitas a cada 15 minutos durante a realização dos ensaios, obtendo-se assim a velocidade média do vento para cada ensaio. Também foi utilizado um par de termômetros graduados a cada 0,2°C, com a finalidade de caracterizar as condições de temperatura.

3.4 Distribuição superficial da água aplicada

Para a obtenção dos dados necessários aos cálculos dos parâmetros estatísticos que caracterizam a distribuição de água do sistema de irrigação, foram medidas as precipitações com o uso de pluviômetros dispostos em malhas de 3 x 3m, nas áreas compreendidas entre os nove aspersores centrais, nos quatro cenários utilizados. Para cada um dos cenários foram realizadas quatro amostragens. Em cada amostragem considerou-se a área compreendida entre quatro aspersores. Em cada cenário, o número de quadrículas de 3 x 3m era diferente. Para os cenários 1, 2, 3 e 4, o número de quadrículas foi de 16, 36, 48 e 64 quadrículas, respectivamente, conforme mostrado na Figura 3. Os pluviômetros tinham 0,10m de diâmetro, e foram fixados em hastes metálicas, de forma a ficar a uma altura de 0,40m da superfície do solo.

3.5 Distribuição de umidade abaixo da superfície do solo

A determinação da uniformidade de distribuição da água abaixo da superfície do solo foi realizada a partir de medidas de umidade obtidas na profundidade de 0,30m, em dois pontos, situados a 0,30m de cada pluviômetro, perfazendo duas repetições. As coletas das amostras de solo foram realizadas antes de se realizar cada uma das irrigações e também vinte e quatro horas após o final das mesmas. A umidade foi determinada pelo método gravimétrico.

3.6 Coeficientes de uniformidade

As medidas de uniformidade de distribuição expressam a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada nas áreas adjacentes aos aspersores, isto é, mostram a dispersão dos valores obtidos em relação à lâmina média. Neste trabalho, os coeficientes de uniformidade de irrigação foram obtidos para cada cenário utilizando as lâminas coletadas. Determinaram-se também os coeficientes de uniformidade para as umidades do solo, na profundidade e no tempo já mencionados. Antes e após cada irrigação, foram obtidos os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), e os coeficientes de uniformidade de distribuição (CUD), utilizando as equações 1 e 2, respectivamente. O cálculo dos coeficientes para umidade do solo foi feito considerando-se, na equação 1, n como sendo o número de pontos amostrados, X_i sendo a umidade no i -ésimo ponto e X_m o valor médio dos valores de umidade, expressa em termos percentuais. Na equação 2, X_{25} corresponde à média dos 25% menores valores de umidade do solo.

3.7 Eficiência de irrigação

Para a determinação dos parâmetros de eficiência de irrigação considerou-se o modelo proposto por Walker (1979). Para a aplicação deste modelo, utilizaram-se as

lâminas coletadas em cada pluviômetro e também as umidades do solo. Com esses dados foram obtidos os parâmetros de eficiência de irrigação.

A lâmina requerida para cada irrigação (Y_r), foi considerada como sendo a lâmina necessária para elevar a umidade atual do solo, determinada antes da irrigação, até à umidade na capacidade de campo, utilizou-se para tanto a equação 3. Para todas as irrigações estudadas, considerou-se a camada de solo (H) igual a 0,40m.

Obteve-se a lâmina média (\bar{Y}), o desvio padrão (s) e o coeficiente de variação (C_v), de cada conjunto de valores de lâminas coletadas. A partir destes valores, foram calculados os valores de Δ^* , Δ , A_D por meio das equações 6, 7 e 8 respectivamente, o que possibilitou a determinação do volume adimensional de déficit pela equação 9, da eficiência de distribuição (E_d) pela equação 10, da eficiência de armazenamento (E_s) pela equação 11, e da porcentagem de água perdida por percolação (P_p), pela equação 12.

3.8 Cultura

A cultivar escolhida para a condução do experimento foi a cultivar IAPAR 57, cultivar que vem sendo desenvolvida desde 1977, originando-se do cruzamento realizado no IAPAR, entre os genótipos: Porrillo Sintético/Aeté 1-38//CENA 83-1/3/IAPAR-BAC 32. Após vários ciclos de seleção obteve-se a linhagem IAPARMD 806 em 1988, testada, aprovada e recomendada para plantio como cultivar IAPAR 57 a partir de 1992, em função de sua alta resistência genética ao Vírus do Mosaico Dourado do Feijoeiro.

Dentre as características da planta, pode-se citar o porte semi-ereto, altura 0,40 a 0,60m, florescimento aos 40 dias, ciclo médio de 87 dias. Quanto aos grãos, pertence ao grupo comercial rajado, com coloração creme, apresentando listras havanas, tipo carioca, e halo laranja.

Em 23 de março 1998 foi implantada a cultura do feijoeiro, na área selecionada para a condução do experimento. Uma semeadora convencional foi regulada para depositar 15 sementes por metro linear, sendo que as mesmas tinham poder germinativo

igual a 96% e conseqüentemente esperava-se 14 plantas viáveis por metro linear, com espaçamento entre linhas de 0,50m, objetivando uma população de 280.000 plantas por hectare.

A adubação de plantio foi realizada baseada em análise química de solo conforme Raij et al.(1996), sendo utilizado 250 kg ha⁻¹ da formulação 4-14-8 de NPK e a de cobertura consistiu na aplicação de 60 kg ha⁻¹ de uréia (45%) divididas em cinco aplicações, realizadas sempre quando o solo se encontrava em condições adequadas de umidade.

3.8.1 Variáveis avaliadas

Para a realização do estudo proposto, as variáveis foram avaliadas nas quatro amostragens em cada cenário nas mesmas épocas e utilizando-se sempre os mesmos critérios, isto é obtendo-se dados em cada quadrícula de 9m². As variáveis avaliadas foram índice de área foliar (IAF), número de vagens por planta (NV), número de grãos por vagem (NG), massa de cem grãos (MC) e rendimento de grãos (RG).

3.8.1.1 Índice de área foliar

A obtenção dos dados referentes à área foliar da cultura foi feita por meio de amostragens em cinco épocas distintas, com intervalos de dez dias entre cada coleta, sendo que as mesmas ocorreram aos trigésimo, quadragésimo, quinquagésimo, sexagésimo e setuagésimo dia após a emergência das plantas. Essas amostragens foram realizadas em todas as quadrículas de 3 x 3m, colhendo-se aleatoriamente duas plantas para a obtenção das áreas foliares e posteriormente do índice de área foliar.

Para estimar a área foliar, utilizou-se o método de disco de folha de área conhecida, conforme recomendado por Magalhães (1979). Utilizando-se um perfurador de folhas de 3,3cm de diâmetro, a fim de relacionar o peso seco da área conhecida do disco com o peso seco de todas as folhas de cada planta. Estes discos de folhas , em

maior número possível e obtidos de várias partes das folhas, foram acondicionados em sacos de papel e levados à estufa de aeração forçada, para secagem até peso constante. O restante das folhas usadas para a retirada dos discos e as não usadas foram acondicionadas em outro saco de papel e levadas à estufa para secagem. Estimou-se a área dessas folhas a partir das relações entre matéria seca dos discos, área total dos discos, (soma das áreas de todos os discos de uma mesma planta) e a matéria seca total das folhas amostradas, (folhas usadas, folhas não usadas e dos discos). Para determinar o IAF, dividiu-se a área foliar da planta pela área de solo disponível à mesma.

3.8.1.2 Número de vagens por planta

Para a obtenção do número de vagens por planta, em um período que antecedeu a colheita, foi obtido a partir da contagem em quatro plantas escolhidas aleatoriamente dentro de cada quadrícula e posteriormente efetuou a média obtendo-se o número de vagens por planta.

3.8.1.3 Número de grãos por vagem

O número de grãos por vagem foi obtido, também para cada quadrícula, utilizando-se todas as vagens das quatro plantas nas quais obteve-se o número de vagem por planta. Posteriormente foi calculada a média dos valores obtidos.

3.8.1.4 Massa de cem grãos

Para a obtenção deste parâmetro foram separados aleatoriamente cem grãos das plantas de cada quadrícula, sendo as mesmas oriundas das quatro plantas das quais obteve-se o número de vagem e também o número de grãos por vagem. Após terem sido separados foram pesados em balança de precisão e padronizando-se as umidades para 13%, obteve-se a massa de cem grãos em gramas.

3.8.1.5 Rendimento de grãos

Iniciando-se em 22 de junho de 1998, as plantas foram colhidas e debulhadas manualmente, tomando-se os devidos cuidados na obtenção de dados referentes a rendimento de grãos. Para tanto colheu-se separadamente cada quadrícula em toda a área experimental e obteve-se a massa de grãos. Após correção da umidade dos grãos para 13%, os dados foram convertidos em kg ha^{-1} .

O objetivo de se obter rendimento de grãos em cada quadrícula nas quatro repetições dos cenários foi para possibilitar a correlação com lâminas coletadas e com umidades de solo em cada quadrícula, analisando o comportamento das variáveis no espaço e das interações entre os seus valores.

3.9 Análise dos dados

Os valores de lâmina de água aplicada, umidade do solo, coeficientes de uniformidade, IAF, e variáveis de produção, foram comparados entre tratamentos (cenários) por meio de análise de variância e teste de comparação de médias, usando o software estatístico SAS (Statistical Analysis System). Com o propósito de avaliar o atendimento às hipóteses assumidas para as distribuições dos dados, foram estimados os parâmetros da estatística descritiva, para todas as variáveis estudadas. O ajuste dos dados à distribuição normal foi avaliado com o uso do teste de Kolmogorov-Smirnov, conforme apresentado por Campos (1983).

Como salientado por Mateos et al. (1997), os coeficientes de uniformidade de distribuição de água geralmente são insuficientes para expressar a influência da desuniformidade da irrigação sobre a produção da cultura, na medida que não consideram a distribuição de água no espaço. Em vista deste fato, foi feita uma análise da distribuição dos dados de lâmina aplicada, de umidade do solo e de rendimento de grãos, no espaço. Para isto foram usadas técnicas de análise exploratória que consistiram

principalmente de um gráfico tipo “box-plot” simplificado, ou seja, onde são apresentados apenas os valores de mediana, máximo e mínimo das distribuições.

A distribuição espacial dos valores das variáveis citadas foi estudada construindo-se os gráficos das estatísticas de ordem: mínimo, máximo e mediana, para os agrupamentos em linhas e em colunas, nos quatro cenários estudados. As linhas compreendem os coletores dispostos paralelamente às linhas laterais de irrigação, enquanto as colunas compreendem os coletores dispostos na direção ortogonal. Este procedimento permitiu a análise do comportamento das variáveis no espaço bem como das inter-relações entre os seus valores.

Os dados de lâmina de irrigação, de umidade do solo após a irrigação e de rendimento de grãos, no cenário 4, no qual a uniformidade de aplicação de água foi a menor, foram usados para a construção de gráficos de superfície de valores, por meio do programa “SURFER” (Keckler, 1995). Estas superfícies foram construídas com o propósito de possibilitar a melhor visualização das distribuições destas variáveis no espaço, bem como das suas inter-relações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Condições climáticas

As condições climáticas reinantes durante os ensaios realizados, válidas para os quatro cenários, foram relativamente estáveis, não sendo possível detectar seus efeitos sobre os coeficientes de uniformidade obtidos. O valor médio da velocidade do vento foi igual a 0,62 m/s, com coeficiente de variação (Cv) de 8,0%. A umidade relativa média foi de 58%, com Cv de 16,4% e a temperatura média foi de 20,6°C, com Cv de 18,6%. Com base nestes valores, pode-se verificar que o vento, fator que mais tende a influenciar o padrão de irrigação, apresentou valores baixos de velocidade, não comprometendo a qualidade da irrigação realizada. Os outros dois fatores, na medida que não variaram muito entre irrigações, tenderam a influenciá-las de modo semelhante. A evaporação, medida em oito coletores dispostos próximos à área experimental, foi nula. Este fato pode ser explicado em função dos horários nos quais foram realizadas as irrigações, ou seja, no amanhecer dos dias, quando a incidência de ventos é menor na região.

Quanto às precipitações ocorridas durante o ciclo da cultura (23/03 a 22/06) totalizaram 208,7mm, sendo considerado um índice alto para a região em tal período. A época e a magnitude das mesmas podem ser vistas na Figura 4.

4.2 Irrigações

Em decorrência do alto índice pluviométrico, somente foram realizadas dezenove irrigações durante todo o ciclo da cultura, somando-se 228mm, das quais foram

utilizadas para análise quinze delas, sendo que após quatro irrigações houveram interferências nos dados decorrentes de chuvas como pode ser observado na Figura 4.

