
COMPARAÇÃO DE EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DA UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE ÁGUA PARA DIFERENTES SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

Fernando França da Cunha¹, Carlos Augusto Brasileiro de Alencar², Marcelo Rossi Vicente³, Rafael Oliveira Batista⁴, José Antônio Rodrigues de Souza⁵

RESUMO

Objetivou-se, no presente trabalho, comparar as equações de cálculo da uniformidade de aplicação de água e apontar as que melhor relacionam ao conceito de área adequadamente irrigada (AAI) para diversos sistemas de irrigação. Utilizaram-se os sistemas de aspersão convencional, pivô com emissores lepa, pivô com aspersor convencional, microaspersão e gotejamento. A uniformidade de distribuição de água foi medida em 20 equipamentos, de cada um dos sistemas de irrigação. As equações utilizadas foram: coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), de distribuição (CUD), absoluto (CUA), estatístico (CUE), de Hart (CUH), de Benami e Hore (CUBH) e eficiência padrão da HSPA (UDH). Obteve-se a AAI para obtenção do coeficiente de regressão da reta em cada avaliação. Em termos de análise estatística, considerou o CUC e o CUD as equações padrão para irrigação por aspersão e localizada, respectivamente. A comparação foi feita com auxílio do teste t para dados pareados. Com exceção do CUBH, todas as equações tiveram relação ao conceito de área adequadamente irrigada. Em relação aos sistemas de irrigação por aspersão, os valores de uniformidade calculados utilizando-se o valor do CUC não diferiram dos valores calculados utilizando o CUBH e foram superiores aos calculados utilizando-se as demais equações estudadas. Em relação aos sistemas de irrigação localizada, o CUD não diferiu dos valores encontrados pelo CUH e UDH, e apresentaram valores superiores aos obtidos utilizando-se as demais equações avaliadas.

Palavras-chave: coeficientes de uniformidade, área adequadamente irrigada, irrigação por aspersão, irrigação localizada.

ABSTRACT

COMPARISON OF EQUATIONS FOR CALCULATION OF THE APPLICATION UNIFORMITY OF WATER FOR DIFFERENT SYSTEMS OF IRRIGATION

It was aimed, in the present work, to compare the equations of calculation of the application uniformity of water and that they are related to the concept of area being adequately irrigated (ABAI), for several irrigation systems. The systems of conventional sprinkler, central pivot with originators type lepa, central pivot with conventional originators, micro-sprinkler and drip irrigation. It was evaluated 20 equipments by means of the test of uniformity of water distribution. The used equations were: coefficient of uniformity of Christiansen (CU), of distribution (DU), absolute (UA), statistical (UE), of Hart (UH), of Benami and Hore (UBH) and standard of HSPA efficiency (DH). In each evaluation, ABAI was obtained to generate the coefficient of regression of the straight line. For statistical analysis, it considered CU and DU the equations pattern for sprinkler and trickle irrigation, respectively. The comparison was with aid of the test "t". Except for CUBH, all the other equations presented relationship with the concept of ABAI. For the sprinkler irrigation, the uniformity values calculated by CU didn't differ of the values calculated by UBH and they went larger to the calculated by the other studied equations. For the trickle irrigation, DU didn't differ of the values found by UH and DH, and they presented larger values the other appraised equations.

Keywords: uniformity coefficients, appropriately irrigated area, sprinkler irrigation, trickle irrigation.

Recebido para publicação em 12/09/2008. Aprovado em 23/07/2009

- 1 Engenheiro Agrônomo, Doutor em Engenharia Agrícola, DEA/UFV, Viçosa-MG, e-mail: fcinha@vicosa.ufv.br
2 Engenheiro Agrícola, Doutor em Engenharia Agrícola, DEA/UFV, Viçosa-MG, e-mail: brasileiro@yahoo.com.br
3 Engenheiro Agrônomo, Doutor em Engenharia Agrícola, DEA/UFV, Viçosa-MG, e-mail: marcelo@irriga.com.br
4 Engenheiro Agrícola, Doutor em Engenharia Agrícola, DEA/UFV, Viçosa-MG, e-mail: eng.batista@gmail.com
5 Engenheiro Agrícola, Doutor em Engenharia Agrícola, DEA/UFV, Viçosa-MG, e-mail: jarstec@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

A irrigação é a maior usuária dos recursos hídricos e, no final do século passado, foi duramente criticada e responsabilizada pela escassez de água e de energia elétrica em algumas regiões do Brasil. Porém a irrigação é fundamental para que o Brasil continue a aumentar sua produção e produtividade, gerar empregos e excedentes exportáveis. As críticas dirigidas à irrigação, divulgadas pela mídia, induziram a sociedade a formar uma opinião distorcida sobre o uso desta técnica, não mostrando às populações os seus benefícios, como o aumento de produtividade e qualidade dos alimentos. Nos dias atuais, cerca de 40% da produção mundial de alimentos e fibras provêm de áreas irrigadas.

A utilização de sistemas de irrigação mais eficientes é uma meta a ser atingida na agricultura irrigada. Por melhor que seja o sistema de irrigação, a distribuição da água aplicada dificilmente será plenamente uniforme, e a mensuração dessa variabilidade é fundamental na avaliação do desempenho da irrigação (SILVA et al., 2004). Em geral, o aumento da uniformidade de distribuição da água requer investimentos na melhoria do sistema, em manutenção e em mão-de-obra.

O desempenho de qualquer método de irrigação pode ser medido utilizando-se parâmetros de uniformidade e de eficiência da água aplicada pelo sistema de irrigação. Segundo Hart et al. (1980), quando as perdas por escoamento superficial na área de cultivo e as perdas por condução no trajeto entre o ponto de captação e a área irrigada são desconsideradas, o desempenho da irrigação pode ser determinado utilizando-se um índice de uniformidade e dois índices de eficiência. O índice de uniformidade expressa a variabilidade espacial da água aplicada e os dois índices de eficiência refletem o percentual da área adequadamente irrigada e a eficiência alcançada na aplicação da água. Esses indicadores de desempenho podem ser obtidos diretamente dos valores de lâmina de água, medidos pontualmente, ou por meio de modelos matemáticos (SILVA et al., 2004).

Conceitualmente, considera-se área adequadamente irrigada a porcentagem da área que, durante uma irrigação, recebe lâmina d'água igual ou superior à lâmina real necessária (KELLER & BLIESNER, 1990). A eficiência de irrigação para área adequadamente irrigada é um parâmetro que combina os valores obtidos para uniformidade de aplicação de água, a adequação da irrigação e as perdas

que normalmente ocorrem no sistema. Assim, a eficiência de irrigação para área adequadamente irrigada congrega os efeitos associados às perdas por desuniformidade de aplicação, por percolação, por evaporação e deriva e na condução, representadas pelas eficiências de distribuição, aplicação e condução, respectivamente.

Muitos coeficientes são usados para expressar a variabilidade de distribuição da água aplicada por um sistema de irrigação. O primeiro deles foi proposto por Christiansen (1942) e adota o desvio médio absoluto como medida de dispersão (Coeficiente de Uniformidade de Christiansen - CUC). Criddle et al. (1956) introduziram outra medida da uniformidade, considerando a razão entre a média do menor quartil e a lâmina média coletada (Coeficiente de Uniformidade de Distribuição - CUD). Karmeli & Keller (1975) propuseram uma medida de uniformidade que inclui as razões das vazões máxima e mínima dos emissores com a média (Coeficiente de Uniformidade Absoluto - CUA). Wilcox & Swailes (1947) propuseram um coeficiente de uniformidade utilizando o desvio-padrão como medida de dispersão, para o qual se aceitam valores acima de 75% (Coeficiente de Uniformidade Estatístico - CUE). Já Hart (1961) propôs um coeficiente de uniformidade usando, também, o desvio-padrão como medida de dispersão (Coeficiente de Uniformidade de Hart - CUH). Quando a lâmina de água aplicada pelos aspersores tem distribuição normal, tem-se que o CUC é igual ao CUH. O último autor propôs, ainda, outro coeficiente para representar a uniformidade de distribuição da água conhecido como eficiência padrão da HSPA (Eficiência Padrão da HSPA - UDH) sendo que, quando a lâmina de irrigação aplicada tem distribuição normal, o CUD é igual à UDH. Benami & Hore (1964) propuseram uma medida de uniformidade que inclui a razão da média de grupos com vazões superiores e inferiores à média coletada (Coeficiente de Uniformidade de Benami e Hore - CUBH).

