

Uniformidade da lâmina de irrigação, da umidade do solo e da produção da cultura do feijoeiro, espacialmente referenciadas

Roberto Rezende^{1*}, Antônio Carlos Andrade Gonçalves¹, José Antônio Frizzzone², Paulo Sérgio Lourenço De Freitas¹, Altair Bertonha¹ e Celso Helbel Junior¹

¹Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil.

²Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil. *Autor para correspondência: e-mail: rrezende@uem.br

RESUMO. Com o objetivo de comparar a uniformidade de lâminas aplicadas, uniformidade de umidades no solo e produtividade da cultura do feijoeiro, conduziu-se um experimento utilizando o cultivar de feijão Iapar 57. Ao realizar as aplicações de água na superfície do solo, com 4 valores de uniformidades, aplicou-se a mesma lâmina. Realizaram-se análises das distribuições dos dados de lâmina aplicada, de umidade do solo e de rendimento de grãos, no espaço. Para isto, utilizaram-se técnicas de análise exploratória que consistiram, principalmente, em gráficos tipo "box-plot" simplificados, onde são apresentados apenas os valores de mediana, máximo e mínimo das distribuições. Verificou-se que a qualidade da irrigação interferiu na uniformidade da umidade do solo e influenciou nas variáveis de produção da cultura de feijão. A uniformidade máxima não implicou maior produtividade.

Palavras chave: irrigação, uniformidade, produtividade.

ABSTRACT. *Spatial distribution of irrigation water depth, soil moisture and bean yield.* This experiment was conducted to evaluate irrigation uniformity effects on soil moisture uniformity and on bean yield. Water was applied by conventional sprinkler irrigation system. Applied water depth was obtained from measurements of soil moisture and from soil water retention capacity. Applied water depth was the same at four different uniformity levels, imposed by four different sprinklers spacing, of 12 x 12m, 18 x 18m, 18 x 24m and 24 x 24m. Spatial distributions of applied water, soil moisture and bean yield were evaluated using statistical exploratory techniques, mainly that called "simplified" box-plot, obtained from each line and column data, accordingly to each treatment lay-out. It was verified that irrigation uniformity affected spatial distribution of soil moisture and bean yield, but the higher yield did not achieve the best irrigation uniformity treatment.

Key words: irrigation, uniformity, bean yield.

Introdução

A disponibilidade do recurso água é cada vez 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 a essas exigências, as preocupações com a qualidade da irrigação se fazem necessárias tanto no processo de planejamento e de operação dos sistemas, como no manejo das irrigações.

O critério de adotar-se valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) ao redor de 80% em projetos de irrigação por aspersão é

amplamente aceito. Segundo Keller e 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.

Várias pesquisas têm demonstrado que a uniformidade de aplicação de água relaciona-se com o rendimento da cultura (Gohring e Wallender, 1987; Mantovani, 1993). Porém, em condições de limitada disponibilidade de água, a uniformidade pode ser compensada por um manejo eficiente da

lâmina a ser aplicada, proporcionando, dessa maneira, 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, isso 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 esses 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.

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 potencial que provocam o movimento da água de pontos de maior potencial para pontos de menor potencial. Há uma intensa redistribuição dentro do solo e, conseqüentemente, uma uniformização da distribuição de umidade.

Hart e Reynolds (1965), ao estudarem 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, desse modo, inadequada se o objetivo do projeto é implantar o sistema mais econômico possível.

A eficiência da utilização da água pela cultura do feijoeiro em relação ao rendimento obtido é um parâmetro de grande importância, sobretudo em locais onde a atividade de produção é diretamente determinada pela prática da irrigação, refletindo na rentabilidade e na eficiência da produção. Para a cultura do feijoeiro, o valor da eficiência de uso da água na produção de grãos com umidade de 10%, é da ordem de 0,3 a 0,6 kg m⁻³, segundo Doorenbos e Kassam (1979).

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 freqüência dos dados.

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 essa 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 e Nielsen (1980). Esses autores, ao estudarem 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%).

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 e Srivastava (1989).

