

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL**

GABRIEL SOARES CUNHA

**AVALIAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO EM PIVÔ CENTRAL
COM EMISSORES ROTATIVOS**

VIÇOSA, MG

2019

GABRIEL SOARES CUNHA

**AVALIAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO EM PIVÔ CENTRAL
COM EMISSORES ROTATIVOS**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

Orientadora: Catariny Cabral Aleman

Coorientador: Everardo Chartuni Mantovani

Job Oliveira

VIÇOSA, MG

2019

GABRIEL SOARES CUNHA

**AVALIAÇÃO DA UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO EM PIVÔ CENTRAL
COM EMISSORES ROTATIVOS**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

APROVADO: 26 de junho de 2019.



Profa.: Fernanda Campos de Sousa
(Membro)
(UFV)



Prof.: Luan Peroni Venancio
(Membro)
(UFV)



Profa.: Catariny Cabral Aleman
(Orientadora)
(UFV)

*A Deus e aos meus pais, meus maiores
e melhores orientadores na vida*

AGRADECIMENTOS

A Deus, aos anjos guardiães e aos espíritos protetores, por toda bondade e proteção e por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades;

A Prof^a. Dr. Catariny Cabral Aleman, pela orientação, paciência e suporte para a realização deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Everardo Chartuni Mantovani pela oportunidade e apoio;

A Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola por todo conhecimento, recurso e apoio;

Aos amigos, em especial ao Edinei Araújo e Igor Quintão, por toda força e ajuda na execução deste projeto;

Ao Grupo de Estudo e Soluções para a Agricultura Irrigada e ao Centro de Referência em Recursos Hídricos, por todo apoio e contribuição técnica;

Ao produtor Edson, que com muita paciência nos recebeu em sua propriedade;

A empresa Nelson pelo fornecimento de emissores para teste;

Ao amigo e companheiro de trabalho, Rafael Vidigal, por toda paciência e contribuição na execução deste trabalho.

Quando uma criatura humana desperta para um grande sonho e sobre ele lança toda a força de sua alma, todo o universo conspira a seu favor.

Johann Goethe

RESUMO

A irrigação é a técnica agrícola de maior contribuição para o aumento da produtividade das culturas, contribuindo para o fomento da produção agropecuária. A irrigação por aspersão é amplamente utilizada em diversas culturas, sendo o pivô central um destes sistemas, que se destaca pela facilidade de controle da lâmina aplicada, adaptação a diversos tipos de topografia e solo, menor dependência de mão de obra e pela boa uniformidade de distribuição de água. Assim, avaliar o sistema é uma etapa primordial para garantir o adequado manejo da irrigação, possibilitando um uso mais racional e eficiente de água e energia elétrica. Objetivou-se com este trabalho, avaliar a uniformidade de distribuição da lâmina por emissores Rotator® e I-Wob® em pivô central. Foram calculados os Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente de Uniformidade de Hart (CUH). Os testes foram conduzidos com o auxílio de coletores (Kit Fabrimar) para obter a lâmina aplicada, sendo os mesmos espaçados de 2,0 m entre si, ao longo de três raios, com o centro coincidindo com a base do pivô central. Com os resultados obtidos, foi possível observar que ambos emissores apresentaram, no geral, desempenho similar. Os valores de CUC médio encontrados para ambos emissores variaram entre 85 e 89%. A declividade da área de estudo não exerceu influência no coeficiente de uniformidade de Christiansen. O solo da área de estudo apresentou uma Taxa de Infiltração Estável (TIE) considerada alta e um valor de capacidade de campo de 24,6% e ponto de murcha de 16,1% em porcentagem de peso.

Palavras chave: Eficiência na irrigação. Lâmina. Irrigação pressurizada.