Apesar da existência de várias equações para obtenção da uniformidade dos sistemas de irrigação, não existe estudo que relacione esses distintos coeficientes com o conceito de área adequadamente irrigada, o que facilitaria melhor interpretação dos resultados. Diante disso, os objetivos deste trabalho foram comparar as equações utilizadas no cálculo da uniformidade de aplicação de água e apontar quais estão relacionadas ao conceito de área adequadamente irrigada, para diversos sistemas de irrigação.

MATERIAL E MÉTODOS

Os sistemas de irrigação avaliados foram: aspersão convencional, pivô central equipado com emissores lepa, pivô central equipado com emissores convencional, microaspersão e gotejamento. Os sistemas de irrigação por aspersão foram avaliados nos Municípios de Paracatu-MG e Barreiras-BA, e os sistemas de irrigação localizada em Jaíba-MG. Para cada sistema, avaliou-se 20 equipamentos por meio do teste de uniformidade de distribuição da água, em horário distintos.

Para a determinação da uniformidade de distribuição de água dos sistemas de irrigação, foi utilizado o kit de uniformidade, que é constituído de pluviômetros, hastes e proveta graduada. No sistema de irrigação por aspersão, a área entre os aspersores foi dividida em subáreas retangulares de dimensões de 9 m². Os coletores foram colocados no centro de cada subárea, sendo que o volume coletado representou a precipitação em cada subárea. Nos sistemas de irrigação por microaspersão e gotejamento, a uniformidade de distribuição de água foi determinada utilizando-se a metodologia proposta por Merriam & Keller (1978), modificada por Denículi et al. (1980). Para isso, foram selecionadas no mesmo setor de irrigação, quatro linhas laterais e em cada linha oito microaspersores ou gotejadores, totalizando em 32 pontos amostrados. Apenas no sistema de irrigação por microaspersão não foi utilizado o kit uniformidade, pois foi avaliado somente a vazão de cada microaspersor. Dessa forma, optou-se por um recipiente com volume maior. Nos sistemas de irrigação por pivô central, foram instaladas duas malhas de coletores distanciadas com ângulo de 3°, sendo que na mesma malha de coletores, os pluviômetros ficaram espaçados em 3 m.

Os volumes coletados nos pluviômetros foram convertidos em lâminas d'água, dividindo o volume coletado pela área de captação do coletor. A evaporação de água foi quantificada por um pluviômetro de volume inicial conhecido, sendo que, no final dos testes, foi feita a leitura no mesmo pluviômetro, em que a diferença correspondeu à evaporação durante a realização dos testes. Esta diferença foi acrescida à leitura dos pluviômetros. Para os sistemas de irrigação por pivô central, o tempo de coleta foi aquele gasto para que o pivô juntamente com o jato dos emissores passasse sobre o pluviômetro. Nos demais sistemas, o tempo dos testes foi maior ou igual a metade do tempo em que o sistema de irrigação funcionava

durante as irrigações praticadas pelos irrigantes.

De posse aos dados coletados, calculou-se a uniformidade de aplicação de água por meio dos coeficientes de uniformidade CUC, CUD, CUA, CUE, CUH, UDH e CUBH utilizando-se as Equações 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, respectivamente. No que se refere ao sistema de irrigação por pivô central, foi utilizado a metodologia de ponderação segundo Bernardo et al. (2006). Uma vez que cada coletor representa maior área, à medida que se afasta do centro do pivô, têm-se que ponderar os valores coletados. O fator de ponderação foi o número de ordem do coletor.

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

em que

CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen (CHRISTIANSEN, 1942), em %;

X_i = precipitação observada nos coletores, em mm;

\bar{X} = média das precipitações, em mm; e

n = número de coletores.

$$CUD = 100 \frac{X_{25\%}}{\bar{X}} \quad (2)$$

em que

CUD = coeficiente de uniformidade de distribuição (CRIDDLE et al., 1956), em %;

$X_{25\%}$ = média de 25% do total de coletores, com as menores precipitações, em mm; e

\bar{X} = média das precipitações, em mm.

$$CUA = 50 \left[\frac{X_{25\%}}{\bar{X}} + \frac{\bar{X}}{X_{12,5\%}} \right] \quad (3)$$

em que

CUA = coeficiente de uniformidade absoluto (KARMELI & KELLER, 1975), em %;

$X_{25\%}$ = média de 25% do total de coletores, com as menores precipitações, em mm;

$X_{12,5\%}$ = média de 12,5% do total de coletores, com as maiores precipitações, em mm; e

\bar{X} = média das precipitações, em mm.

$$CUE = 100 \left[1 - \frac{S}{\bar{X}} \right] \quad (4)$$

em que

CUE = coeficiente de uniformidade estatístico (WILCOX & SWAILES, 1947), em %;

S = desvio-padrão dos dados de precipitação, em mm; e

\bar{X} = média das precipitações, em mm.

$$CUH = 100 \left\{ 1 - \sqrt{\frac{2}{\pi} \left(\frac{S}{\bar{X}} \right)} \right\} \quad (5)$$

em que

CUH = coeficiente de uniformidade de Hart (HART, 1961), em %;

S = desvio-padrão dos dados de precipitação, em mm;

e

\bar{X} = média das precipitações, em mm.

$$UDH = 100 \left(1 - 1,27 \frac{S}{\bar{X}} \right) \quad (6)$$

em que

UDH = eficiência padrão da HSPA (HART, 1961), em %;

S = desvio-padrão dos dados de precipitação, em mm; e

\bar{X} = média das precipitações, em mm.

$$CUBH = 166 \frac{N_A}{N_B} \left[\frac{2 T_B + D_B M_B}{2 T_A + D_A M_A} \right] \quad (7)$$

em que

CUBH = coeficiente de uniformidade de Benami e Hore (BENAMI & HORE, 1964), em %;

M_A = média do grupo de dados de precipitação acima da média geral, em mm;

M_B = média do grupo de dados de precipitação abaixo da média geral, em mm;

D_A = diferença entre o número de dados de precipitação abaixo e acima de M_A , em decimal;

D_B = diferença entre o número de dados de precipitação abaixo e acima de M_B , em decimal;

N_A = número de dados de precipitação acima da média geral, em decimal;

N_B = número de dados de precipitação abaixo da média geral, em decimal;

T_A = soma dos dados de precipitação acima de M_A , em mm; e

T_B = soma dos dados de precipitação abaixo de M_B , em mm.

A obtenção da área adequadamente irrigada (AAI) em cada avaliação foi realizada de acordo com a porcentagem da área que recebeu uma lâmina d'água igual ou superior à lâmina real necessária (KELLER & BLIESNER, 1990). Observa-se, na Figura 1, que no eixo das abscissas estão os valores de área acumulada e nas ordenadas a relação entre a lâmina coletada e a lâmina média. Quanto menor for a uniformidade de aplicação de água, maior será a inclinação da reta ajustada, pois, maior quantidade de área à esquerda da figura receberá maior lâmina de irrigação e maior quantidade de área à direita da figura receberá menor lâmina de irrigação. O aumento na inclinação da reta resulta em um maior coeficiente de regressão da reta (β_1), em módulo. Diante disso, a equação que melhor representa a uniformidade de aplicação de água de um sistema de irrigação será aquela que obtiver aumento no coeficiente de regressão, em módulo, dado pelo gráfico da AAI, implicará num menor coeficiente de uniformidade de aplicação de água.

Em cada teste de avaliação da uniformidade de aplicação de água, foi obtido o valor de uniformidade pelas 7 equações avaliadas no trabalho e o gráfico da AAI e ajustado uma regressão linear de 1º grau. De posse desses valores, para cada sistema de irrigação e equação avaliada, plotou-se na abscissa os valores do coeficiente de regressão β_1 e nas ordenadas os valores de uniformidade. Esses dados foram submetidos às análises de regressão. A escolha da equação que melhor combina o valor da uniformidade de aplicação de água com a AAI foi baseada na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste t e no coeficiente de determinação (r^2). Para comparar as equações, considerou o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) a equação padrão para os sistemas de irrigação por aspersão e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) a equação padrão para os sistemas de irrigação localizada. As comparações foram realizadas com auxílio do teste t para dados pareados utilizando 1% de significância. Para execução das análises estatísticas, foi utilizado o programa estatístico SAEG 9.0.