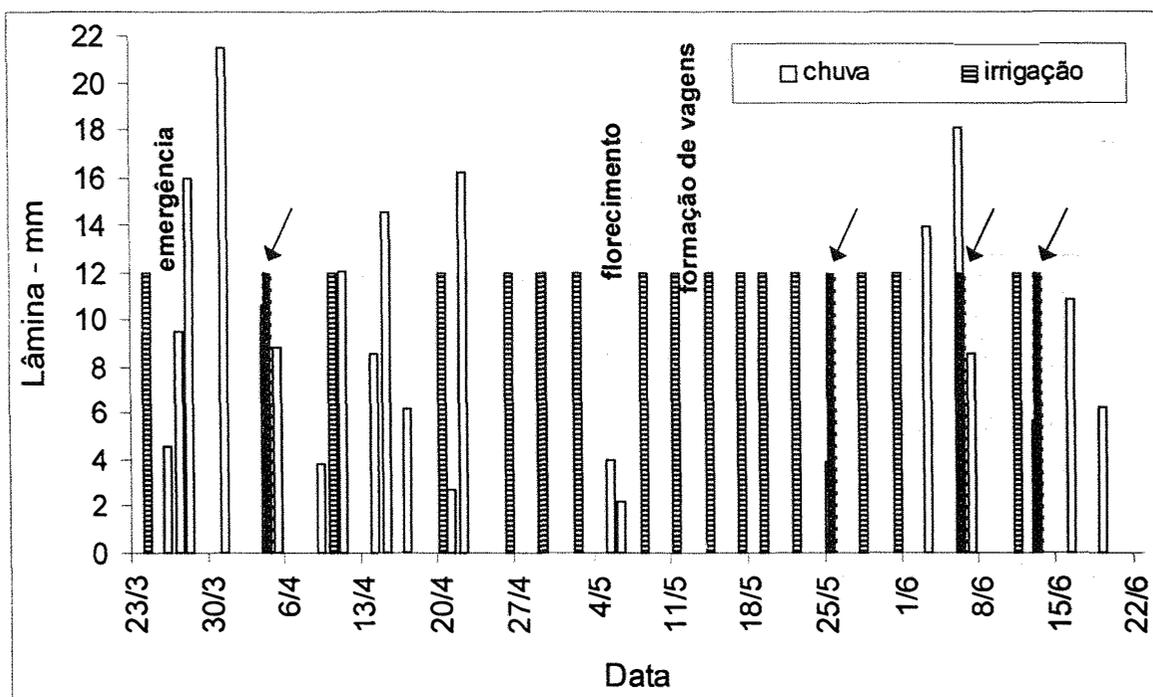


Figura 4 - Lâminas de água aplicadas via irrigação e decorrentes de chuva, durante o ciclo da cultura. As quatro irrigações em destaque, marcadas por uma seta, foram seguidas de chuva.

4.2.1 Estatística das irrigações

As estatísticas descritivas dos 64 resultados de lâminas coletadas em cada uma das 15 irrigações realizadas no cenário 1 estão apresentadas na Tabela 3. Foi mantido constante o tempo de aplicação de água, de forma que a lâmina média fosse a mais uniforme possível, entre irrigações.

Na Tabela 3 pode-se verificar a semelhança entre as irrigações realizadas. Em cada uma delas, a uniformidade de aplicação de água foi elevada, sendo expressa por um Cv entre 5,7 e 8,8%. Os valores de lâmina aplicada podem ser considerados como tendo distribuição normal, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, no nível de 5% de

probabilidade, exceto para a irrigação de número 6. A semelhança entre as estimativas da média e da mediana atesta a simetria das distribuições, permitindo a aplicação de modelos, como o de Walker (1979), que assumem distribuição normal das irrigações realizadas.

Tabela 3 - Estatísticas descritivas para as lâminas coletadas (mm) no cenário 1, média (\bar{X}), mediana (Md), desvio padrão (s), coeficiente de variação (Cv) e d do teste de Kolmogorov-Smirnov (d).

	Irrigações realizadas														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Observações	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64
\bar{X}	12,0	12,3	12,1	12,3	12,2	12,2	12,3	12,2	12,1	11,8	11,7	11,7	11,8	11,9	11,8
Md	12,0	12,3	12,2	12,1	12,0	12,0	12,1	12,2	12,0	11,9	11,8	11,9	11,8	12,0	12,0
s	1,0	1,1	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	0,9	0,8
Cv	8,2	8,8	7,6	7,8	7,5	8,0	8,2	7,9	6,2	6,6	5,7	6,0	7,0	7,6	7,1
d	0,13	0,09	0,07	0,15	0,13	0,19	0,1	0,1	0,15	0,06	0,09	0,13	0,13	0,08	0,14

d crítico a 5% = 0,17, para aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov.

As estatísticas descritivas dos 144 resultados de lâminas coletadas em cada uma das 15 irrigações realizadas no cenário 2 estão apresentadas na Tabela 4. A lâmina média de irrigação de 12,0mm foi mantida aproximadamente constante entre as irrigações, exceto para a irrigação de número nove.

Tabela 4 – Estatísticas descritivas para as lâminas coletadas (mm) no cenário 2, média (\bar{X}), mediana (Md), desvio padrão (s), coeficiente de variação (Cv) e d do teste de Kolmogorov-Smirnov (d).

	Irrigações realizadas														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Observações	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144
\bar{X}	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,1	12,1	12,0	13,4	12,0	12,0	12,1	12,2	12,0	12,0
Md	12,0	11,7	12,0	12,0	11,9	12,0	12,2	11,8	12,7	11,6	11,8	11,8	11,8	11,6	11,7
s	2,2	2,4	2,4	2,1	2,2	2,2	2,3	2,4	3,6	2,4	2,1	2,2	2,3	2,3	2,1
Cv	18,6	20,1	19,6	17,5	18,0	18,0	18,6	20,1	26,9	19,7	17,4	18,1	19,0	19,4	17,3
d	0,06	0,09	0,07	0,12	0,07	0,06	0,06	0,06	0,10	0,13	0,14	0,14	0,19	0,17	0,17

d crítico = 0,13, para aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov.

A semelhança entre as estimativas da média e da mediana atestam a simetria das distribuições. No entanto, o teste de Kolmogorov-Smirnov no nível de 5% de probabilidade mostra que a partir da 11^a irrigação, os dados começam a se afastar da distribuição normal, possivelmente por interferências de vento. De acordo com Warrick & Nielsen (1980), na natureza o ajuste das distribuições teóricas aos dados medidos comumente não é exato, mas apenas aproximado. Em função disto, como salientado por Libardi et al. (1996), do ponto de vista prático, não se deve usar apenas um parâmetro estatístico para caracterizar a distribuição dos dados medidos. O efeito da presença de valores periféricos pode fazer com que diferentes testes de ajuste de distribuição teórica dêem diferentes resultados. É importante considerar que uma distribuição pode ser simétrica o bastante para atender à hipótese de normalidade de alguns modelos, como o de Walker (1979), e apresentar um valor de d calculado para o teste de Kolmogorov-Smirnov maior que o d crítico. Os coeficientes de variação mostram uma maior variabilidade entre lâminas aplicadas no cenário 2, em relação ao cenário 1, em função do maior espaçamento entre aspersores (18 x 18m).

As estatísticas descritivas dos 192 resultados de lâminas coletada em cada uma das 15 irrigações realizadas no cenário 3 estão apresentadas na Tabela 5. A lâmina média aplicada permaneceu próxima aos 12,0mm previamente adotados. A semelhança entre valores de média e mediana atesta a simetria das distribuições de lâmina de água, o que é confirmado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, para $\alpha = 5\%$, nas 15 irrigações. O espaçamento de 18 x 24m, adotado no cenário 3, faz com que alguns pontos da superfície do solo, entre quatro aspersores, não recebam água. Estes valores nulos de lâmina contribuem para os altos valores de C_v obtidos, da ordem de 45%. Assim como nos outros cenários, a uniformidade entre as irrigações é elevada.

As estatísticas descritivas dos 256 resultados de lâmina coletadas em cada uma das 15 irrigações realizadas no cenário 4 estão apresentadas na Tabela 6. A lâmina média aplicada de 12,0mm foi mantida aproximadamente constante entre as irrigações. O espaçamento de 24 x 24m, adotado no cenário 4 faz com que vários pontos da superfície do solo, entre quatro aspersores, não recebam água.

Os valores nulos de lâmina obtidos nas posições centrais das quadrículas entre aspersores fazem com que os valores de média, mais sensíveis a valores extremos que a mediana, sejam menores que os desta. A grande variação de valores de lâmina promove o alto valor de Cv, da ordem de 53%, obtido para cada irrigação. A uniformidade entre irrigações, como em todos os cenários, é elevada. A presença de vários valores próximos de zero nas distribuições de lâmina coletada fazem com que elas se afastem da normalidade, como verificado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, para $\alpha = 5\%$.

Tabela 5 – Estatísticas descritivas para as lâminas coletadas (mm) no cenário 3, média (\bar{X}), mediana (Md), desvio padrão (s), coeficiente de variação (Cv) e d do teste de Kolmogorov-Smirnov (d).

	Irrigações realizadas														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Observações	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192
\bar{X}	11,9	11,8	11,8	12,5	12,3	12,7	12,1	12,0	12,0	11,5	11,5	11,6	12,1	11,8	12,0
Md	11,7	11,7	11,7	12,4	12,0	12,2	11,9	11,9	11,6	10,7	10,9	11,1	11,8	11,6	11,7
s	5,2	5,3	5,2	5,4	5,5	5,6	5,7	5,7	5,8	5,0	5,0	5,0	5,4	5,3	5,3
Cv	44,1	44,9	44,2	43,1	44,5	44,4	47,4	48,0	47,8	43,0	43,9	43,0	44,3	44,4	43,9
d	0,07	0,07	0,09	0,07	0,06	0,06	0,07	0,08	0,07	0,07	0,06	0,08	0,06	0,07	0,06

d crítico = 0,10 para aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 6 – Estatísticas descritivas para as lâminas coletadas (mm) no cenário 4, média (\bar{X}), mediana (Md), desvio padrão (s), coeficiente de variação (Cv) e d do teste de Kolmogorov-Smirnov (d).

	Irrigações realizadas														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Observações	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256
\bar{X}	11,4	11,5	11,6	11,8	11,6	11,5	12,1	12,5	12,2	11,9	12,2	12,6	12,9	12,1	13,4
Md	12,1	12,7	12,6	12,7	12,5	12,5	13,7	13,7	13,7	13,7	13,9	14,0	14,0	13,2	14,7
s	6,1	6,1	6,2	6,3	6,2	6,2	6,5	6,7	6,5	6,3	6,4	6,6	6,7	6,4	7,1
Cv	53,2	53,1	53,0	54,0	53,8	53,9	53,3	53,8	53,4	52,8	52,6	52,5	51,7	53,2	52,6
d	0,12	0,12	0,13	0,12	0,11	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,13	0,12	0,10	0,11	0,11

d crítico = 0,08, para aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov.

4.2.2 Eficiência das irrigações

Constatou-se que a distribuição dos valores de lâmina de água aplicada pelo sistema, nos quatro cenários, é descrita com razoável aproximação pela distribuição normal. Adotando essa distribuição, são válidas as equações apresentadas por Walker (1979) para o cálculo dos parâmetros que descrevem a irrigação.

Os valores de lâmina média (\bar{Y}), lâmina requerida (Y_r) e os parâmetros para avaliação de irrigação proposto por Walker (1979), são apresentados na Tabela 7 para os quatro cenários.

Tabela 7 - Lâmina média (\bar{Y}) e Lâmina requerida (Y_r), Área deficientemente irrigada (AD), Volume de déficit (VD), Eficiência de distribuição (Ed), Eficiência de armazenamento (Es) e Perda por percolação (Pp).

Parâmetros	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
\bar{Y} (mm)	12,1	12,1	12,0	11,9
Y_r (mm)	12,0	12,1	11,2	11,2
AD (%)	39,6	49,8	50,7	54,5
VD	0,02	0,07	0,17	0,22
Ed (%)	88,9	92,0	83,6	79,8
Es (%)	97,7	92,9	83,3	78,8
Pp (%)	11,0	7,9	16,4	20,2

O valor de lâmina média coletada permaneceu praticamente constante entre cenários, da ordem de 12mm. As irrigações, em média, atenderam à necessidade de reposição de água ao solo, uma vez que a lâmina de água requerida assumiu valores médios praticamente iguais à lâmina média coletada nos cenários 1 e 2 e, nos cenários 3 e 4, assumiu valores ligeiramente inferiores.

Observa-se na Tabela 7 que as áreas deficientemente irrigadas (AD) crescem do cenário 1 para o cenário 4, acontecendo o mesmo com os volumes de déficit (VD), isto é, conforme aumenta o espaçamento entre aspersores e diminui a uniformidade de distribuição de água, crescem as áreas deficientemente irrigadas e também os volumes

de déficit. Como as distribuições de lâmina são aproximadamente normais e os valores de lâmina aplicada e lâmina requerida são muito semelhantes, AD assume valor próximo a 50%, conforme esperado, para os cenários 2, 3 e 4. No cenário 1, a uniformidade muito elevada está associada a uma grande concentração dos valores em torno da média. Naturalmente, de acordo com o modelo adotado (Walker, 1979), como as lâminas coletada e requerida são praticamente iguais, esta forte concentração em torno da média tende a reduzir a área irrigada com déficit, como realmente ocorre (Tabela 7). Por outro lado, no cenário 4, embora a lâmina média coletada seja um pouco maior que a média requerida, a área irrigada com déficit é ligeiramente maior que 50%. Isto ocorre em função dos valores nulos de lâmina coletada, existentes para este maior espaçamento.