De acordo com Mateos et al. (1997), a uniformidade da irrigação por aspersão é usualmente quantificada por um coeficiente estatístico de uniformidade. Esses 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.

Nas últimas décadas, a produção de uma cultura irrigada tem sido relacionada com a uniformidade de aplicação de água sobre a superfície do solo (Mantovani, 1993; Frizzzone, 1998). Os estudos, no entanto, mostram que a uniformidade da umidade do solo é, usualmente, maior que aquela medida sobre a superfície do mesmo (Li e Kawano, 1996; Rezende *et al.*, 2000) e que a planta pode responder favoravelmente a esse fato (Gohring e Wallender, 1987; Rezende *et al.*, 2000).

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 consideração a distribuição dos dados no espaço.

Material e métodos

Na área experimental de irrigação do Curso de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Estado do Paraná, localizada geograficamente a 23°25' de latitude sul e a 51°57' de longitude oeste, com altitude média de 542 m, onde foi conduzido o presente trabalho.

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%. O solo da área experimental foi classificado como Nitossolo Vermelho eutroférrico, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifolia (Embrapa, 1999).

O sistema de irrigação por aspersão utilizado para cada nível de uniformidade adotado foi composto de cinco linhas laterais adjacentes, com cinco aspersores por linha, conforme mostrado na Figura 1. Os aspersores utilizados foram da marca Fabrimar, A 232 ECO bocais 5,6 x 3,2mm.

Com a finalidade de obter altos e baixos coeficientes de uniformidade de distribuição na superfície do solo, trabalhou-se com 4 espaçamentos entre os aspersores, possibilitando, assim, a comparação com coeficientes de uniformidade de umidade abaixo da superfície. Os efeitos dos diferentes níveis de uniformidade sobre as variáveis

de produção da cultura do feijoeiro foram também avaliados.

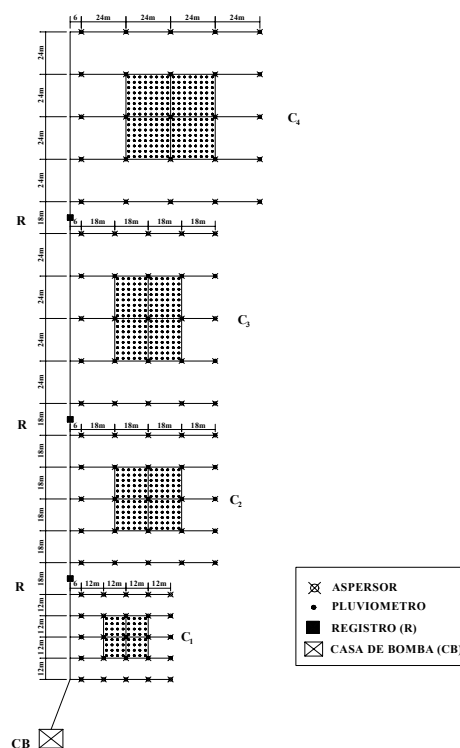


Figura 1. Sistema de irrigação no campo, mostrando os quatro cenários (C₁, C₂, C₃ e C₄)

Os 4 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 0,05 MPa. Em todos os cenários foi aplicada a mesma lâmina bruta de água, em todas as irrigações, igual a 12mm.

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 1.

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 feitas antes de se realizar cada uma das irrigações e também vinte e quatro horas após o final das mesmas.

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. Para cada irrigação, foram obtidos os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), e os coeficientes de uniformidade de distribuição (CUD).

A cultura do feijoeiro, cultivar Iapar 57 foi escolhida para a condução do experimento, em função de sua alta resistência genética ao Vírus do Mosaico Dourado do Feijoeiro. 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 número de vagens por planta (NV), número de grãos por vagem (NG), massa de cem grãos (MC) e rendimento de grãos (RG).

Como foi 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 desse fato, foi feita uma análise da distribuição dos dados de lâmina aplicada, de umidade do solo e de rendimento de grãos, no espaço. Para isso, 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. Esse procedimento permitiu a análise do comportamento das variáveis no espaço, bem como das inter-relações entre os seus valores.