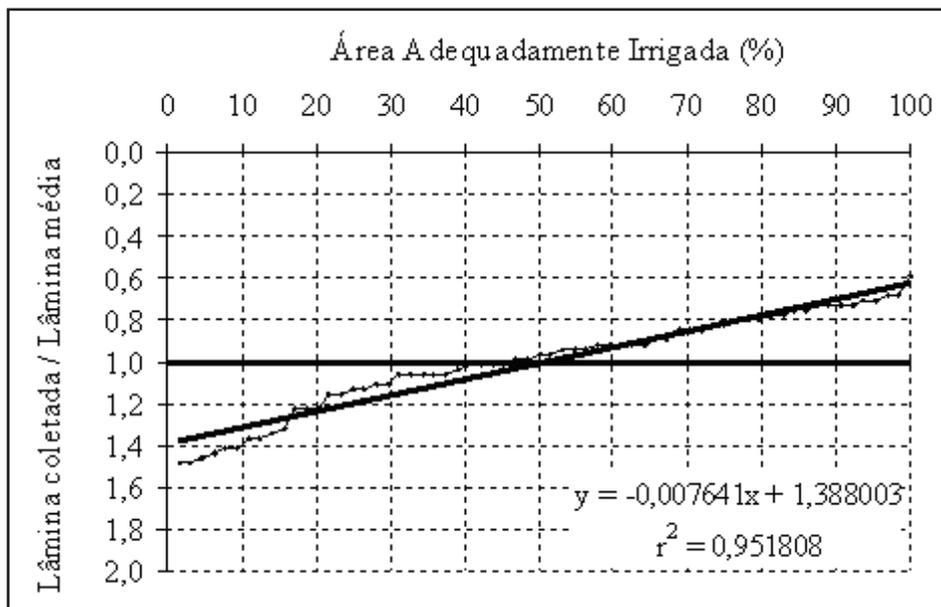
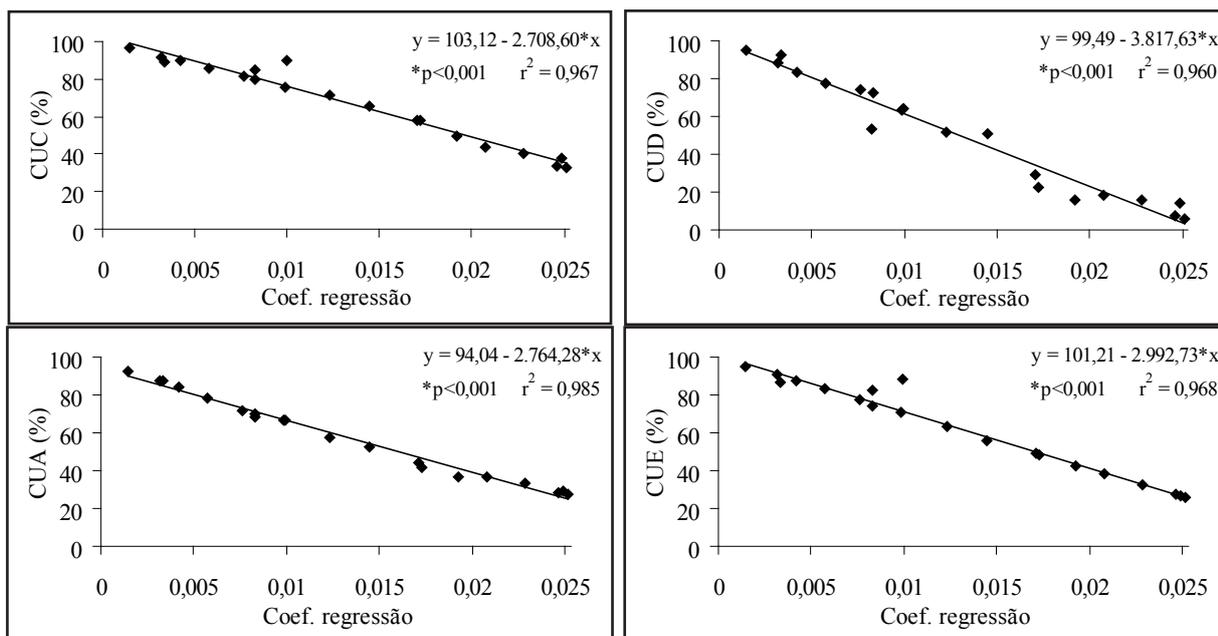


Figura 1. Relação da lâmina coletada e média, e ordenada de forma decrescente, em função da fração acumulada de área irrigada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No sistema de irrigação por aspersão convencional, com exceção do coeficiente de uniformidade de Benami e Hore (CUBH), todos os modelos ajustados tiveram seus coeficientes de regressão abaixo de 0,1% de probabilidade (Figura 2). Observou-se, também, que apenas o CUBH apresentou coeficiente de determinação (r^2) menor que 90%. As demais equações avaliadas com as quais se calcula a uniformidade de aplicação de água ficaram com r^2 acima de 90%, mostrando que com a redução na uniformidade

há aumento no coeficiente de regressão, em módulo, retirado do gráfico da área adequadamente irrigada (AAI). Baseando nos valores de r^2 , as melhores equações que calculam a uniformidade de aplicação de água relacionada ao coeficiente de regressão retirado do gráfico da AAI, em ordem decrescente, foram: coeficiente de uniformidade absoluto (CUA), coeficiente de uniformidade estatístico (CUE), coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), eficiência padrão da HSPA (UDH), coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e coeficiente de uniformidade de Hart (CUH), respectivamente.