Os valores de eficiência de distribuição (E_d) são maiores no cenário 2 que no cenário 1. Para os cenários 3 e 4, observa-se uma maior redução de valores. No cenário 1 a área irrigada com excesso é a maior dentre os quatro cenários, fixados os valores iguais de lâmina requerida e lâmina coletada. Desta forma, a perda de água por percolação (P_p) foi maior neste cenário que no cenário 2, reduzindo o valor da E_d entre estes cenários. A perda por percolação foi maior nos cenários 3 e 4, embora a área irrigada com excesso tenha sido menor nestes dois. Este fato decorre da elevada desuniformidade das irrigações nestes cenários, expressa por valores de C_v médios de 45 e 53% (Tabelas 5 e 6). Em função das maiores perdas por percolação, a E_d foi reduzida para o cenário 3 e, principalmente, para o cenário 4.

O parâmetro de performance eficiência de armazenamento (E_s), na medida que não considera as perdas por percolação, é inversamente proporcional à área irrigada com déficit. Na Tabela 7 pode-se verificar que esta relação ocorre entre os quatro cenários. O cenário 1, apresentando menor AD, apresentou maior E_s . No cenário 4, a situação se inverte.

A lâmina aplicada em cada irrigação foi a mesma para os quatro cenários. Desta forma, a intensidade de aplicação foi alta no cenário 1, o que correspondeu a menos tempo de irrigação. Esta alta intensidade de aplicação promoveu maiores perdas de água, reduzindo a eficiência de distribuição em relação ao cenário 2. As perdas por percolação neste cenário foram maiores que no cenário 2, como pode ser observado na Tabela 7.

Isto se explica pelo fato de que a uniformidade elevada do cenário 1 está associada a uma grande concentração de valores de lâmina próximo da média. Desta forma, quando a lâmina média aplicada supera a lâmina requerida, um percentual muito elevado da área recebe mais água do que a capacidade de armazenamento do solo, gerando perdas por percolação e redução da eficiência de distribuição (Tabela 7).

4.3 Umidade do solo antes e após as irrigações

A umidade foi medida antes e depois de cada irrigação, em cada cenário. A média dos 15 valores medidos em cada ponto de amostragem foi obtida e as estatísticas descritivas para os mesmos, antes e depois das irrigações, são apresentadas na Tabela 8.

A redistribuição da água no solo, durante as 24 horas após cada irrigação, promove a uniformidade da umidade, dentro da área irrigada. Os valores de Cv para umidade são expressivamente menores que os de lâmina, evidenciando a uniformização que a redistribuição de água promove, como pode ser observado comparando-se os valores de Cv para umidade e para irrigações. No cenário 4 esta uniformização da umidade após a irrigação também ocorre mas o valor de Cv correspondente permanece elevado (25,8%), em decorrência da maior desuniformidade da irrigação neste cenário.

Tabela 8 – Estatísticas descritivas para umidade média do solo (%), base massa, antes e após as irrigações, média (\bar{X}), mediana (Md), desvio padrão (s), coeficiente de variação (Cv) e d do teste de Kolmogorov-Smirnov (d).

	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4	
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após
Observações	64	64	144	144	192	192	256	256
\bar{X}	36,3	41,2	36,1	41,3	36,4	41,0	36,0	39,7
Md	36,8	41,3	36,4	41,3	36,6	41,2	36,3	43,8
s	1,5	0,6	1,8	1,3	1,9	1,9	2,1	10,2
Cv	4,0	1,5	4,9	3,1	5,3	4,7	5,9	25,8
d	0,22	0,08	0,16	0,06	0,09	0,09	0,09	0,19
d crítico(*)	0,17	0,17	0,11	0,11	0,10	0,10	0,08	0,08

(*) Aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov.

Os valores médios de umidade do solo antes das irrigações são semelhantes para os quatro cenários entre si. Comportamento semelhante é observado para umidade média 24 horas após as irrigações. No cenário 1, a uniformidade da irrigação é muito elevada. Isto faz com que a umidade do solo após as irrigações apresente coeficiente de variação de apenas 1,5%, com distribuição normal dos valores, segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov, a nível de 5%. Entre duas irrigações consecutivas, o processo de retirada de água do solo contribui para a redução da uniformidade da umidade, o que é evidenciado pelo C_v igual a 4,0%, na Tabela 8. Os valores de umidade antes das irrigações não apresentaram distribuição normal, em função da forte concentração dos valores em torno da média. Comportamento semelhante ocorre no cenário 2, nos outros cenários as distribuições se aproximam da normalidade.

Na medida que o espaçamento entre aspersores cresce, os valores de C_v para umidade após as irrigações crescem. Os valores de C_v para umidade antes das irrigações também crescem na medida que se aumenta o espaçamento entre aspersores. Este crescimento, no entanto, é menos acentuado que o observado para umidades após as irrigações, mostrando que a redistribuição e o consumo diferenciado de água tendem a uniformizar a umidade do solo, entre irrigações consecutivas.

No cenário 4, a elevada desuniformidade da irrigação promove a desuniformidade da umidade do solo após a mesma, expressa por valor de C_v igual a 25,8%, na Tabela 8. A redistribuição de água no solo nas primeiras 24 horas após a irrigação não é suficiente para uniformizar a umidade do solo, como ocorre nos outros cenários. Durante o período entre irrigações neste cenário, no entanto, a redistribuição e o consumo diferenciado promovem substancial aumento da uniformidade da umidade, dando origem a C_v de 5,9% para umidade antes das irrigações (Tabela 8). Além disto, a distribuição da umidade antes da irrigação, aproxima-se da normalidade, enquanto após a irrigação, em função dos valores nulos de lâmina aplicada em boa parte da área, a distribuição se afasta da normal.

Para os quatro cenários, o valor de C_v de umidade antes da irrigação fica entre 4,0 e 5,9, o que está relacionado com a variabilidade espacial intrínseca ao solo. No cenário 1, a alta uniformidade expressa por C_v de 1,5% após a irrigação, foi reduzida

entre irrigações. Por outro lado, no cenário 4, a baixa uniformidade expressa por Cv de 25,8% após a irrigação, foi modificada no período entre irrigações, uma vez que a umidade neste período se tornou mais uniforme, o que foi expresso pelo Cv de 5,9%.

4.4 Coeficientes de uniformidade

Para descrever a uniformidade de irrigação e da umidade, foram usados os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), comumente usados em irrigação.

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios, para 15 irrigações, dos coeficientes de uniformidade determinados acima (lâmina) e abaixo (umidade antes e depois de cada irrigação) da superfície do solo, para os quatro cenários. Nesta tabela, pode-se observar que a variação dos coeficientes de uniformidade de Christiansen para lâminas (CUC_L), entre as irrigações, é pequena, em todos os cenários, o que é expresso por valores de coeficientes de variação (Cv) inferiores a 2%. Isto mais uma vez mostra que o padrão de aplicação de água pouco se alterou com o passar do tempo, induzindo a comportamento semelhante da umidade do solo.

Tabela 9 – Valores médios dos coeficientes de uniformidade determinados para lâmina (CUC_L , CUD_L) e para umidade do solo antes (CUC_{UA} , CUD_{UA}) e depois da irrigação (CUC_{UD} , CUD_{UD}), média (\bar{X}), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (Cv) para os quatro cenários.

Coef.	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3			Cenário 4		
	\bar{X}	s	Cv									
CUC_L	94,1a	0,69	0,7	85,6b	1,39	1,6	65,6c	1,15	1,8	57,9d	0,53	0,9
CUC_{UA}	96,5a	0,49	0,5	96,0b	0,53	0,6	95,8c	0,68	0,7	96,2b	0,60	0,6
CUC_{UD}	96,7a	0,49	0,5	92,4b	0,65	0,7	85,3c	0,77	0,9	75,6d	0,74	0,6
CUD_L	91,0a	1,10	1,2	78,7b	2,18	2,8	46,2c	1,82	3,9	23,6d	0,70	3,0
CUD_{UA}	94,6a	0,34	0,4	92,9c	0,60	0,6	93,3b	0,49	0,5	92,6c	0,68	0,7
CUD_{UD}	94,7a	0,81	0,9	87,9b	1,09	1,2	75,0c	1,19	1,6	60,0d	0,42	0,7

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey, a nível de 5%.

Os valores médios do coeficiente de uniformidade de Christiansen, obtidos para os dados de lâmina aplicada (CUC_L), para os cenários 1 e 2, são superiores ao valor mínimo aceitável citado em literatura (80%), para o desempenho normal do sistema de aspersão. O mesmo não ocorre para os cenários 3 e 4, cujos valores de CUC_L são inferiores ao valor aceitável. Os valores médios de CUC_L diminuem com o aumento do espaçamento entre aspersores, sendo as diferenças entre cenários significativas pelo teste de Tukey, para $\alpha=5\%$. Estes coeficientes confirmam as diferentes qualidades das irrigações, estabelecidas entre cenários.

Os valores médios do coeficiente de uniformidade de distribuição, obtidos para os dados de lâmina aplicada (CUD_L), diminuíram com o aumento do espaçamento entre aspersores. As diferenças entre os valores médios correspondentes aos cenários foram significativas pelo teste de Tukey, no nível de 5%. Para o cenário 1, os valores de CUC_L e CUD_L , pouco diferem entre si, uma vez que a irrigação é realizada com alta uniformidade de lâmina aplicada. Para os demais cenários, a diferença entre os coeficientes cresce, evidenciando a desuniformidade da irrigação, bem como a maior sensibilidade do CUD_L aos menores valores. Assim como para CUC_L , os valores de Cv obtidos entre irrigações para o CUD_L evidenciam a semelhança entre as 15 irrigações realizadas.

De acordo com a Tabela 9, todos os valores dos dois coeficientes de uniformidade determinados para umidade do solo, após a aplicação de água e antes da irrigação seguinte, foram superiores aos determinados para lâmina aplicada. Este fato está relacionado com a redistribuição de água no solo e com o consumo diferenciado de água, isto é, a planta que está situada em local que não recebe água consumirá menos que aquela que está próxima ao aspersor, onde a quantidade de água aplicada é maior. A redistribuição, ou seja, a tendência da água se movimentar de regiões mais úmidas para aquelas de menor umidade promove, após certo tempo, maior uniformidade da umidade, em relação à lâmina de água aplicada.

Também para os valores dos coeficientes calculados para as umidades após as irrigações, as diferenças entre cenários são estatisticamente significativas no nível de 5%, para os dois coeficientes adotados. O CUD_{UD} apresenta valores inferiores àqueles

obtidos para CUC_{UD} , evidenciando mais uma vez a maior sensibilidade do primeiro aos valores extremos inferiores. Nota-se que a variação em cada cenário, após as irrigações, foi pequena. Para o CUC_{UD} o coeficiente de variação inferior a 0,9% e para o CUD_{UD} , inferior a 1,6%.

Os valores de CUC e de CUD calculados para umidade do solo antes da irrigação (CUC_{UA} e CUD_{UA}) apresentam pequena variação entre cenários. Suas variações em cada cenário foram pequenas, o que é expresso por valores de coeficientes de variação (C_v) inferiores a 0,7%. Na Tabela 9 pode-se verificar que as diferenças de valores médios do CUC_{UA} entre os cenários 2 e 4 não são significativas mas diferem do cenário 3, o qual também difere do cenário 1. As mesmas variações podem ser verificadas para CUD_{UA} .

Com o propósito de tornar melhor a visualização do comportamento das variáveis apresentadas, entre os cenários, foram traçadas as linhas pontilhadas mostradas na Figura 5. Nessa Figura, pode-se observar que estes dois coeficientes (CUC_{UA} e CUD_{UA}) assumem valores elevados, acima de 92% em todos os casos. Embora estatisticamente significativas, as diferenças entre cenários não são importantes em termos práticos. Este fato mostra que a ação conjunta de dois fatores, a redistribuição e o consumo diferenciado de água pelas plantas, conduz à alta uniformidade da umidade do solo, ao longo do tempo, entre duas irrigações sucessivas. Mesmo neste caso, os valores de CUD_{UD} são ainda ligeiramente inferiores aos de CUC_{UD} , como esperado (Figura 5). A diferença entre eles para os quatro cenários, no entanto, é pequena, evidenciando que as regiões que recebem pouca ou nenhuma água via irrigação, devem receber o aporte de uma certa quantidade de água via redistribuição, de forma a uniformizar a umidade em toda a área.

A Figura 5, permite verificar que os valores de CUD são sempre menores que os de CUC. Os dois coeficientes calculados a partir dos dados de lâmina são menores que os calculados com os dados de umidade 24 horas após a irrigação. A umidade do solo apresenta uniformidade, expressa pelos dois coeficientes, maior que a uniformidade da lâmina aplicada e a diferença de valores entre os dois coeficientes diminui. Durante o intervalo entre irrigações, a uniformidade da umidade do solo cresce, atingindo níveis elevados, expressos pelos dois coeficientes. A diferença entre ambos diminui,

evidenciando a ação dos dois fatores: redistribuição e consumo diferenciado de água. A irregularidade na aplicação de água, embora suavizada no perfil do solo, promove irregularidade na umidade abaixo da superfície, a qual tende a se reduzir com o passar do tempo.