Resultados e discussão

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 ms⁻¹, 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%. Quanto às precipitações ocorridas durante o ciclo da cultura (23/03 a 22/06) totalizaram 108,7mm.

Uniformidade das irrigações

Na Tabela 1 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 4 cenários. Nessa 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%. Isso mostra que o padrão de aplicação de água pouco se alterou com o passar do tempo, induzindo a comportamento semelhante da umidade do solo.

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, 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 1, 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. Esse 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 de se movimentar em 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 foi 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 1, verifica-se 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} .

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 2, para os 4 cenários.

Tabela 1. 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 (C_v) para os quatro cenários

Coef.	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3			Cenário 4		
	$\bar{X}$	s	C_v	$\bar{X}$	s	C_v	$\bar{X}$	S	C_v	$\bar{X}$	S	C_v
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%

Tabela 2. Estatística descritiva para as variáveis de produção: rendimento de grãos em $Kg\ ha^{-1}$ (RG), número de vagens por planta (NV), número de grãos por vagem (NG) e massa de cem grãos em gramas (MC)

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

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 2. A maior produtividade, no entanto, foi obtida no cenário 2, correspondente ao espaçamento de 18 x 18m. 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, assim, 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, então, a importância de se identificar um nível de uniformidade adequada para as condições nas quais se faz a irrigação.

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, nesse 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. 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, dessa maneira, a menor sensibilidade dessa 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, porém aquela referente ao espaçamento de 18 x 18m, a qual pode ser caracterizada como de alta uniformidade, segundo os critérios usuais ($CUC = 85,6\%$ para lâmina aplicada).

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 nessas 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 2759kg ha⁻¹, um valor que pode ser considerado elevado, mesmo em condições de irrigação, para a latitude em questão, (Fancelli e Dourado-Neto, 1997). Para o cenário 3 e o cenário 1, os rendimentos médios foram de 2423 e 2333kg ha⁻¹, respectivamente, revelando também alta produtividade. Para o cenário 4, o rendimento médio de 1500kg ha⁻¹ revela a redução de produtividade associada à redução da uniformidade da irrigação, embora a lâmina média tenha sido constante entre cenários. Isso torna o espaçamento referente ao cenário 3 em uma condição conveniente, uma vez que uma substancial redução de equipamento necessário promoveu pequena redução de produtividade.

Como se observa na Tabela 2, 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. Isso revela dispersão semelhante em torno do valor médio em ambos os casos, mostrando, assim, que a redução do valor da variável foi uniforme em toda a área irrigada.

Análise dos dados no espaço

O valor médio de rendimento de grãos no cenário 2 foi o maior para os 4 cenários. Para o cenário 4, no entanto, foi menor. 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 essas 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 2, 3 e 4.

Lâminas de irrigação

A distribuição espacial dos valores de lâmina coletada, nos quatro cenários, pode ser avaliada,

observando-se os gráficos apresentados na Figura 2. 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 desse parâmetro, para todos os agrupamentos de dados (linhas e colunas), caracterizados por coeficientes de variação entre 1,0 e 6,7%.