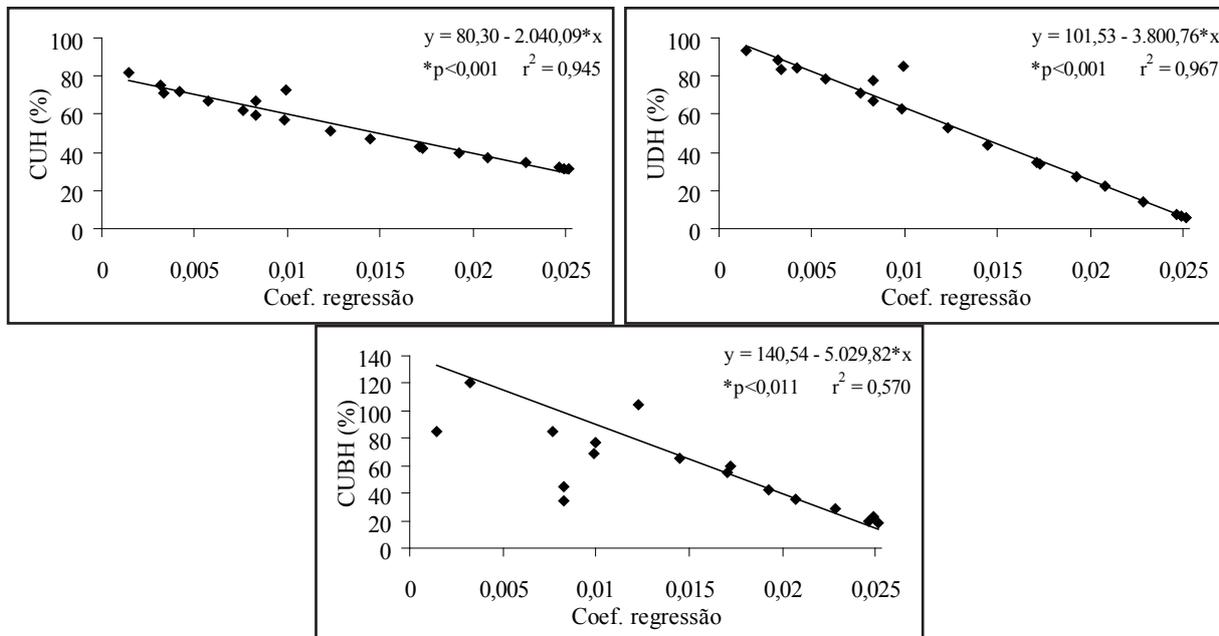
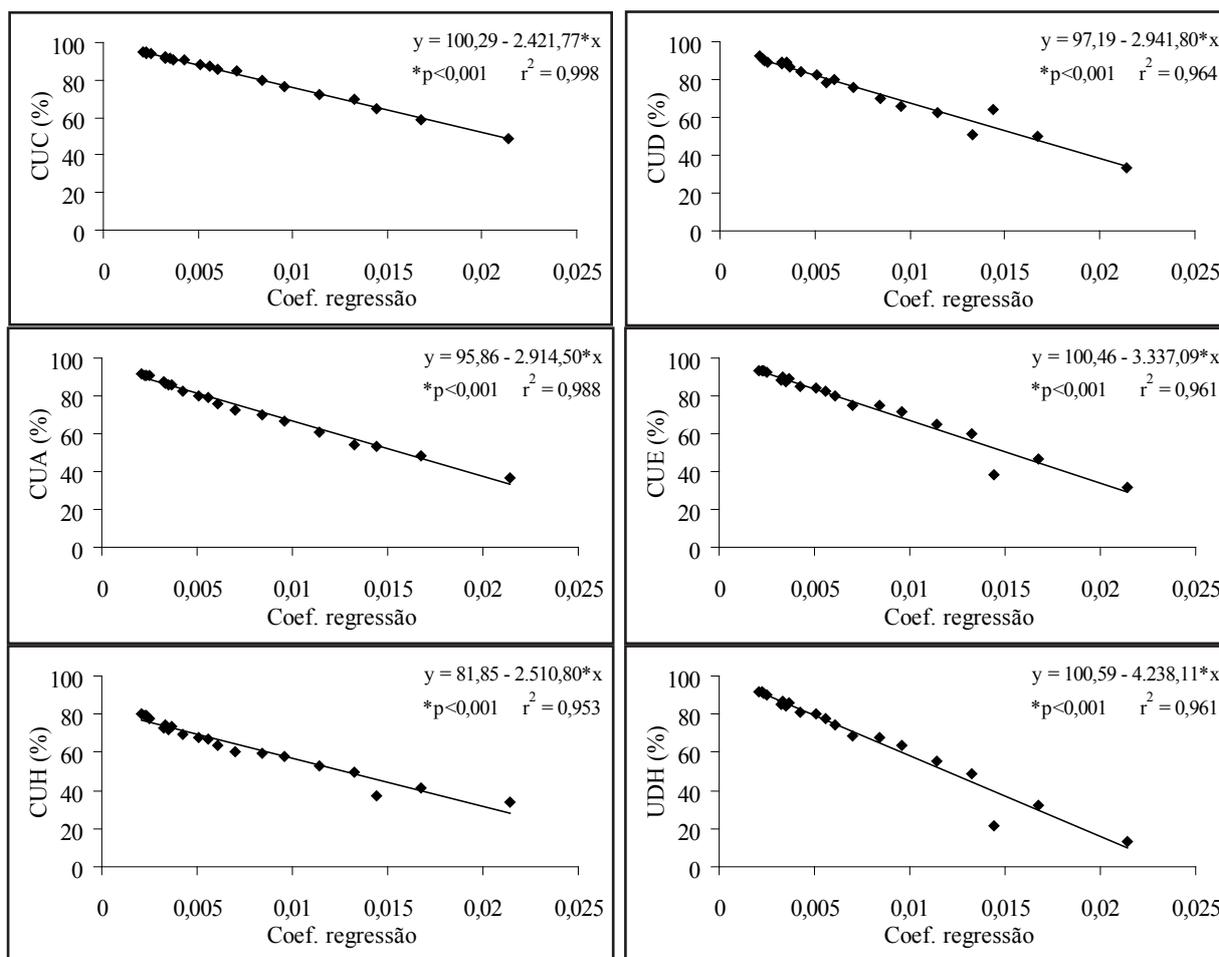


Figura 2. Regressões e coeficientes de determinação (r^2) de coeficientes de uniformidade (em %), em função dos coeficientes de regressão retirados do gráfico da AAI, em módulo (em decimal), para o sistema de irrigação por aspersão convencional.



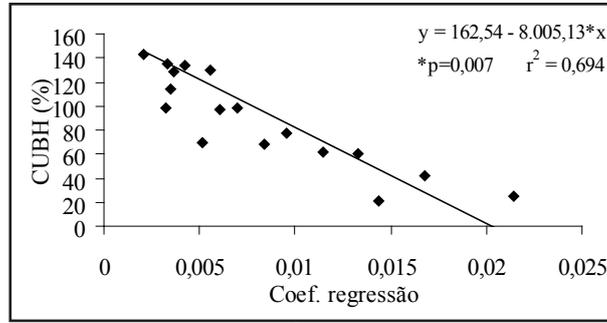


Figura 3. Regressões e coeficientes de determinação (r^2) de coeficientes de uniformidade (em %), em função dos coeficientes de regressão retirados do gráfico da AAI, em módulo (em decimal), para o sistema de irrigação por pivô central equipado com emissores lepa.