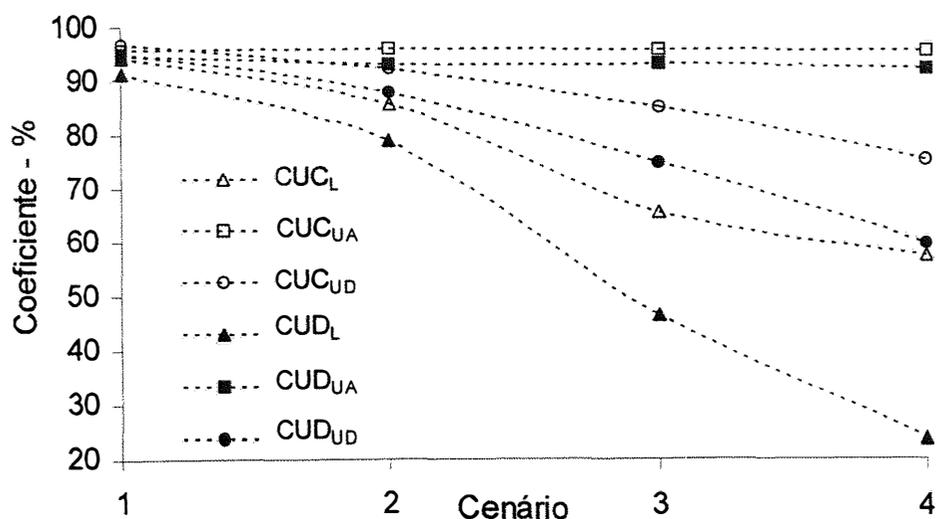


Figura 5 – Valores dos coeficientes para lâminas e umidades.

4.5 Variáveis de produção

As estatísticas descritivas para os resultados das variáveis de produção, rendimento de grãos (RG), número de vagens por planta (NV), número de grãos por vagem (NG) e massa de cem grãos (MC), são mostradas na Tabela 10, para os quatro cenários.

O rendimento de grãos da cultura foi influenciado pela qualidade da irrigação realizada. Os diferentes cenários deram origem a produções que diferem entre si, conforme apresentado na Tabela 10. A maior produtividade, no entanto, foi obtida no cenário 2, correspondente ao espaçamento de 18 x 18m. Neste cenário, as irrigações foram caracterizadas por valor de eficiência de distribuição maior que para os demais cenários (Tabela 7). A maior produtividade deve estar, pelo menos em parte, associada ao uso mais eficiente da água aplicada. A produtividade obtida no cenário com maior

uniformidade (cenário 1) foi maior que a obtida no cenário 4 apenas, demonstrando que a maior uniformidade não implicou em máxima produtividade. Considerando ainda o fato de que uniformidade elevada está associada a maior custo do sistema de irrigação, fica caracterizada a importância de se identificar um nível de uniformidade adequada para as condições nas quais se faz a irrigação.

Tabela 10 – Estatísticas descritivas para as variáveis de produção: rendimento de grãos (RG), número de vagens por planta (NV), número de grãos por vagem (NG) e massa de cem grãos (MC).

Variáveis	Estatística descritiva									
	N	Média	Mediana	Min.	Máx.	s	Cv	d	d*	
RGc1		2333,2	c	2249,9	1503,6	3520,0	429,4	18,4	0,13	
NVc1		9,2	b	9,3	6,3	12,5	1,8	19,3	0,09	
NGc1	64	5,8	b	5,8	4,3	7,2	0,6	10,0	0,09	0,17
MCc1		21,6	b	22,0	19,3	22,9	1,2	5,5	0,18	
RGc2		2759,1	a	2877,9	1520,0	3521,0	558,9	20,3	0,13	
NVc2		10,0	a	9,0	5,8	15,3	2,2	21,9	0,18	
NGc2	144	6,1	a	6,2	4,6	7,6	0,5	8,9	0,08	0,13
MCc2		22,2	a	22,4	19,4	23,9	1,1	4,8	0,09	
RGc3		2422,8	b	2415,6	1503,6	3655,4	525,0	21,7	0,08	
NVc3		9,6	a b	9,3	5,8	15,3	2,0	20,8	0,12	
NGc3	192	5,6	b	5,8	3,0	7,2	0,8	14,8	0,16	0,10
MCc3		21,8	b	22,1	16,0	23,9	1,9	8,6	0,2	
RGc4		1501,5	d	1466,8	835,4	2315,6	306,7	20,4	0,12	
NVc4		7,9	c	7,8	2,0	13,0	2,1	26,0	0,11	
NGc4	256	4,6	c	4,6	2,0	5,8	0,7	16,3	0,18	0,08
MCc4		20,1	c	20,5	15,2	22,5	1,4	7,1	0,15	

Médias de cada variável seguidas de letras diferentes, não são iguais pelo teste de Tukey para $\alpha = 5\%$, $d^* = d$ crítico pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, para $\alpha = 5\%$.

Nas condições estudadas, alta uniformidade de irrigação não conduziu a uma maior produtividade da cultura. O cenário 4 deu origem à menor produtividade (RGc4), o que está associado ao fato de que, neste espaçamento 24 x 24m, ficam áreas

relativamente grandes sem irrigar, na região central de cada quadrícula entre quatro aspersores, promovendo redução da produtividade.

O número de vagens por planta seguiu o mesmo comportamento da variável rendimento de grãos. O maior valor foi obtido no cenário 2 e o valor obtido no cenário 1 foi maior que o do cenário 4 apenas. Para esta variável no entanto, o cenário 3 deu origem a um valor que não difere estatisticamente daqueles obtidos para os cenários 1 e 2, expressando a menor sensibilidade desta variável às diferentes condições de irrigação adotadas.

O número de grãos por vagem apresentou comportamento semelhante ao das outras variáveis. O maior valor foi obtido para o cenário 2 (NGc2) e o menor para o cenário 4 (NGc4). Os cenários 1 e 3 deram origem a valores que não diferiram estatisticamente entre si. O mesmo ocorreu com a massa de cem grãos, mostrando que a irrigação mais favorável à cultura não foi aquela realizada com maior uniformidade mas aquela referente ao espaçamento de 12 x 18m, a qual pode ser caracterizada como de alta uniformidade, segundo os critérios usuais (CUC = 85,6% para lâmina aplicada), e de alta eficiência (Ed = 92%).

Naturalmente, o maior espaçamento (24 x 24m), na medida que deu origem a áreas relativamente grandes sem irrigação, promoveu os piores resultados, uma vez que nestas áreas a cultura sofreu os efeitos do déficit hídrico. A redistribuição de água no solo não foi suficiente para compensar as irregularidades de aplicação de água.

O rendimento médio de grãos no cenário 2 (RGc2) foi de 2759 kg ha⁻¹, um valor que pode ser considerado elevado, mesmo em condições de irrigação, para a latitude em questão, (Fancelli & Dourado-Neto, 1997). Para o cenário 3 e o cenário 1, os rendimentos médios foram de 2423 e 2333 kg ha⁻¹, respectivamente, revelando também alta produtividade. Para o cenário 4, o rendimento médio de 1500 kg ha⁻¹ revela a redução de produtividade associada à redução da uniformidade da irrigação, embora a lâmina média tenha sido constante entre cenários. Isto torna o espaçamento referente ao cenário 3 uma condição conveniente, uma vez que uma substancial redução de equipamento necessário promoveu pequena redução de produtividade.

Como se observa na Tabela 10, embora o rendimento de grãos tenha variado entre os cenários, principalmente entre o cenário 4 e os demais, o coeficiente de variação (Cv) para essa variável pouco se modificou, apresentando valores praticamente iguais entre o cenário 4, de menor produtividade e o cenário 2, de maior produtividade. Isto revela dispersão semelhante em torno do valor médio em ambos os casos, mostrando que a redução do valor da variável foi uniforme em toda a área irrigada.

4.6 Índice de área foliar

Para avaliar o efeito das diferentes irrigações sobre o desenvolvimento vegetativo da cultura, o índice de área foliar (IAF) foi medido em cinco épocas durante o ciclo da cultura. Observou-se uma interação significativa entre cenários e épocas, indicando que o comportamento das plantas nos quatro cenários depende da época. Na Tabela 11 estão apresentados os valores médios de índice de área foliar para as cinco épocas.

Tabela 11 – Valores médios de índice de área foliar para cinco épocas, caracterizadas pelo número de dias após a emergência (DAE).

Cenários	Épocas				
	30 DAE	40 DAE	50 DAE	60 DAE	70 DAE
1	0,90 a	1,68 a	2,42 a	2,88 a	3,24 a
2	0,79 b	1,51 b	2,23 b	2,69 b	3,06 b
3	0,63 b	1,32 c	2,06 c	2,46 c	2,87 c
4	0,45 c	0,84 d	1,37 d	1,90 d	2,27 d

Dentro das épocas, médias seguidas de letras diferentes não são iguais pelo teste de Tukey para $\alpha = 1\%$.

A variação dos valores de IAF em relação aos cenários foi a mesma durante todo o ciclo da cultura, como pode ser observado na Tabela 11. Dentro de cada época, exceto para 30 dias, todas as médias diferem entre si pelo teste de Tukey com $\alpha = 1\%$. O aumento dos espaçamentos entre aspersores e, conseqüentemente diminuição de

uniformidade da irrigação promoveu redução dos valores de IAF. Ao contrário das variáveis usadas para quantificar a produção da cultura, o IAF é máximo para a máxima uniformidade. Estes resultados mostram que a irrigação ótima para o desenvolvimento vegetativo não corresponde ao ótimo para a produção. Este fato pode ser em parte explicado devido ao valor do IAF da cultura na época de florescimento. Autores como Alvim (1969); Kûet & Marshall (1971); Yoshida (1972); Alvim & Postes (1996), afirmam que o IAF reflete a capacidade produtiva de uma comunidade vegetal, sendo que esse índice influencia na competição por luz. Também conforme Brougham (1958), o aumento de produção ocorre até um certo valor de IAF, denominado de valor “crítico”, após o qual se houver aumento de produção é insignificante.

Quando o espaçamento entre aspersores muda de 12 x 12m para 18 x 18m, a quantidade de equipamento necessário reduz substancialmente, enquanto a uniformidade de irrigação, embora decresça, ainda permanece adequada ($CUC_L > 80\%$). A redistribuição de água no solo promove alta uniformidade de umidade ($CUC_{UD} > 90\%$), gerando um ambiente propício à cultura. Embora o IAF seja menor para o maior espaçamento entre aspersores, todas as variáveis de produção atingem o máximo nesta condição.

4.7 Análise dos dados no espaço

O valor médio de rendimento de grãos no cenário 2 foi o maior para os quatro cenários. Para o cenário 4 foi o menor, no entanto, a dispersão em torno do valor médio foi semelhante para ambos. Uma vez que a lâmina média aplicada foi igual entre os cenários, diferindo apenas a uniformidade da irrigação entre eles, é conveniente avaliar a distribuição espacial dos valores de lâmina de irrigação, umidade do solo após a irrigação e rendimento de grãos, nos quatro cenários, para verificar as relações entre estas variáveis.

A distribuição espacial dos valores de lâmina coletada, de umidade e de rendimento de grãos da cultura do feijoeiro foi analisada por meio de técnicas da análise exploratória de dados distribuídos no espaço. Em cada cenário, foram tomados os

valores de mediana, máximo e mínimo para os dados agrupados em colunas e em linhas, os quais são apresentados nos gráficos das Figuras 6, 7 e 8.

4.7.1 Lâminas de irrigação

A distribuição espacial dos valores de lâmina coletada, nos quatro cenários, pode ser avaliada observando-se os gráficos apresentados na Figura 6. No cenário 1, a alta uniformidade de aplicação de água fica evidenciada pela semelhança entre as medianas de todas as colunas e linhas e pela pequena dispersão em torno deste parâmetro, para todos os agrupamentos de dados (linhas e colunas), caracterizada por coeficientes de variação entre 1,0 e 6,7%.

Para o cenário 2, o espaçamento quadrado entre aspersores de 18 x 18m fez com que as distribuições dos dados agrupados em colunas e em linhas fossem semelhantes. A pequena variação dos valores de mediana em torno do valor médio de 11,9mm, para todos os agrupamentos, pode ser visualizada na Figura 6. Em cada agrupamento, os valores de C_v são maiores que para o cenário 1, e variam mais entre agrupamentos, assumindo valores entre 4,2 e 25,1%. Observa-se uma pequena tendência de concentração de valores mais elevados de mediana na região central entre aspersores. As distribuições dos dados nas linhas tendem a ser mais assimétricas que nas colunas, o que provavelmente está associado, em parte, ao efeito do vento.

Mesmo que o efeito do vento não tenha sido suficiente para influenciar nos valores dos coeficientes de uniformidade de distribuição de água, afetou as distribuições estatísticas dos valores.

Embora os C_v revelem maiores dispersões, em relação ao cenário 1, os valores máximos pouco superam 15mm e os valores mínimos atingem valores pouco abaixo de 10mm, revelando alta uniformidade da irrigação no cenário 2, como discutido anteriormente.