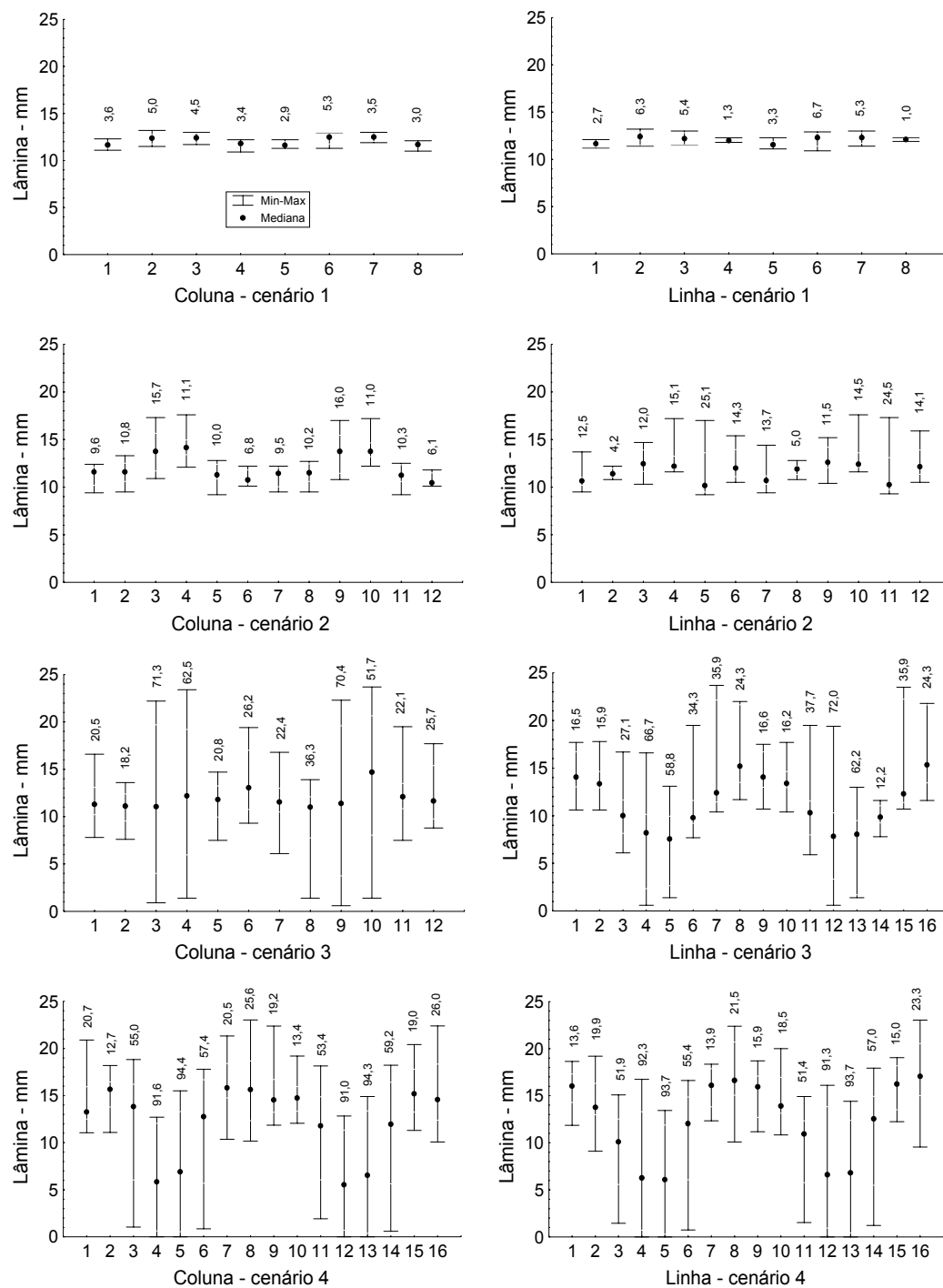


Figura 2. Valores mínimo, máximo, mediana e de coeficiente de variação para dados de lâmina coletada, nas colunas e nas linhas, para os cenários 1, 2, 3 e 4