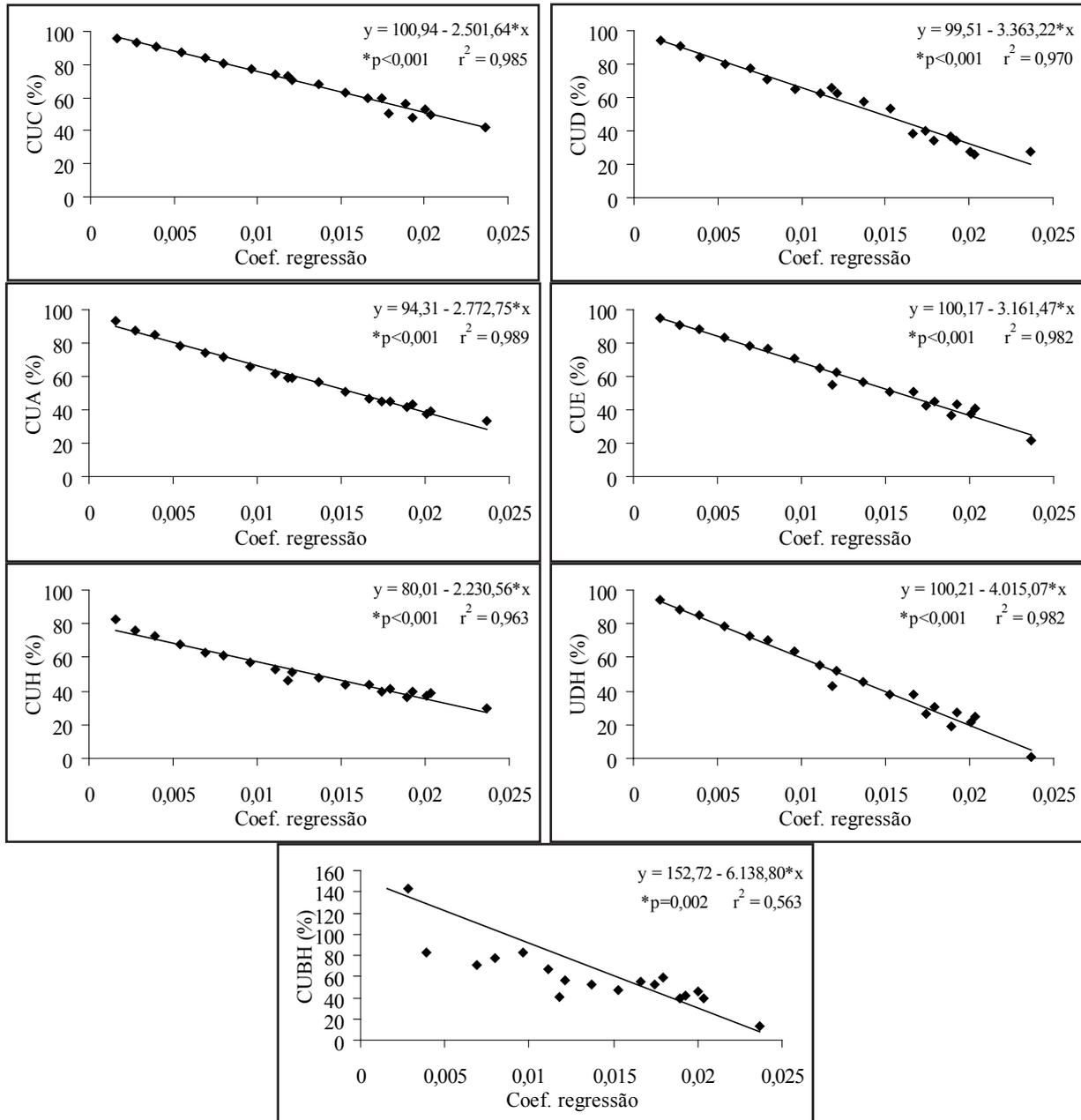


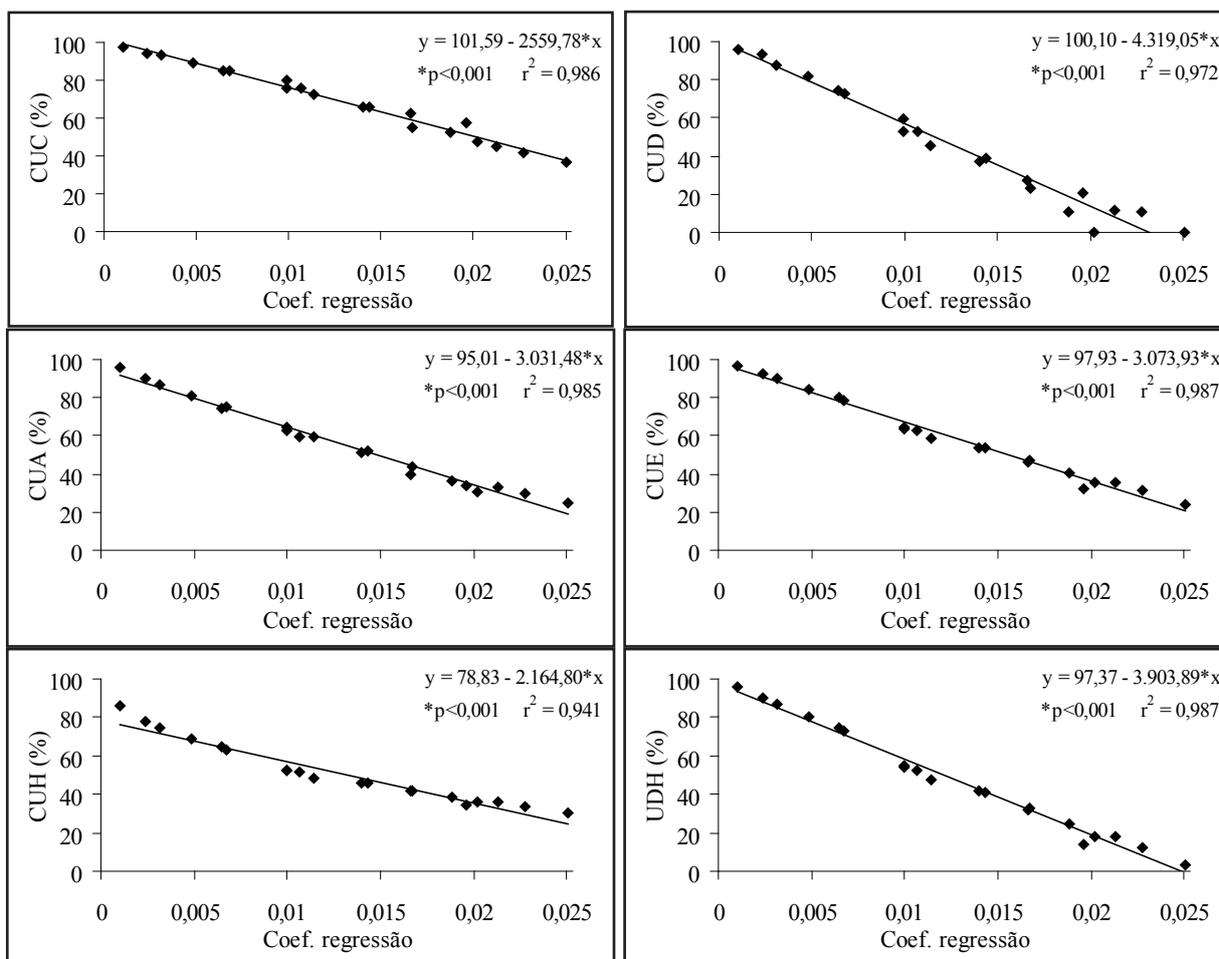
Figura 4. Regressões e coeficientes de determinação (r^2) de coeficientes de uniformidade (em %), em função dos coeficientes de regressão retirados do gráfico da AAI, em módulo (em decimal), para o sistema de irrigação por pivô central equipado com emissores convencional.

No sistema de irrigação por pivô central equipado com emissores lepa, apenas o CUBH apresentou coeficiente de regressão acima de 0,1% de probabilidade e r^2 menor que 90% (Figura 3). As demais equações avaliadas apresentaram coeficiente de regressão inferior a 0,1% de probabilidade e r^2 acima de 90%. Baseando nos valores de r^2 , as melhores equações com as quais se pode calcular a uniformidade de aplicação de água relacionada ao coeficiente de regressão retirado do gráfico da AAI, em ordem decrescente para o sistema de irrigação por pivô central equipado com emissores lepa, foram: CUC, CUA, CUD CUE, UDH e CUH.

No sistema de irrigação por pivô central equipado com emissores convencional, apenas o CUBH apresentou o coeficiente de regressão acima de 0,1% de probabilidade e r^2 menor que 90% (Figura 4). As demais equações avaliadas apresentaram coeficiente de regressão inferior

a 0,1% de probabilidade e r^2 acima de 90%. Baseando nos valores de r^2 , as melhores equações que calculam a uniformidade de aplicação de água relacionado ao coeficiente de regressão retirado do gráfico da AAI, em ordem decrescente para o sistema de irrigação por pivô central equipado com emissores lepa, foram: CUA, CUC, CUE, UDH, CUD e CUH.

No sistema de irrigação por microaspersão, apenas o CUBH apresentou coeficiente de regressão acima de 0,1% de probabilidade e r^2 menor que 90% (Figura 5). As demais equações avaliadas apresentaram coeficiente de regressão inferior a 0,1% de probabilidade e r^2 acima de 90%. Baseando nos valores de r^2 , as melhores equações que calculam a uniformidade de aplicação de água relacionada ao coeficiente de regressão retirado do gráfico da AAI, em ordem decrescente para o sistema de irrigação por microaspersão, foram: CUE, UDH, CUC, CUA, CUD e CUH.



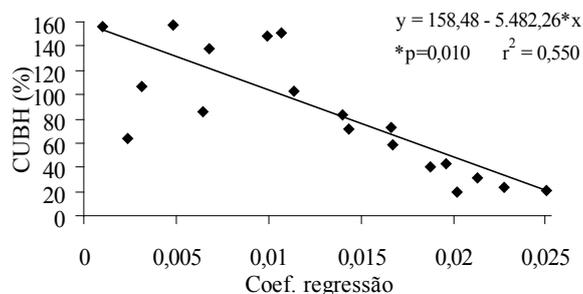


Figura 5. Regressões e coeficientes de determinação (r^2) de coeficientes de uniformidade (em %), em função dos coeficientes de regressão retirados do gráfico da AAI, em módulo (em decimal), para o sistema de irrigação por microaspersão.