No cenário 3, com o espaçamento retangular entre aspersores de 18 x 24m, a dispersão dos valores de mediana em torno do valor médio igual a 11,7mm, nas colunas,

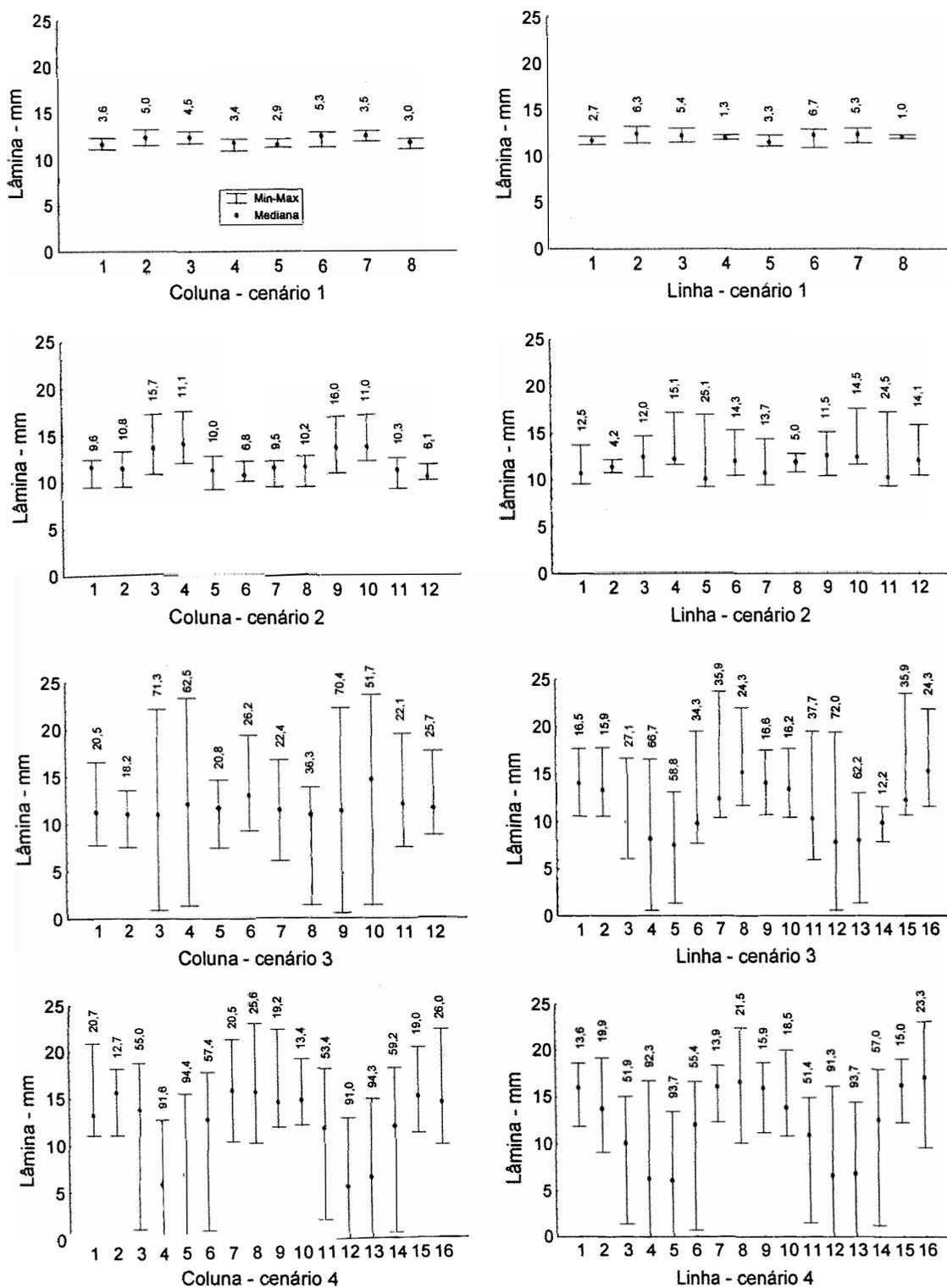


Figura 6 – Valores mínimo, máximo, mediana e de coeficiente de variação para dados de lâmina coletada, nas colunas e nas linhas, para os cenários 1,2,3 e 4.

é pequena, semelhante ao que ocorre para o cenário 2. Os Cv no entanto, assumem valores bem mais elevados, da ordem de até 71,3%, evidenciando a maior irregularidade das lâminas no espaço. Neste cenário 3, a distribuição das medianas dos agrupamentos em linhas assume tendência semelhante a do cenário 4. Em função do espaçamento de 24m, grande para o aspersor utilizado, cujo diâmetro molhado foi de 25m (Tabela 2), os valores de mediana são consideravelmente menores na região central entre aspersores e maiores próximo aos mesmo.

No cenário 3 e, principalmente, no 4, os valores mínimos de lâmina coletada tendem a zero, na região central da área irrigada por quatro aspersores. Para se obter uma lâmina média aproximadamente constante em cada cenário, da ordem de 12mm, é necessário que o tempo de irrigação cresça com o espaçamento entre aspersores. Isto faz com que os valores máximos nos agrupamentos cresça, atingindo valores acima de 20mm. Os Cv dos agrupamentos em linhas no cenário 3 e para linhas e colunas no cenário 4 apresentam efeito inversamente proporcional à mediana, ou seja, quanto menor a mediana, maior o coeficiente de variação. Para o cenário 4, os valores de Cv acima de 90%, revelam as áreas sem irrigação, nas regiões centrais das áreas irrigadas por quatro aspersores.

4.7.2 Umidade do solo

Na Figura 7 são mostradas as distribuições espaciais dos valores de umidade do solo após as irrigações, agrupadas em colunas e linhas, nos quatro cenários. A alta uniformidade de irrigação é expressa por uma uniformidade ainda mais elevada dos valores de umidade no cenário 1. A pequena dispersão dos valores de mediana em torno do valor médio pode ser visualizada na Figura 7. A dispersão dos valores em torno da mediana, em cada agrupamento, está associada a Cv entre 0,7% e 2,1%, evidenciando elevada uniformidade, maior que a identificada para lâmina de irrigação (Figura 6), o que está associada à redistribuição da água no solo. Neste cenário, o solo tem uniformidade de umidade próxima da absoluta, na região irrigada, estando a planta se desenvolvendo em condições de umidade elevada.

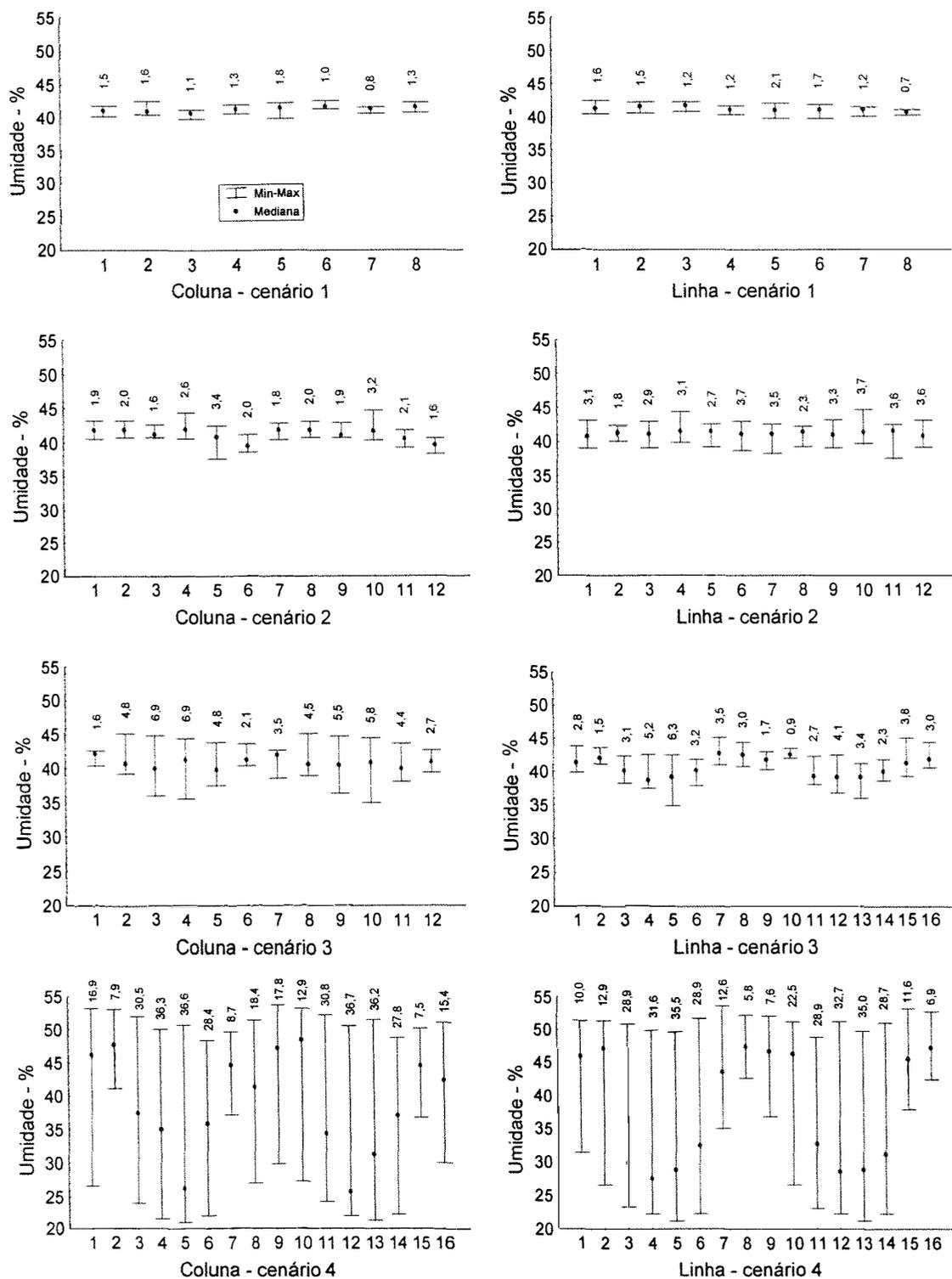


Figura 7–Valores mínimo, máximo, mediana e de coeficiente de variação para dados de umidade do solo após as irrigações, nas colunas e nas linhas, para os cenários 1,2,3 e 4.

No cenário 2, a redistribuição da água no solo é ainda mais evidente, contribuindo para uma uniformidade da umidade expressa por valores de C_v entre 1,6 e 3,7%, para os agrupamentos em colunas e em linhas. Os valores de mediana pouco variam em torno do valor médio, da ordem de 41,3%. Comparando-se os gráficos das Figuras 6 e 7 para este cenário, constata-se que a redistribuição de água no solo reduz substancialmente a dispersão em torno da mediana, reduzindo a amplitude de variação dos dados de umidade em relação aos de lâmina de irrigação.

No cenário 3, os agrupamentos em colunas apresentam valores de mediana que variam pouco em torno do valor médio, da ordem de 41,2%, de modo semelhante ao que ocorreu para lâminas. Nos agrupamentos em linha, com os aspersores espaçados de 24m, pode-se verificar que, assim como o ocorrido para lâminas, os valores de mediana são menores na região entre aspersores e maiores na região próximo aos aspersores. Para este espaçamento, grande para o aspersor utilizado, a redistribuição de umidade não é mais suficiente para manter os valores de mediana uniformes em toda a área irrigada, como nos espaçamentos anteriores. Este fato fica evidenciado ao se comparar os cenários 1 e 2 e os agrupamentos em colunas para o cenário 3, nos quais os valores de mediana pouco variam, com o cenário 4, onde a variação entre agrupamentos é muito grande.

Ainda no cenário 3, comprova-se o efeito da redistribuição da água aplicada ao solo, pela comparação entre os gráficos das Figuras 6 e 7. Enquanto lâminas apresentam valores de C_v de até 71,3%, os valores para umidades ficam entre 1,6 e 6,9%. A coluna onde ocorreu o maior valor de C_v para lâmina foi aquela onde ocorreu o maior valor de C_v para umidade, evidenciando a relação de dependência entre estas variáveis.

O cenário 4 apresenta-se com grande diferença em relação aos demais, em termos de distribuição espacial de água no solo. O fato de algumas regiões centrais das quadriculas entre quatro aspersores não terem recebido água, faz com que, apenas neste cenário, a redistribuição de água no solo não seja capaz de uniformizar os valores de mediana dos agrupamentos. Isto revela que pontos mais distantes dos aspersores têm valores de umidade da ordem de 20% (valores mínimos), enquanto pontos mais próximos dos aspersores apresentam valores da ordem de 50% ou mais (valores

máximos). Este fato revela a forte dispersão em torno do valor central dentro dos agrupamentos, o que é expresso por valores de C_v entre 5,8 e 36,7%.

Embora muito inferiores aos valores de C_v obtidos para lâminas neste cenário, o que identifica o forte efeito da redistribuição no sentido de uniformizar a umidade, os valores de C_v para dados de umidade revelam que ao longo do mesmo agrupamento existiram regiões com déficit de água e outras com excesso. Ambos podem comprometer o desenvolvimento vegetal.

4.7.3 Rendimentos de grãos

Com o propósito de avaliar as relações entre as distribuições espaciais de lâmina e de umidade e distribuição de valores de rendimento de grãos, foram construídos os gráficos da Figura 8. Para o cenário 1, verifica-se que os agrupamentos em colunas e linhas apresentaram valores de mediana com dispersão em torno de valor médio, igual a $2249,9 \text{ kg ha}^{-1}$, superior ao verificado para lâminas e, principalmente, para umidades. Esta dispersão ocorreu em função da elevada variação dentro de cada agrupamento, expressa por valores de C_v entre 11,5 e 27,1%. Esta variabilidade do rendimento da cultura não ocorre em função da disponibilidade de água no solo, mas sim em função de outros fatores não controlados, tais como variabilidade genética das plantas e variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas do solo.