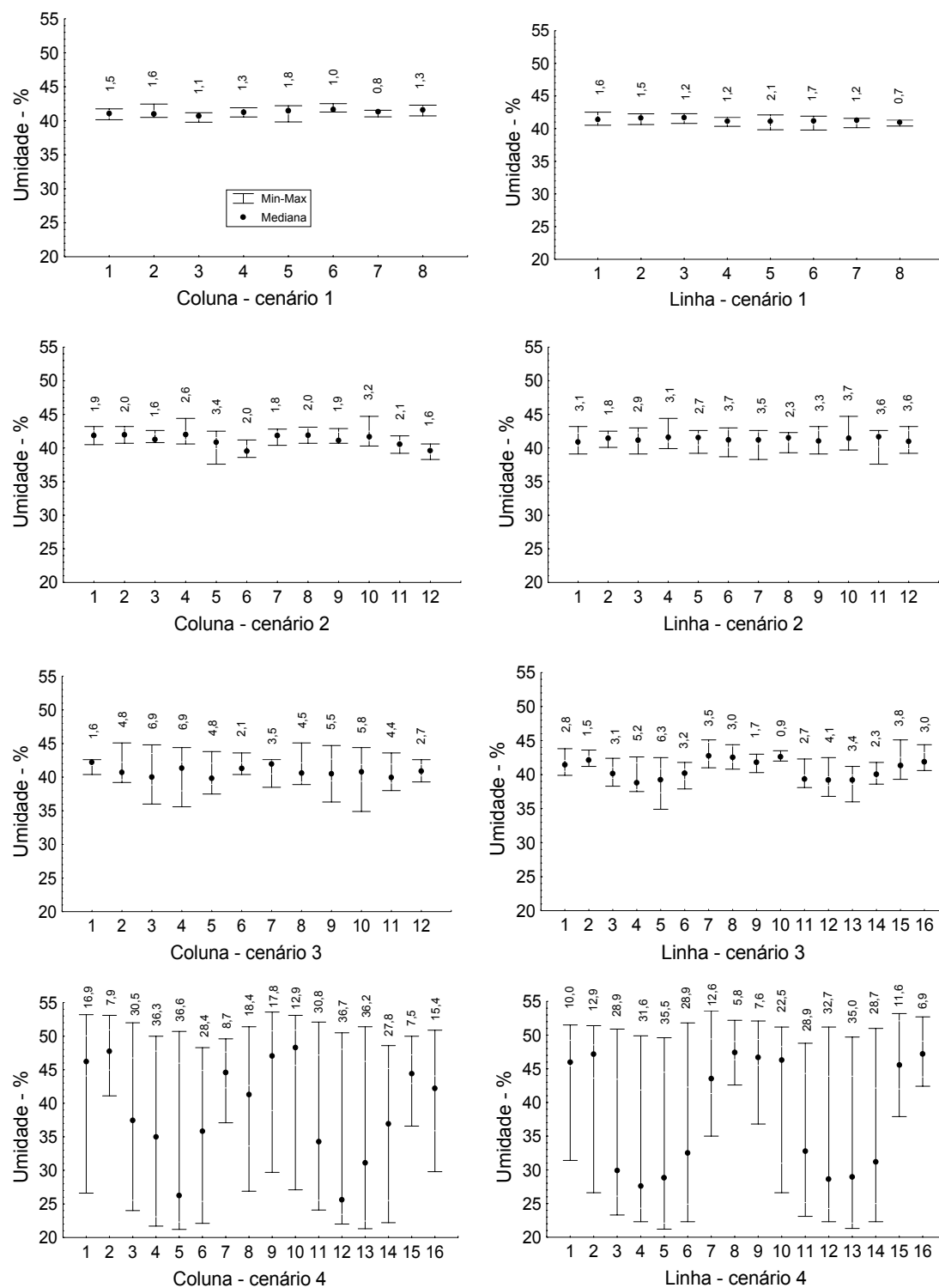


Figura 3. Valores mínimo, máximo, mediana e de coeficiente de variação para dados de umidade do solo após as irrigações, nas colunas e nas linhas, para os cenários 1, 2, 3 e 4