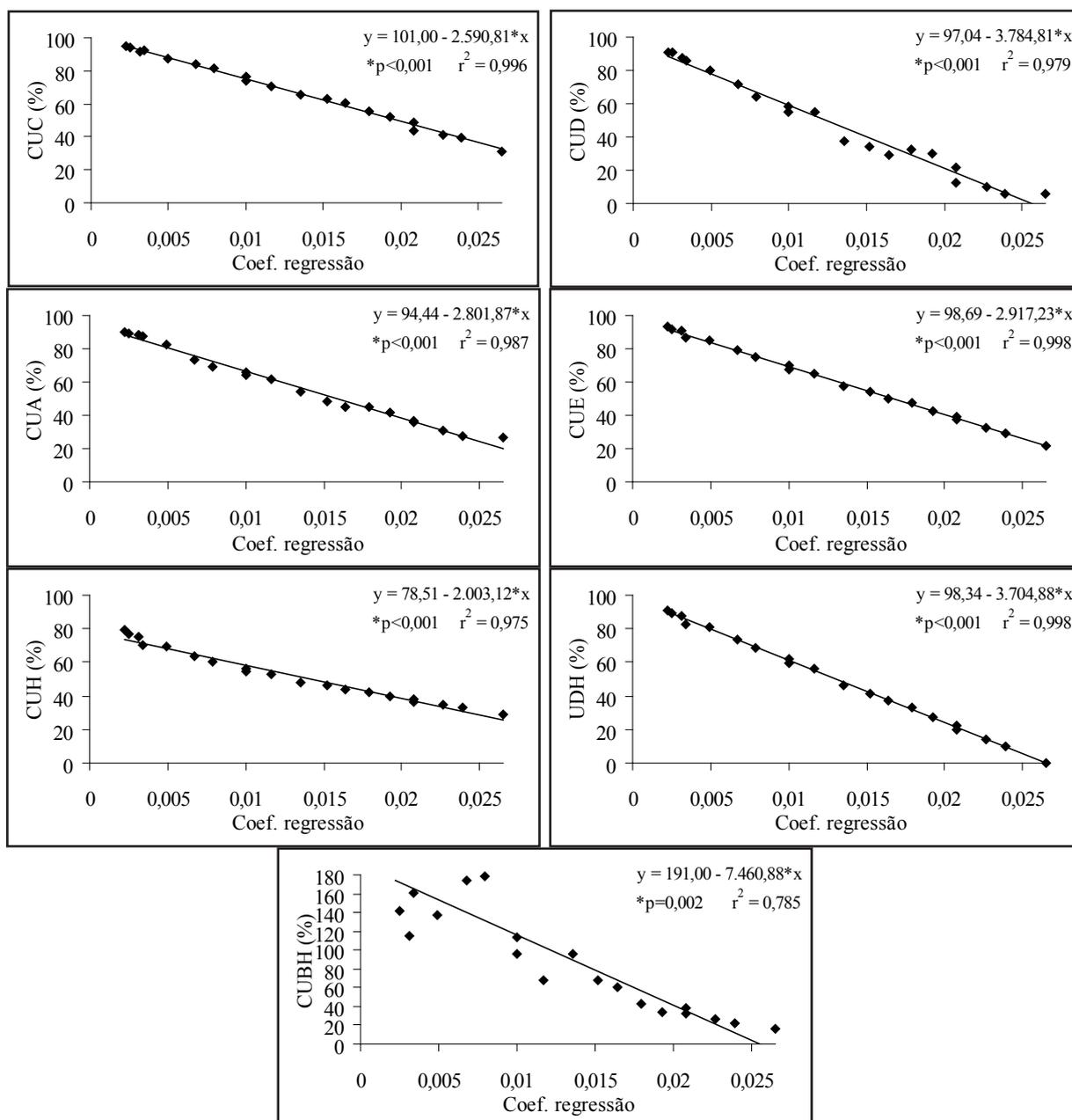


Figura 6. Regressões e coeficientes de determinação (r^2) de coeficientes de uniformidade (em %), em função dos coeficientes de regressão retirados do gráfico da AAI, em módulo (em decimal), para o sistema de irrigação por gotejamento.

Da mesma forma do que foi observado em relação a outros sistemas de irrigação, no sistema de irrigação por gotejamento, apenas o CUBH apresentou o coeficiente de regressão acima de 0,1% de probabilidade e r^2 menor que 90% (Figura 6). As demais equações apresentaram significância do coeficiente de regressão abaixo de 0,1% de probabilidade e r^2 maior que 90%. Baseando nos valores de r^2 , as melhores equações com as quais se pode calcular a uniformidade de aplicação de água relacionado ao coeficiente de regressão retirado do gráfico da AAI, em ordem decrescente, foram: CUE, UDH, CUC, CUA, CUD e CUH. Nota-se que a seqüência de equações encontrada para gotejamento foi a mesma que a obtida em outro sistema de irrigação localizada.

No Quadro 1 estão apresentadas a comparação entre o CUC e as demais equações estudadas para o sistema de irrigação por aspersão. Devido à heterogeneidade encontrada no valor do CUBH e, consecutivamente seu

alto desvio-padrão, seus valores não diferiram ($p > 0,01$) dos valores calculados utilizando o CUC. As demais equações utilizadas para cálculo da uniformidade de aplicação de água apresentaram valores menores ($p < 0,01$) que os calculados utilizando-se o CUC. Diversos trabalhos apresentados na literatura mostram que o CUC proporciona maior valor de uniformidade que o CUD (COSTA, 2006; ROCHA et al., 1999; REZENDE et al., 1998; entre outros). Rezende (1992) afirma que o fato do CUD ser sempre menor que CUC é inerente às variáveis das equações utilizadas na determinação desses coeficientes, pois no cálculo de CUD consideram-se apenas 25% da área que recebeu menos água. Essas conclusões foram afirmadas por Keller & Bliesner (1990) que acrescentaram que CUD pode estar relacionado ao CUC pela expressão:

$$CUD = 100 - 1,59 (100 - CUC) \quad (8)$$

Quadro 1. Valores de uniformidade de aplicação de água calculado por diferentes equações para testes realizados no sistema de irrigação por aspersão

Teste	Equações						
	CUC	CUD	CUA	CUE	CUH	UDH	CUBH
1	96,71	95,36	92,75	94,65	81,54	93,20	84,76
2	91,96	88,23	87,69	90,62	75,56	88,09	119,96
3	89,25	92,88	87,84	86,83	71,04	83,27	211,66
4	89,65	83,21	84,39	87,66	71,97	84,33	163,48
5	86,05	77,33	78,61	83,05	67,15	78,47	156,84
6	81,68	73,77	72,02	77,22	61,91	71,06	85,18
7	85,16	52,97	67,97	82,43	66,56	77,69	34,63
8	79,85	72,86	69,70	73,92	59,26	66,88	44,95
9	75,89	63,36	66,36	71,00	57,03	63,17	68,47
10	90,31	63,90	66,34	88,21	72,61	85,03	77,38
11	71,51	51,56	57,25	62,96	51,44	52,96	104,68
12	65,71	50,48	52,29	55,74	46,92	43,78	65,45
13	57,64	29,14	43,87	48,76	42,89	34,92	55,13
14	58,18	22,77	41,44	48,04	42,49	34,01	59,55
15	49,81	16,18	37,03	42,58	39,54	27,08	42,98
16	44,11	18,10	36,96	38,67	37,51	22,11	36,14
17	40,41	16,14	33,58	32,54	34,47	14,32	28,77
18	33,29	7,69	28,68	27,40	32,01	7,80	19,75
19	37,55	14,38	28,76	26,60	31,64	6,78	23,41
20	32,58	5,64	27,64	26,10	31,41	6,15	18,09
\bar{X}	67,86	49,80	58,06	62,25	53,75	52,06	75,06
S	21,88	30,94	22,12	24,17	16,67	30,70	52,93
$S \text{ dif.}$	-	11,77	5,57	3,07	6,43	9,11	40,58
$p\text{-valor}$	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,4374

\bar{X} - média amostral; S - desvio padrão amostral; $S \text{ dif.}$ - desvio padrão da diferença dos valores da coluna com os da equação padrão (CUC); $p\text{-valor}$ - comparação das equações com a padrão (CUC) pelo teste t, valores acima de 0,01 significa que a equação comparada é semelhante a equação padrão e valores abaixo de 0,01 é diferente.