Importante é observar que esta variabilidade que se manifesta no ambiente onde a uniformidade da umidade do solo é quase absoluta e, portanto, pode ser atribuída aos fatores não controlados, é expressivamente maior que a variabilidade da umidade do solo nos cenários 1, 2 e 3. Apenas no cenário 4 é que os valores de C_v para os agrupamentos de dados chegam a superar estes valores de C_v para rendimento de grãos no cenário 1.

Mesmo no cenário 3, a desuniformidade da irrigação, tendo sido muito reduzida pelo processo de redistribuição, não induziu variação maior de rendimento de grãos, nos respectivos agrupamentos, que a verificada para o cenário 1.

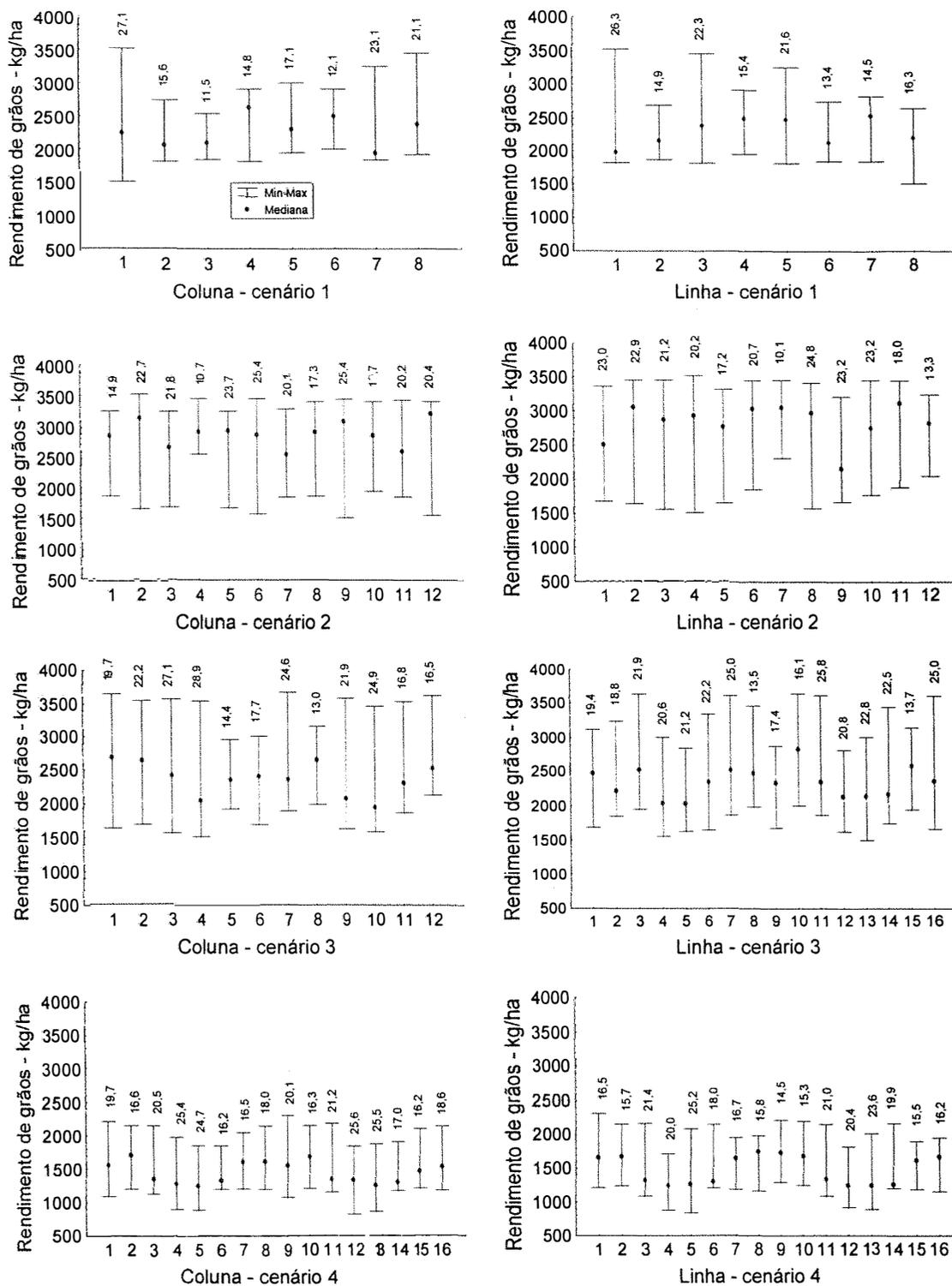


Figura 8 – Valores mínimo, máximo, mediana e de coeficiente de variação para dados de rendimentos de grãos, nas colunas e nas linhas, para os cenários 1,2,3 e 4.

Para os cenários 1, 2 e 3, verifica-se que a redistribuição suavizou a distribuição de lâminas, tornando a distribuição espacial de umidade uniforme o bastante para que a variabilidade do rendimento de grãos, promovida por fatores não controlados, fosse maior que a decorrente da variação da irrigação realizada. Isto permite a obtenção do resultado de maiores valores de média e de mediana do rendimento de grãos no cenário 2, seguido dos valores no cenário 3, ambos maiores que o cenário 1. Neste, os valores máximos da maior parte dos agrupamentos ficou abaixo de 3000 kg ha^{-1} . No cenário 3 e, principalmente, no cenário 2, alguns valores máximos ficaram acima de 3500 kg ha^{-1} e na maioria dos agrupamentos, ficaram acima de 3000 kg ha^{-1} .

A irregularidade da irrigação nos cenários 2 e 3 foi benéfica no sentido de promover áreas com valores máximos de rendimento de grãos maiores que os valores máximos obtidos no cenário 1.

Os valores de rendimento de grãos no cenário 4 apresentam mediana dos agrupamentos expressivamente menores que para os demais cenários (aproximadamente 50% do obtido no cenário 2). O grande espaçamento adotado faz com que, neste cenário, as medianas dos agrupamentos assumam distribuição no espaço que acompanha a distribuição dos valores correspondentes de lâmina e de umidade do solo. Neste cenário a cultura respondeu à variação da umidade do solo, decorrente da variação espacial da lâmina de irrigação, em termos das medidas de tendência central dos dados nos agrupamentos (mediana e média).

A variação destes valores em torno da mediana, no entanto, não é maior que para os demais cenários, sendo expressa por valores de C_v entre 14,5 e 25,6%. Os valores mínimos de umidade, entre 20 e 25%, para o cenário 4, presentes nos agrupamentos que contêm os dados das posições centrais entre os aspersores, estão associados a valores mínimos de rendimento de grãos da ordem de 1000 kg ha^{-1} , menores que os verificados nos demais cenários. Nestes, os valores mínimos de umidade permaneceram acima de 35%, gerando valores mínimos de rendimento de grãos mais elevados.

Por outro lado, os valores máximos de umidade nos diversos agrupamentos do cenário 4, foram relativamente uniformes (bem mais uniformes que os valores de mediana), entre 50 e 55%. Estes valores elevados estão associados a valores máximos de

rendimento de grãos entre 2000 e 2500 kg ha⁻¹, consideravelmente menores que os valores máximos obtidos principalmente nos cenários 2 e 3.

Mais uma vez, a variabilidade no rendimento de grãos, em resposta à variabilidade de irrigação, não foi maior que no cenário 1, de uniformidade quase absoluta. A irrigação influenciou no valor da mediana dos valores de rendimento de grãos de cada agrupamento, mas não afetou a dispersão dos valores em torno desta posição central.

Paralelamente, os elevados valores de lâmina de irrigação aplicadas em algumas posições no cenário 4, afetaram de forma negativa a produtividade da cultura, nessas regiões, provavelmente por promover maior lixiviação de nutrientes e inadequada aeração do solo, acarretando redução dos valores máximos de rendimento de grãos. Por outro lado, os valores nulos de lâminas em algumas áreas foram compensados pela redistribuição de água no solo e, em parte, pelas chuvas relativamente freqüentes, levando a cultura a produzir uma quantidade que, embora menor que os valores mínimos de outros cenários, foi ainda apreciável (Figura 8).

Em decorrência destes fatos, a amplitude dos valores nos agrupamentos do cenário 4 foi ligeiramente menor que nos demais cenários. Associada aos menores valores médios, deram origem a valores de Cv semelhantes aos obtidos nos demais cenários.

4.7.4 Distribuição espacial das variáveis analisadas

Com o propósito de possibilitar a visualização da distribuição dos valores de lâmina de irrigação, de umidade do solo após a irrigação e de rendimento de grãos da cultura do feijoeiro, para o cenário 4, foram construídas as superfícies de valores mostradas nas Figuras 9, 10 e 11, respectivamente. Os valores medidos para estas variáveis foram usados para se fazer a interpolação segundo o método do inverso do quadrado das distâncias, em malha de 91 linhas por 91 colunas. Os valores assim obtidos permitiram o traçado dos mapas de contorno apresentados.

Pode-se observar na Figura 9 que a região central das áreas entre quatro aspersores recebe lâmina nula em alguns pontos. A lâmina de irrigação é máxima na região próxima aos aspersores, assumindo valores em alguns pontos, superiores 20 mm.

Na Figura 10 verifica-se que a distribuição da umidade do solo no espaço ocorre em função da distribuição da lâmina de irrigação, sendo que os pontos que receberam menores lâminas, (0 a 2 mm) apresentam menores umidades (20 a 24 %). Onde foram maiores as lâminas (Figura 9), maiores foram as umidades (Figura 10).

Pode-se verificar na Figura 11 que a cultura respondeu à distribuição espacial da umidade no solo, apresentando valores de produção de grãos entre 800 e 1000 kg ha⁻¹ nas regiões onde, em decorrência das lâminas nulas, a umidade ficou entre 20 e 24%. Maiores valores de umidade proporcionaram maiores valores de rendimento de grãos. No entanto, os maiores valores de umidade ocorrem em posições no espaço onde não se verifica uma correspondente produção máxima. Embora o método de interpolação utilizado não seja o mais adequado para permitir a avaliação da correlação espacial entre variáveis, esta constatação corrobora a discussão anterior no sentido de que os valores máximos de umidade podem estar associados a uma redução da produção da cultura.

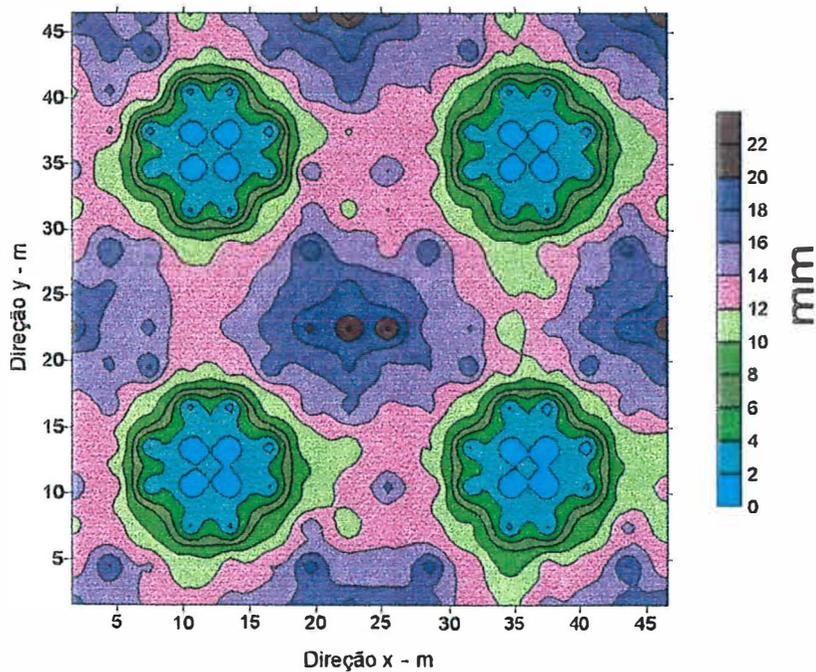


Figura 9 – Distribuição espacial da lâmina de irrigação no cenário 4.

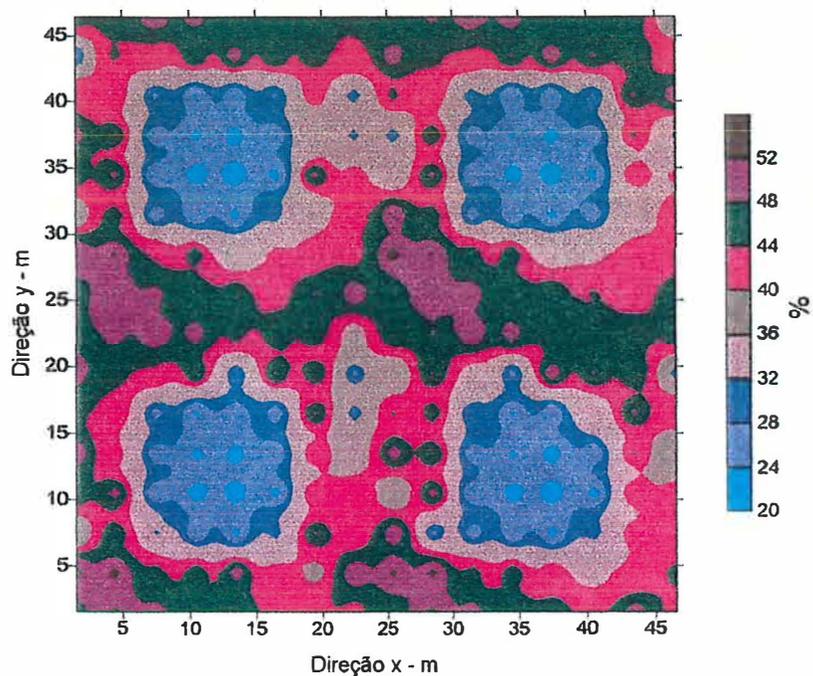


Figura 10 – Distribuição espacial da umidade do solo após as irrigações, com base em massa, no cenário 4.