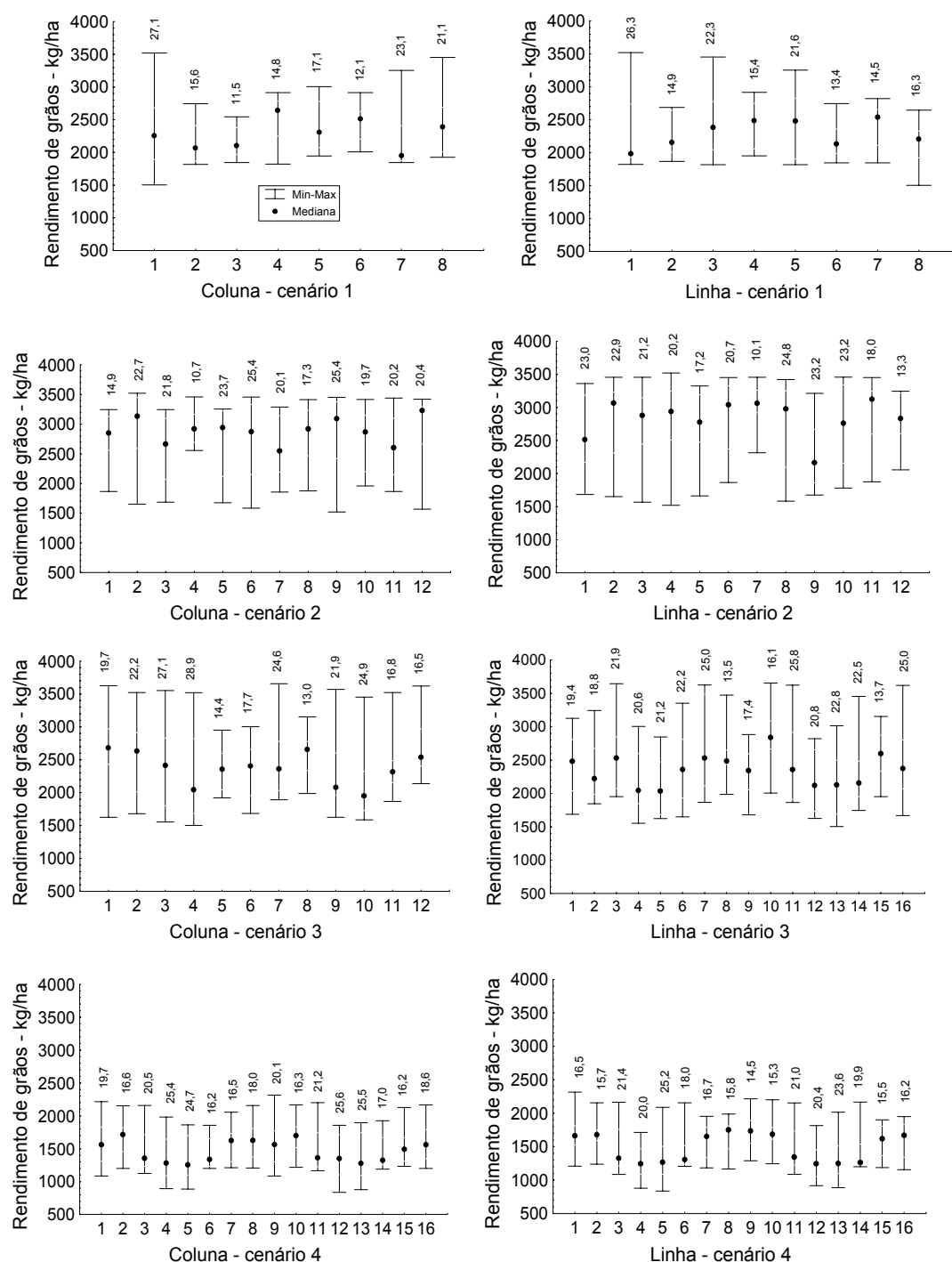


Figura 4. Valores mínimo, máximo, mediana e de coeficiente de variação para dados de rendimentos de grãos, nas colunas e nas linhas, para os cenários 1,2,3 e 4

Para 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 2. Em cada agrupamento, os valores de Cv 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 Cv 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, 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, dessa maneira, a maior irregularidade das lâminas no espaço.

Nesse 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, os valores de mediana são consideravelmente menores na região central entre aspersores e maiores próximo aos mesmos.

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. Isso leva com que os valores máximos nos agrupamentos a crescerem, atingindo, desse modo, 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.

Umidade do solo

Na Figura 3, 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 3. 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 2), que está associada à redistribuição da água no solo. Nesse cenário, na região irrigada, o solo tem uniformidade de umidade próxima da absoluta, na região irrigada, estando a planta se desenvolvendo em condições de umidade elevada.