Rocha et al. (1999), trabalhando com o sistema de irrigação por aspersão e avaliando a uniformidade de aplicação de água utilizando diferentes equações, observou, em três testes, que os valores calculados se apresentaram na seguinte ordem decrescente: CUC, CUH, CUE, CUD e UDH, respectivamente. No presente trabalho, o CUE proporcionou maior média em relação ao CUH, porém nos testes de menor uniformidade, verificou-se que o CUH proporcionou maiores valores em relação ao CUE.

No Quadro 2 estão apresentadas comparações entre os valores de CUC e os obtidos utilizando-se as demais equações estudadas para o sistema de irrigação por pivô central equipado com emissores lepa. Os valores de uniformidade calculados utilizando-se o CUBH não diferiram ($p>0,01$) dos valores encontrados utilizando-se o CUC, para um mesmo teste. As demais equações utilizadas para cálculo da uniformidade de aplicação de água apresentaram valores menores ($p<0,01$) que os calculados utilizando-se o CUC.

Semelhante ao acontecido para os outros sistemas

de irrigação por aspersão, verificou-se para o sistema de irrigação por pivô central equipado com emissores convencional que a equação para cálculo da uniformidade de aplicação de água, CUBH, devido à sua heterogeneidade e, conseqüentemente, alto desvio-padrão, não diferiu ($p>0,01$) dos valores encontrados utilizando-se o CUC, para um mesmo teste (Quadro 3). Já as demais equações estudadas, apresentaram valores inferiores ($p<0,01$) que os encontrados pelo CUC.

No Quadro 4, verifica-se, para o sistema de irrigação por microaspersão, que as equações para cálculo da uniformidade de aplicação de água, CUH e UDH não diferiram ($p>0,01$) dos valores encontrados quando utilizado o CUD. Já as demais equações estudadas, apresentaram valores superiores ($p<0,01$) que os encontrados quando se utilizou o CUD. Barreto Filho et al. (2000), utilizando as equações CUD e CUE para avaliarem a uniformidade de aplicação de água em três culturas por microaspersão, verificaram, também, que os valores obtidos quando foi utilizado o CUD foram inferiores aos obtidos quando utilizado o CUE.

Quadro 2. Valores de uniformidade de aplicação de água calculado por diferentes equações para testes realizados no sistema de irrigação por pivô central equipado com emissores lepa

Teste	Equações						
	CUC	CUD	CUA	CUE	CUH	UDH	CUBH
1	95,05	92,30	91,50	93,57	79,77	91,84	143,60
2	94,64	91,07	90,93	93,30	79,35	91,49	166,25
3	94,40	90,13	90,94	93,11	79,05	91,25	199,88
4	93,91	88,99	90,42	92,26	77,80	90,17	210,50
5	92,12	89,29	87,30	88,60	73,05	85,52	97,75
6	91,91	88,67	87,00	89,71	74,41	86,93	135,55
7	91,63	88,79	85,67	87,50	71,80	84,13	114,58
8	90,94	86,31	85,95	89,21	73,79	86,29	128,25
9	90,82	84,08	82,82	85,24	69,35	81,26	134,36
10	88,10	82,90	79,89	84,08	68,17	79,78	69,40
11	87,24	77,95	78,80	82,50	66,62	77,77	130,16
12	86,02	80,14	76,02	79,67	64,03	74,18	97,12
13	84,88	76,08	72,41	75,29	60,33	68,61	98,00
14	79,78	69,88	70,35	74,66	59,84	67,82	68,19
15	76,85	65,84	66,85	71,58	57,46	63,90	77,32
16	71,97	62,56	60,68	64,88	52,72	55,40	61,84
17	69,51	51,14	54,41	59,73	49,37	48,85	60,24
18	64,66	64,56	53,72	38,14	37,25	21,44	20,47
19	58,67	49,79	48,51	46,52	41,65	32,09	42,06
20	48,81	33,26	37,04	31,85	34,13	13,45	25,11
\bar{X}	82,59	75,69	74,56	76,07	63,50	69,61	104,03
S	13,37	16,52	16,16	18,76	14,18	23,82	52,98
S dif.	-	4,54	3,49	6,22	3,25	11,02	42,53
p -valor	-	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0362

\bar{X} - média amostral; S - desvio padrão amostral; S dif. - desvio padrão da diferença dos valores da coluna com os da equação padrão (CUC); p -valor - comparação das equações com a padrão (CUC) pelo teste t, valores acima de 0,01 significa que a equação comparada é semelhante a equação padrão e valores abaixo de 0,01 é diferente.

Quadro 3. Valores de uniformidade de aplicação de água calculado por diferentes equações para testes realizados no sistema de irrigação por pivô central equipado com emissores convencional

Teste	Equações						
	CUC	CUD	CUA	CUE	CUH	UDH	CUBH
1	96,02	93,79	93,47	95,26	82,62	93,98	174,38
2	93,68	90,61	87,91	91,01	76,08	88,58	142,68
3	90,64	84,56	85,15	88,26	72,66	85,09	82,66
4	87,71	80,06	78,69	83,26	67,36	78,75	239,67
5	83,80	77,26	74,46	78,53	63,03	72,73	70,71
6	80,77	70,63	71,91	76,67	61,46	70,38	77,86
7	77,36	65,37	65,60	71,12	57,12	63,33	82,71
8	73,98	62,32	61,74	65,01	52,81	55,57	66,72
9	72,97	66,05	59,15	55,35	46,68	43,29	40,36
10	70,57	62,68	59,23	62,20	50,94	51,99	56,86
11	67,83	57,38	56,35	56,75	47,53	45,07	52,55
12	63,27	53,24	51,24	51,10	44,21	37,90	47,63
13	59,36	38,17	46,56	50,99	44,14	37,75	54,47
14	59,67	39,95	44,61	42,32	39,40	26,75	52,51
15	50,46	34,29	44,93	45,34	41,01	30,58	58,51
16	56,04	36,85	41,42	36,35	36,34	19,16	39,97
17	48,28	33,91	43,41	42,92	39,72	27,51	41,61
18	53,01	27,48	37,18	37,91	37,13	21,15	46,04
19	49,58	25,46	38,93	40,57	38,49	24,52	39,19
20	42,27	27,70	33,12	21,66	29,38	0,50	13,18
\bar{X}	68,86	56,39	58,75	59,63	51,41	48,73	74,01
S	16,43	22,26	18,18	20,80	14,82	26,42	53,33
S dif.	-	6,74	3,72	6,03	4,47	11,03	42,68
p -valor	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5957

\bar{X} - média amostral; S - desvio padrão amostral; S dif. - desvio padrão da diferença dos valores da coluna com os da equação padrão (CUC); p -valor - comparação das equações com a padrão (CUC) pelo teste t, valores acima de 0,01 significa que a equação comparada é semelhante a equação padrão e valores abaixo de 0,01 é diferente.

Quadro 4. Valores de uniformidade de aplicação de água calculado por diferentes equações para testes realizados no sistema de irrigação por microaspersão

Teste	Equações						
	CUC	CUD	CUA	CUE	CUH	UDH	CUBH
1	97,58	95,92	95,72	96,90	85,95	96,06	155,88
2	93,90	93,45	89,83	92,18	77,69	90,07	64,04
3	93,33	87,75	86,56	89,79	74,50	87,03	106,48
4	88,87	81,80	81,05	84,51	68,60	80,33	157,85
5	84,98	74,67	74,65	80,14	64,44	74,78	85,80
6	84,77	73,06	75,00	78,70	63,18	72,95	137,49
7	79,73	59,67	62,96	64,02	52,14	54,30	194,41
8	75,43	52,60	64,67	64,73	52,61	55,21	148,58
9	75,83	52,78	59,35	62,65	51,23	52,56	151,30
10	72,61	45,86	59,78	58,44	48,56	47,21	103,17
11	65,67	36,85	51,65	54,05	45,92	41,65	82,66
12	65,96	38,75	51,75	53,51	45,60	40,95	71,06
13	62,24	27,49	39,36	46,32	41,54	31,83	72,87
14	55,14	23,17	43,65	47,04	41,94	32,74	58,32
15	52,42	10,43	36,68	40,85	38,64	24,88	39,71
16	57,30	20,70	33,67	32,25	34,33	13,96	43,48
17	47,70	0,00	30,64	35,62	35,98	18,24	19,52
18	45,25	11,89	33,46	35,35	35,84	17,89	30,98
19	41,99	10,54	29,59	31,20	33,82	12,62	23,58
20	36,38	0,00	24,88	24,09	30,48	3,59	20,18
\bar{X}	68,85	44,87	56,25	58,62	51,15	47,44	88,37
S	18,67	31,73	22,12	22,41	16,16	28,46	53,56
S dif.	13,76	-	10,30	10,36	16,51	6,06	37,36
p -valor	0,0000	-	0,0001	0,0000	0,1052	0,0728	0,0001

\bar{X} - média amostral; S - desvio padrão amostral; S dif. - desvio padrão da diferença dos valores da coluna com os da equação padrão (CUD); p -valor - comparação das equações com a padrão (CUD) pelo teste t, valores acima de 0,01 significa que a equação comparada é semelhante a equação padrão e valores abaixo de 0,01 é diferente.