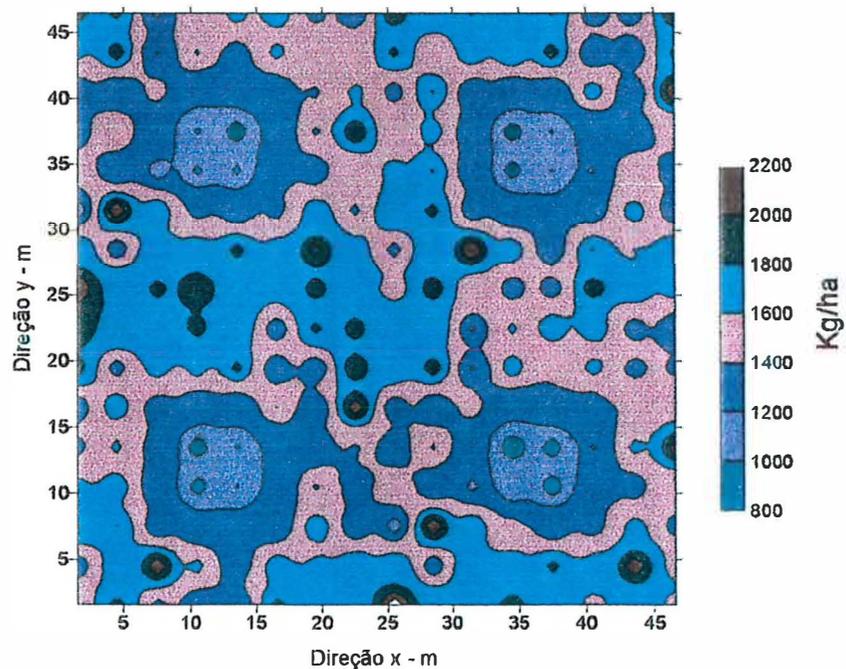


Figura 11 – Distribuição espacial do rendimento de grãos no cenário 4.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, para as condições estudadas e equipamentos utilizados, as análises e discussões apresentadas permitiram as seguintes conclusões:

- A irrigação ótima para o desenvolvimento vegetativo (máximo IAF), foi a de máxima uniformidade, que não correspondeu ao ótimo para a produção;

- A uniformidade da umidade do solo, embora dependente da uniformidade da lâmina aplicada, foi consideravelmente maior que esta, nas condições estudadas. Além disto, como estabelecido na hipótese, o rendimento da cultura correlacionou-se melhor com a uniformidade da umidade do solo que com a uniformidade da lâmina aplicada;

- A qualidade da irrigação interferiu na uniformidade da umidade do solo e influenciou nas variáveis de produção e de crescimento da cultura de feijão;

- Uniformidade máxima não implicou em maior rendimento de grãos. Embora não tenha promovido rendimento de grãos máximo, o espaçamento de 18 x 24m promoveu pequena queda de valor da variável rendimento de grãos. Como este espaçamento implica em menor uso de componentes do sistema, isto torna a sua relação custo/benefício mais conveniente;

- O rendimento de grãos foi máximo para o espaçamento de 18 x 18m, o que faz deste espaçamento o mais conveniente para uso em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVIM, R.; ALVIM, P.T. Efeito da densidade de plantio no aproveitamento da energia luminosa pelo milho (*Zea maiz*) e pelo feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), em culturas exclusivas e consorciadas. **Turrialba**, v.19, p.389-393, 1969.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING. **ASAE Standards**. St. Joseph, 1984. p.457-459: Procedure for sprinkler distribution testing for research purposes, S330).

ASSIS, F.N.; ARRUDA, H.V.; PEREIRA, A.R. **Aplicações de estatística à climatologia**. Pelotas: Editora Universitária; Universidade Federal de Pelotas, 1996. 161p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aspersores para irrigação/avaliação da distribuição de água**: NBR 8989. Rio de Janeiro, 1985. 9p.

AVILAN-ROVIRA, L.A.A. Estudo do sistema radicular do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) var. Carioca. Piracicaba, 1975. 86p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

BASCUR, G.; OLIVA, M.A.; LAING, D. Termometria infrarroja en selection de genotipos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) resistentes a la sequia. II. Crecimiento y productividad. **Turrialba**, v.35, n.1, p.49-53, 1985.

- BEIGUELMAN, B. **Curso prático de bioestatística**. 3 ed. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1994. 244p.
- BENAMI, A.; HORE, F.R. A new irrigation sprinkler distribution coefficient. **Transactions of the ASAE**, v.7, n.2, p.157-158, 1964.
- BEN-ASHER, J.; AYARS, J.E. Deep seepage under nonuniform sprinkler irrigation. I. Theory. **Journal of Irrigation and Drainage ASCE**, v.116, n.3, p.354-362, May/June 1990.
- BERGAMASCHI, H. Perda de água e desenvolvimento de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) sob diferentes condições da disponibilidade hídrica no solo e da atmosfera. Piracacaba, 1984. 204p. Tese (Doutorado)–Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- BERNANRDO, S. **Manual de irrigação**. 5. ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1989. 596p.
- BERNUTH, R.D. von. Uniformity design criteria under limited water. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.26, n.5, p.1418-1421, 1983.
- BRIDE, S. Análise de uniformidade da distribuição de água em sistema de irrigação por pivô central. Viçosa, 1984. 87p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa.
- BROUGHAM, R.W. Interception of light by foliage of pure and mixed stands of pasture plants. **Australian Journal of Agricultural Reasearch**, v. 9, p.39-52, 1958.
- BROWN, D.A.; SCOTT, H. don. Dependence of crop growth and yield on root development and activity. In: BARBER, S.A.; BOULDIN. D.R. (Ed.) **Roots**,

nutrient and water influx, and plant growth. Madison: Soil Science Society of America, 1984. cap.6, p.101-136.

CAIXETA, T.J. Irrigação do feijoeiro. **Informe Agropecuário**, v.4 n.46, p.36-40, 1978.

CAIXETA, T.J.; PURCINO, J.R.C; SILVA, L. Irrigação de algumas culturas. **Informe Agropecuário**, v.9, n.110, p.65-76, 1983.

CAMPOS, H. **Estatística experimental não-paramétrica.** 4 ed. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Matemática e Estatística, 1983. 349p.

CHAUDHRY, F.H. O papel da uniformidade de precipitação na produção. São Carlos, 1975. 80p. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CHEN, D.; WALLENDER, W.W. Economic sprinkler selection, spacing and orientation. **Transactions of the ASAE**, v.27, n.3, p.737-743, 1984.

CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by sprinkling. **Agricultural Engineering**, v.18, n.12, p.533-538, 1937.

CHRISTIANSEN, J.E. The uniformity of application of water by sprinkler systems. **Agricultural Engineering**, v.22, n.3, p.737-743, 1941.

CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkling.** Berkeley: University of California, 1942. 124p. (California Agricultural Experimental Station. Bulletin, 670).

COELHO, R.D. Regulagens de aspersores e seus efeitos sobre a uniformidade de aplicação de água e produtividade das culturas. Piracicaba, 1990. 141p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”,
Universidade de São Paulo.

CRIDDLE, W.D.; DAVIS, S.; PAIR, C.H.; SHOCKEY, D.G. **Methods for evaluating irrigation systems**. Washington: USDA, Soil Conservation Service, 1956. 186p. (Agriculture Handbook, 82).

CUENCA, R.H. **Irrigation system design, an engineering approach**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 552 p.

DAKER, A. **Á água na agricultura: irrigação e drenagem**. 6. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1984. 543p.

DAVIS, J.R. Measuring water distribution from sprinklers. **Transactions of the ASAE**, v.9, n.1, p.94-97, 1966.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212p. (Estudio FAO. Riego y Drenaje, 33).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande, UFPB, 1994. p.117-121: Feijão. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 33)

DOURADO NETO, D. Variabilidade espacial das alturas de chuva e irrigação e de potenciais da solução do solo. Piracicaba, ESALQ, 1989, 180 p. (Tese Mestrado)

DOURADO NETO, D.; SAAD, A.M.; JONG van LIER, Q. de. Controle de irrigação: método conjugado. In: FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. (Ed.) **Feijão irrigado**. 3ª ed. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Agricultura, 1992. 117p.

- DUKE, H.R.; HEERMANN, D.F.; DAWSON, L.J. Appropriate depths of application for scheduling center pivot irrigations. **Transactions of the ASAE**, v.35, n.5, p.1457-1464, Sept./Oct. 1992.
- ELLIOT, R.L.; NELSON, J.D.; LOFTIS, F.C.; HART, W.E.A. Comparison of sprinkler uniformity models. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, v.106, n. IR4, p.321-332. Dec. 1980.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Boletim Técnico nº 57**. Curitiba, Embrapa, 1984, 791p.
- EVANS, R.G.; HAN, S.; KROGER, M.W. Spatial distribution and uniformity evaluations for chemigation with center pivots. **Transactions of the ASAE**, v. 38, n.1, p.85-92, 1995.
- FANCELLI, A.L. **Cultura do feijão**. Piracicaba: FEALQ, 1987. 138p.
- FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Feijão irrigado**. 3.ed. Piracicaba: ESALQ, 1992. 177p.
- FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. Ecofisiologia e fenologia do feijoeiro. In: FANCELLI, A.L; DOURADO NETO, D. (Coord.) **Tecnologia da produção do feijão irrigado**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Agricultura, 1997. p.100-120.
- FARIA, J.E. Estudo da uniformidade e de sua influência na produção e na economia dos projetos de irrigação por aspersão, através de simulação. São Carlos, 1993. 147p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- FERNÁNDEZ, F.; GEPTS, P.; LOPEZ, M. **Etapas de desarrollo de la planta de frijol comum:** guia de estudio para ser usada como complemento de la unidade tema. Cali, Colômbia,. 1982. 26p
- FRIZZONE, J.A. Uniformidade e eficiência da irrigação. Piracicaba: ESALQ/Departamento de Engenharia Rural, 1998. 40p. (Série Didática).
- FRIZZONE, J.A. Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) ao uso de nitrogênio e lâminas de irrigação. Piracicaba, 1986. 133p. (Doutorado – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP).
- FRIZZONE, J.A. **Irrigação por aspersão:** uniformidade e eficiência. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Engenharia Rural, 1992. 53p. (Série Didática, 3)
- FORST, K.R. Factors affecting evapotranspiration losses during sprinkling. **Transactions of the ASAE**, v.6, n.4, p.282-287, 1963.
- GARRIDO, M.A.T.; PURCINO, J.R.C.; LIMA, C.A.S. Efeito de diferentes níveis de umidade do solo sobre o rendimento do feijoeiro comum, na região norte de Minas Gerais. In: EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS. **Projeto feijão**. Belo Horizonte, 1978. p.28-30. (Relatório 76/77).
- GARRIDO, M.A.T.; PURCINO, J.R.C.; LIMA, C.A.S. Efeito de diferentes regimes de irrigação sobre o rendimento do feijoeiro na região norte de Minas Gerais. In: EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS. **Projeto feijão**. Belo Horizonte, 1979. p.27-29. (Relatório 77/78).
- GILLEY, J.R.; MIELK, L.N.; WILHELM, W.W. An experimental center-pivot irrigation system for reduce energy crop production studies. **Transactions of the ASAE**, v.26, p.5, p.1375-1379, 1385, 1983.

- GLINSKI, J.; LIPIEC, J. **Soil physical conditions and plant roots**. Boca Raton: CRC Press, 1990. 250p.
- GOHRING, R.T.; WALLENDER, W.W. Economics of sprinkler irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, v.30, n.4, p.1083-1089, 1987.
- GONÇALVES, A.C.A. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação. Piracicaba, 1997. 118p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- GUIMARÃES, C.M. Características morfo-fisiológicas do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) relacionadas com a resistência à seca. Campinas, 1992. 131p. Tese (Doutorado) – Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas.
- HANSON, B.R.; LANCASTER, D.L. Some causes of nonuniformity are correctable. **California Agriculture**, v. 40, n. 5/6, p.24-26, May/June 1986.
- HART, W.E. Overhead irrigation pattern parameters. **Agricultural Engineers**, v.42, n.7, p.354-355, 1961.
- HART, W.E. Subsurface distribution of nonformly applied surface waters. **Transactions of the ASAE**, v.15, n.3, p.656-666, 1972.
- HART, W.E.; REYNOLDS, W.N. Analytical design of sprinkler systems. **Transactions of the ASAE**, v.9, n.1, p.83-85,89,1965.
- HART, W.E.; PERI, G.; SKOGERBOE, G.V. Irrigation performance: na evaluation. **Journal of Irrigation and Drainage Division. ASCE**, v.105, n.1R3, p.275-288, Sept. 1979.