No cenário 2, a redistribuição da água no solo é também evidente, contribuindo para uma uniformidade da umidade expressa por valores de Cv 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 2 e 3 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 próxima 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 2 e 3. Enquanto lâminas apresentam valores de Cv de até 71,3%, os valores para umidades ficam entre 1,6% e 6,9%. A coluna onde ocorreu o maior valor de Cv

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 quadrículas 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). Esse 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 nesse 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.

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 4. 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 2249,9kg ha⁻¹, superior ao verificado para lâminas e, principalmente, para umidades. Essa dispersão ocorreu em função da elevada variação dentro de cada agrupamento, expressa por valores de C_v entre 11,5 e 27,1%. Essa 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 essa 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 esses 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.

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. Isso 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 3000kg ha⁻¹. No cenário 3 e, principalmente, no cenário 2, alguns valores máximos ficaram acima de 3500kg ha⁻¹ e na maioria dos agrupamentos, ficaram acima de 3000kg 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, nesse cenário, as medianas dos agrupamentos assumam distribuição no espaço que acompanha a distribuição dos valores correspondentes de lâmina e de umidade do solo. 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 desses 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 1000kg 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%. Esses valores elevados estão associados a valores máximos

de rendimento de grãos entre 2000 e 2500kg 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, contudo não afetou a dispersão dos valores em torno dessa 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 frequentes, levando a cultura a produzir uma quantidade que, embora menor que os valores mínimos de outros cenários, foi ainda apreciável (Figura 4).

Em decorrência desses 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.

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

- A uniformidade da umidade do solo, embora dependente da uniformidade da lâmina aplicada, foi consideravelmente maior que essa, nas condições estudadas. Além disso, 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 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 esse espaçamento implica em menor uso de componentes do sistema, isso torna a sua relação custo/benefício mais conveniente.

Referências

- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. *Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos*. Roma: FAO, 1979. (FAO. Riego y Drenaje, 33).
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 1999.
- 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.
- FRIZZONE, J. A. *Uniformidade e eficiência da irrigação*. Piracicaba: Esalq/Departamento de Engenharia Rural, 1998.
- GOHRING, R.T.; WALLENDER, W.W. Economics of sprinkler irrigation systems. *Trans. ASAE*, St. Joseph, 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. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.
- HART, W. E.; REYNOLDS, W. N. Analytical design of sprinkler systems. *Trans. ASAE*, St. Joseph, v.9, n.1, p.83-85, 89, 1965.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. *Sprinkle and trickle irrigation*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- LETEY J. et al. Optimum crop water application as affected by uniformity of water infiltration. *Agron. J.*, Madison, v.76, n.3, p.435-441, 1984.
- LIBARDI, P. L. et al. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v.20, p.1-12, 1996.
- LI, J.; KAWANO, H. The areal distribution of soil moisture under sprinkler irrigation. *Agric. Water Manag.*, Amsterdam, v.32, p. 29- 36, 1996.
- MANTOVANI, E. C. *Desarrollo y evaluación de modelos para el manejo del riego: estimación de la evapotranspiración y efectos de la uniformidad de aplicación del riego sobre la producción de los cultivos*. 1993. Tesis (Doctor) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidade de Córdoba, Córdoba, 1993.
- MATEOS, L. et al. Cotton response to non-uniformity of conventional sprinkler irrigation. *Irrig. Sci.*, Berlin, v.17, p.47-52, 1997.
- REZENDE, R. et al. Uniformidade da irrigação por aspersão acima e abaixo da superfície do solo e seu efeito sobre a produção da cultura do feijoeiro. In: JORAJURIA, C. D. et al. (Ed.). *Avances en ingeniería agrícola*, Buenos Aires Argentina Editorial Facultad Agronomía, 2000, p. 290-295.
- SOLOMON, K. H. Yield related interpretations of irrigation uniformity and efficiency measures. *Irrig. Sci.*, Berlin, v.5, n.3, p.161-172, 1984.

VON BERNUTH, R. D. Uniformity design criteria under limited water. *Trans. ASAE*, St. Joseph, v.26, n.5, p.1418-1421, 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.

Received on April 03, 2003.

Accepted on May 30, 2003.