Quadro 5. Valores de uniformidade de aplicação de água calculado por diferentes equações para testes realizados no sistema de irrigação por gotejamento

Teste	Equações						
	CUC	CUD	CUA	CUE	CUH	UDH	CUBH
1	94,66	90,90	90,34	93,03	78,93	91,14	260,78
2	93,93	90,71	89,38	91,73	77,06	89,50	141,82
3	91,89	87,67	88,71	90,51	75,42	87,95	115,19
4	92,07	85,91	87,36	86,43	70,60	82,76	161,37
5	87,54	80,22	82,23	85,31	69,42	81,34	137,07
6	83,71	71,51	73,12	79,42	63,80	73,86	174,75
7	81,56	64,27	69,10	75,07	60,17	68,35	177,81
8	74,33	55,37	65,61	67,84	54,75	59,15	113,74
9	76,70	58,30	63,97	70,13	56,39	62,07	96,46
10	70,58	55,12	61,47	65,35	53,04	56,00	68,28
11	65,13	37,79	53,78	57,85	48,20	46,47	95,73
12	63,07	34,13	48,19	54,10	45,94	41,70	68,36
13	60,66	29,13	44,96	50,40	43,81	37,01	59,92
14	55,19	32,60	44,65	47,11	41,98	32,83	42,14
15	52,44	29,76	41,41	42,82	39,67	27,39	34,31
16	48,85	21,30	36,41	38,87	37,62	22,36	38,42
17	43,78	12,13	35,50	37,19	36,77	20,23	32,25
18	41,01	9,87	30,94	32,58	34,49	14,37	26,39
19	39,33	5,86	27,90	29,39	32,95	10,32	22,72
20	31,08	5,78	26,36	21,42	29,27	0,20	15,85
\bar{X}	67,38	47,92	58,07	60,83	52,51	50,25	94,17
S	20,29	29,89	22,04	22,81	15,85	28,97	65,81
S dif.	10,36	-	8,15	7,85	14,34	3,93	42,24
p -valor	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,1680	0,0157	0,0001

\bar{X} - média amostral; S - desvio padrão amostral; S dif. - desvio padrão da diferença dos valores da coluna com os da equação padrão (CUD); p -valor - comparação das equações com a padrão (CUD) pelo teste t, valores acima de 0,01 significa que a equação comparada é semelhante a equação padrão e valores abaixo de 0,01 é diferente.

Nota-se que, no que se refere aos sistemas de irrigação localizada, que a diferença entre os valores de uniformidade calculados utilizando-se o CUC e CUD foram maiores quanto maior for a desuniformidade de aplicação de água, pois o CUD penaliza bastante por considerar apenas as 25% menores vazões, como citado anteriormente. Se numa avaliação houvesse, por exemplo, 4 emissores entupidos, com vazão nula, e 12 funcionando perfeitamente e com a mesma vazão, isso significaria que o valor calculado pelo CUD seria zero e pelo CUC seria 50%.

Quanto a semelhança encontrada entre os valores de uniformidade calculados utilizando-se o CUD, CUH e UDH, para ambos os sistemas de irrigação localizada, pode-se afirmar que os testes apresentaram distribuição normal pois, de acordo com Hart (1961), essa condição faz essas três equações se iguaem.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados, concluiu-se que:

- O coeficiente de uniformidade de Benami e Hore não está relacionado ao conceito de área adequadamente irrigada;
- Independentemente do sistema de irrigação, os coeficiente de uniformidade de Christiansen, de distribuição, absoluto, estatístico, de Hart e eficiência padrão da HSPA estão relacionados ao conceito de área adequadamente irrigada;
- No que se refere aos sistemas de irrigação por aspersão, os valores de uniformidade calculados utilizando-se o coeficiente de uniformidade de Christiansen não diferem dos valores calculados utilizando-se o coeficiente de uniformidade de Benami e Hore e são superiores aos calculados quando se utilizam as demais equações estudadas;
- No que se refere aos sistemas de irrigação localizada, o coeficiente de uniformidade de distribuição não difere dos valores encontrados quando se utiliza o coeficiente de uniformidade de Hart e a eficiência padrão da HSPA e apresentam valores superiores aos obtidos quando se utilizam as demais equações avaliadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRETO FILHO, A.A.; DANTAS NETO, J.; MATOS, J.A.; GOMES, E.M. Desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão, instalado a nível de campo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.309-314, 2000.
- BENAMI, A.; HORE, F.R. A new irrigation-sprinkler distribution coefficient. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v.7, n.2, p.157-158, 1964.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 2006. 625p.
- CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by Sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station. 1942. 124p. Bulletin, 670.
- COSTA, M.B. **Avaliação da irrigação por pivô central na cultura do café (*Coffea canephora* L.) e na cultura do mamoeiro (*Carica papaya* L.) no município de Pinheiros**. Piracicaba: ESALQ, 2006. 88p. (Dissertação de Doutorado).
- CRIDDLE, W.D.; DAVIS, S.; PAIR, C.H.; SHOCKLEY, D.G. **Methods for Evaluating Irrigation Systems**. Washington DC: Soil Conservation Service - USDA, 1956. 24p. Agricultural Handbook, 82.
- DENÍCULI, W.; BERNARDO, S.; THIÁBAUT, J.T.L.; SEDIYAMA, G.C. Uniformidade de distribuição de água, em condições de campo num sistema de irrigação por gotejamento. **Revista Ceres**, Viçosa, v.27, n.50, p.155-162, 1980.
- HART, W.E. Overhead irrigation pattern parameters. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v.42, n.7, p.354-355, 1961.
- HART, W.E.; PERI, G.; NORUM, D.I. Optimal seasonal irrigation application analysis. **Journal of the Irrigation and Drainage Division of ASCE**, New York, v.106, n.3, p.221-235, 1980.
- KARMELI, D.; KELLER, J. **Trickle Irrigation Design**. Glendora: Rain Bird Manufacturing Corporation, 1975. 132p.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and Trickle Irrigation**. New York: AVI Book, 1990. 652p.
- MERRIAM, J.L.; KELLER, J. **Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management**. Logan: Utah State University, 1978. 271p.
- REZENDE, R.; FRIZZONE, J.A.; GONÇALVES, A.C.A.; FREITAS, P.S.L. Influência do espaçamento entre aspersores na uniformidade de distribuição de água acima e abaixo da superfície do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.3, p.257-261, 1998.
- REZENDE, R. **Desempenho de um sistema de irrigação por pivô central quanto à uniformidade e eficiência de aplicação de água abaixo e acima da superfície do solo**. Piracicaba: ESALQ, 1992. 86p. (Dissertação de Mestrado).
- ROCHA, E.M.M.; COSTA, R.N.T.; MAPURUNGA, S.M.S.; CASTRO, P.T. Uniformidade de distribuição de água por aspersão convencional na superfície e no perfil do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.2, p.154-160, 1999.
- SILVA, E.M.; LIMA, J.E.F.W.; AZEVEDO, J.A.; RODRIGUES, L.N. Proposição de um modelo matemático para a avaliação do desempenho de sistemas de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.8, p.741-748, 2004.
- WILCOX, J.C.; SWAILES, G.E. Uniformity of water distribution by some under tree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, Ottawa, v.27, n.11, p.565-583, 1947.