- HEERMANN, D.F. Center pivot design and evaluation. In: NATIONAL IRRIGATION SYMPOSIUM, 3., Phoenix, 1990. **Proceedings**. St. Joseph: ASAE, 1990. p.564-569.
- HEERMANN, D.F.; WALLENDER, W.W.; BOS, M.G.; Irrigation efficiency and uniformity. In: HOFFMAN, G. J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. **Management of farm irrigation systems** St. Joseph: ASAE, 1990. cap.6, p.125-146.
- HEINEMANN, A.B.; FRIZZONE, J.A. Custo da melhora da uniformidade de distribuição de água por um pivô central vs. Economia de energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., Viçosa, 1995. **Anais**. Viçosa: SBEA, 1995. p.189.
- HOFFMAN, GLENNJ.; HOWELL, TERRY A.; SOLOMON, KENNETH H. (Ed.) **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1990. 1040p.
- HUNSAKER, D.J.; BUCKS, D.A. Wheat yield variability in irrigated level basins. **Transactions of the ASAE**, v.30, n.4, p.1099-1104, July 1987.
- IEMMA, A.F. **Estatística descritiva**. Piracicaba: *φσρ* Publicações, 1992. 182p.
- INFORZATO, R.; MIYASAKA, S. Sistema radicular do feijoeiro em dois solos do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v.22, n.2, p.477-482, 1963.
- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.
- JENSEN, M.E.; SWARNER, L.R.; PHELAN, J.T. Improving irrigation efficiencies. In: HAGAN, R.M. **Irrigation of agriculture lands**. St. Joseph, ASAE, 1967. cap.61, p.1120-1142. (Agronomy, 11).

- JONES, L.H. Adaptive responses to temperature in dwarf french beans, *Phaeolus vulgaris* L. **Annals of Botany**, v.35, p.581-596, 1971.
- KARMELI, D. Estimating sprinkler distribution patterns using linear regression. **Transactions of the ASAE**, v.21, p.682-686, 1978.
- KECKLER, D. **Surfer for Windows: user's guide**, v.6: Contouring and 3D surface mapping. Colorado: Golden Software, 1995. 1v.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652p.
- KLAR, A.E. **Irrigação: frequência e quantidade de aplicação**. São Paulo: Nobel, 1991. 156p.
- KREYZIG, E. **Introductory mathematical statistics: principles and methods**. New York: John Wiley, 1970. 470p.
- KRUSE, E.G. Describing irrigation efficiency and uniformity. **Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE**, New York, 104(IR1): 35-41, 1978.
- KÛET, J.; MARSHALL, J.K. Assessment of leaf area and other assimilating plant surfaces. In: SESTAK, Z.; CATSKY, J.; JARVIS, P.G. (Ed.) **Plant photosynthetic production: manual of methods**. The Hague: N. V. Publ., 1971. cap.14, p.517-555.
- LETEY J. Irrigation uniformity as related to optimum crop production – additional research is needed. **Irrigation Science**, v.6, n.4, p.253-263, Oct. 1985.
- LETEY J.; VAUX, H.J.; FEINERMAN, E. Optimum crop water application as affected by uniformity of water infiltration. **Agronomy Journal**, v.76, n.3, p.435-441, 1984.

LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O. de; TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.20, p.1-12, 1996.

LOPEZ, E.M. **Riego por aspersion**. Petrolina, SUDENE;MINTER;IICA, 1975. 33p.

LUCHIARI JUNIOR, A. Determinação do coeficiente de cultura (Kc) para feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) pelo método do balanço hídrico. Piracicaba, 1978. 59 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

MAGALHÃES, A.C.N. Análise quantitativa do crescimento. In: *Fisiologia Vegetal*. Editoras EPU e EDUSP, São Paulo, 1979. v.1 p.331-350.

MANTOVANI, E.C. Desarrollo y evaluacion de modelos para el manejo del riego: estimation de la evapotranspiracion y efectos de la uniformidad de aplicacion del riego sobre a produccion de los cultivos. Córdoba, 1993. 183p. Tesis (Doctor)– Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Agronomos, Universidade de Córdoba.

MATEOS, L.; MANTOVANI, E.C.; VILLALOBOS, F.J. Cotton response to non-uniformity of conventional sprinkler irrigation. **Irrigation Science**, v.17, p.47-52, 1997.

MATSURA, E.E. Eficiência de irrigação e uniformidade de distribuição de água em sistema de irrigação por aspersão. Piracicaba, 1987. 124p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo.

MERRIAN, J.L.; KELLER, J. **Farm irrigation systems evaluation: a guide for management**. 3.ed. Logan: Utah State University, 1978. 285p.

- MERRIAN, J.L.; SHEARER, M.V.; BURT, C.M. Evaluation irrigation systems and practices. In: JENSEN, M.E. **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1983. p.583-618.
- MOREIRA, J.A.A.; STONE, L.F. **Manejo de solo-planta e avaliação sócio-econômica dos sistemas agrícolas irrigados por aspersão na região dos cerrados**. Goiânia: EMBRAPA,CNPAF,1995. (EMBRAPA. Projeto 04.0.95.273.06; em andamento).
- NIELSEN, D.R.; BIGGAR, W.; ERB, K.T. Spatial variability of field-measured soil-water properties. **Hilgardia**, v.42, n.7, p.215-259, 1973.
- NOGUEIRA, L.C. Avaliação técnica de dois sistemas de irrigação por aspersão. Fortaleza, 1987. 124p. Dissertação (M.S.) – Universidade Federal do Ceará.
- OLIVEIRA, F.A.; SILVA, J.J.S. Evapotranspiração, índice de área foliar e desenvolvimento radicular do feijão irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.25, n.3, p.317–322, mar. 1990.
- OSPINA, O.H.F. **Morfologia de la planta del frijol común (Phaseolus vulgaris L.)**. 2.ed. Cali: CIAT, 1981. 50p. (Guía de Estudio. Serie 04SB-09.01).
- PAIR, C.H. Water distribution under sprinkler irrigation. **Transaction of the ASAE**, v.11, n.5, p.648-651, 1968.
- PAIVA, J.B.D. Uniformidade de aplicação de água, abaixo da superfície do solo, utilizando irrigação por aspersão. São Carlos, 1980. 333p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- PEARSON, R.W. Significance of rooting pattern to crop production and some problems of root research. In: CARSON, E.W. (Ed.) **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. cap.10, p.247-270.
- PELOSO, M.J. del; SILVEIRA, P.M. da; SILVA, C.C. da; MOREIRA, J.A.A. Cultivo irrigado em terras altas. In: ARAÚJO, R.S.; RAVA, C.A. STONE, L.F.; ZIMMERMANN, M.J.O. (Coord.) **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: POTAFOS, 1996. p.571-588.
- PENAFORTE, A. B. Análise da performance de um sistema de irrigação por aspersão convencional, acima e abaixo da superfície do solo. Lavras, 1992. 76p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura de Lavras.
- PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais**. Campinas: IAC, 1987. 33p. (IAC. Boletim Técnico, 114).
- PERI, G.; HART, W.E.; NORUM, D.J. Optimal irrigation depths: a method of analysis. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**. ASCE, v.105, n.1R4, p.341-355, Dec. 1979.
- PERRENS, S.J. Numerical analysis of soil water uniformity under sprinkler irrigation. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.30, p.23-27, 1984.
- PIRES, R.C.M.; ARRUDA, F.B.; FUJIWARA, M.; SAKAI, E.; BORTOLETO, N. Profundidade do sistema radicular das culturas de feijão e trigo sob pivô central. **Bragantia**, v.50, n.1, p.153-163, 1991.
- PORTES, T. de A. Ecofisiologia. In: ARAÚJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, M.J. DE O. (Coord.). **Cultura do Feijoeiro Comum no Brasil**. Piracicaba: POTAFOS, 1996. p.101-137.

- RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C., eds. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, 2. ed. Campinas, Instituto Agrônômico & Fundação IAC, 1996. 285p. (Boletim, 100).
- RAMOS, M.M.; MANTOVANI, E.C. Sistemas de irrigação e seus componentes. In: COSTA, E.F.; VIEIRA, R.F.; VIANA, P.A. **Quimigação: aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação**. Brasília: EMBRAPA, 1994. cap.2, p.41-82.
- REICHARDT, K.; **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1996. 513p.
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; SANTOS, J.M. **An analysis of soil water movement in the field. II. Water balance in snap bean crop**. Piracicaba: CENA, 1974. 19p. (CENA. Boletim Científico, BC-022).
- RESENDE, M.; HENDERSON, D.W.; FERERES, E. Frequência de irrigação, desenvolvimento e produção do feijão Kidney. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.16, n.3, p.363-370, 1981.
- REZENDE, R.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A. Desempenho de um sistema de irrigação pivô central quanto à uniformidade de distribuição de água abaixo e acima da superfície do solo. **Engenharia na Agricultura**, v.2, n.19, p.1-7, 1993.
- SAAD, A.M.; DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. Controle de irrigação pelo método do tensiômetro na cultura do feijão sob pivô central. In: FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. (Coord.) **Feijão irrigado**. 3. ed. Piracicaba: ESALQ, 1992. 177p.
- SCALOPPI, E.J. Exigência de energia para irrigação. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, v.21, p.13-17, 1985.

- SHIBLES, R.M.; WEBER, C.R. Leaf area, solar radiation interception and dry matter accumulation by soybeans. **Crop Science**, v.5, p.575-578, 1965.
- SOARES, A.A. **Curso de engenharia da irrigação: métodos de irrigação; irrigação localizada e por aspersão**. Brasília: ABEAS, 1992. 101p.
- SOLOMON, K. Variability of sprinkler coefficient of uniformity test results. **Transactions of the ASAE**, v.22, n.5, p.1078-1080, 1086, 1979.
- SOLOMON, K.H. Yield related interpretations of irrigation uniformity and efficiency measures. **Irrigation Science**, v.5, n.3, p.161-172, July 1984.
- SOUZA, L.D.; REICHARDT, K. Estimativa da capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.183-189, 1996.
- SPIEGEL, M.R. **Estatística**. 3. ed. São Paulo: Makron Books, 1993. 643p.
- STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A. **Irrigação do feijoeiro**. Goiânia: EMBRAPA, CNPAF, 1986. 31p. (EMBRAPA.CNPAF. Circular Técnica,20).
- STONE, L.F.; PORTES., T.A.; MOREIRA, J.A.A. Efeitos da tensão da água do solo sobre a produtividade e crescimento do feijoeiro. II. Crescimento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.23, n.5, p.503-510, 1988.
- TAYLOR, H.M.; ARKIN, G.F. Root zone modification: fundamentals and alternatives. In: ARKIN, G.F.; TAYLOR, H.M. (Ed.) **Modifying the root environment to reduce crop stress**. St. Joseph: ASAE, 1981. p.82 -126.
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in soil science**, v.38, p.45-94, 1985.

- VARLEY, I. Evaluation of nonuniformity in irrigation and yield. **Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE**, v.102, n.1, p.149-164, 1976.
- VIEIRA, R.F. Introdução à quimigação. In: COSTA, E.F.; VIEIRA, R.F.; VIANA, P.A. **Quimigação: aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação**. Brasília: EMBRAPA, SPI, 1994. cap.1, p.13-40.
- VILHORDO, B.W.; MIKUSINSKI, O.M.F.; BURIN, M.E.; GANDOLFI, V.H. Morfologia. In: ARAÚJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, M.J.O. **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: POTAFOS, 1996. p.71-99.
- VON BERNUTH, R.D. Uniformity design criteria under limited water. **Transactions of the ASAE**, v.26, n.5, p.1418-1421, 1983.
- WALKER, W.R. Explicit sprinkler irrigation uniformity: efficiency model. **Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE**. n.IR2, p.129-136, June 1979.
- WARRICK, A.W. Interrelationships of irrigation uniformity terms. **Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE**, v.109, n.3, p.317-332, 1983.
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Application of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p.319-344.
- WEBSTER, R.; OLIVIER, M.A. **Statistical methods in soil and land resource survey**. Oxford: University Press, 1990. 316 p.
- WHITE, J.W. **Conceptos basicos de la fisiología del frijol: guía de estudio para ser usada como complemento de la unidad audiotutorial sobre el mismo tema**. Cali:CIAT, 1988. 56p. (Serie: 04 5B-07.01)

YOSHIDA, S. Physiological aspects of grain yield. **Annual Review of Plant Physiology**, v.23, p.437-464, 1972.

ZOCOLER, J.L.; FRIZZONE, J.A.; PEREIRA, G.T.; PEREIRA, A.S. Uniformidade de distribuição de água versus custos do sistema de aspersão convencional. **Engenharia Rural**, v.6, n.2, p.39-48, 1995.

ROBERTO REZENDE

Engenheiro Agrícola

Professor do curso de Agronomia

Centro de Ciências Agrárias – (CCA)

Universidade Estadual de Maringá – Paraná

Campus Universitário – UEM / CCA / DAG / CTI

Fones: 44 261 4040 / 44 261 4316 / 44 225 1336

Av: Colombo nº 5.790 – CEP 87020 - 900

Maringá – Paraná – Brasil

E-mail: rrezende@uem.br.