ABSTRACT

Irrigation is the most important agricultural technique for increasing crop productivity, contributing to the promotion of agricultural production. Sprinkler irrigation is widely used in several crop species, with the central pivot being one of these systems, which stands out for its simplicity to control the water level applied, adaptation to different topographies and soil characteristics, less dependence on labor and the good uniformity of distribution. Thus, evaluating the system is a primordial step to ensure adequate irrigation management, allowing a more rational and efficient use of water and energy. The goal of this work was to evaluate the uniformity of water level a distribution on by Rotator® and I-Wob® emitters in central pivot, through the Uniformity Coefficient of Christiansen (CUC), Statistical Uniformity Coefficient (CUE), Uniform Distribution Coefficient (CUD) and Uniformity Coefficient of Hart (CUH). Tests were conducted with the aid of collectors (Kit Fabrimar) for the water level applied, and they were spaced 2.0 m apart along three radii, with the center coinciding with the base of the central pivot. With the results obtained, it was possible to observe that both emitters presented similar performance. The mean CUC values found for both emitters varied between 85 and 89%. The slope of the study area had no influence on Christiansen's uniformity coefficient. The soil of the study area had a Stable Infiltration Rate (TIE) considered high and a field capacity value of 24.6% and wilting point of 16.1% in weight percentage.

Keywords: Irrigation efficiencies. Irrigation depths. Pressurized irrigation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	OBJETIVO	10
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	11
3.2	EQUIPAMENTO DE IRRIGAÇÃO.....	12
3.3	ENSAIO DE PRECIPITAÇÃO	13
3.4	DESEMPENHO DOS EMISSORES	14
3.4.1	COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE DE CHRISTIANSEN MODIFICADO (CUC)	15
3.4.2	COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO (CUD)	15
3.4.3	COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE HART.....	16
3.4.4	COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE ESTATÍSTICO	16
3.5	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	17
3.6	INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL	17
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1	VAZÕES E INTENSIDADE DE APLICAÇÃO.....	19
4.2	DESEMPENHO DOS EMISSORES	21
4.2.1	COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE DE CHRISTIANSEN MODIFICADO (CUC)	22
4.2.2	COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO (CUD)	24
4.2.3	COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE ESTATÍSTICO (CUE).....	26
4.2.4	COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE DE HART (CUH).....	28
4.3	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO	29
5	CONCLUSÃO.....	33
6	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada é responsável, em média, por 70% do consumo hídrico mundial. Segundo estudo da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2017), a irrigação possibilita o aumento da produção de alimentos, da eficiência no uso da água e da diversidade de culturas, contribuindo para o fomento da produção agropecuária e do Produto Interno Bruto (PIB) dos países. Segundo Bernardo (2008), a irrigação por aspersão é amplamente utilizada em diversas culturas, sendo o pivô central um destes sistemas, que se destaca pela facilidade de controle da lâmina aplicada, adaptação a diversos tipos de topografia e solo, menor dependência de mão de obra e pela boa uniformidade de distribuição de água. O sistema, que possui uma eficiência média de 85% (ANA, 2013), é responsável por irrigar, no Brasil, uma área 1,394 Mha (ANA & EMBRAPA, 2016). O Brasil está entre os 10 países com a maior área irrigada e em 2014 possuía aproximadamente 20 mil pivôs centrais, apresentando um aumento de 43% quando comparado com o ano de 2006 (ANA & EMBRAPA, 2016).

Os sistemas de irrigação podem ser avaliados a partir de aspectos técnicos e econômicos. Os aspectos técnicos estão relacionados a determinação da uniformidade de distribuição e a eficiência de aplicação. Esses fatores impactam na aplicação da lâmina de irrigação demandada, prejudicando o planejamento e manejo da irrigação e diminuindo a produtividade (NASCIMENTO et al., 2017). Araújo et al. (2015) destacam que a uniformidade de aplicação de água de um sistema de irrigação possui impactos diretos sobre o consumo de água e energia elétrica, sendo então necessário investir em melhoria do sistema, em manutenção e mão de obra para o manejo racional da irrigação.

Visando reduzir o alto custo de energia elétrica e aumentar a eficiência dos sistemas de irrigação, foram desenvolvidos os aspersores de baixa pressão. O principal obstáculo de um sistema de baixa pressão é a redução do raio de alcance e o consequente aumento da intensidade instantânea de precipitação que pode acarretar escoamento superficial (BRONER, 2005). Segundo Tomazela et al. (2003) os primeiros emissores de baixa pressão desenvolvidos foram os emissores tipo spray que ficam localizados entre a tubulação e a cultura. Em seguida, visando diminuir as perdas por evaporação e deriva foram desenvolvidos os emissores que aplicam água bem próximo a cultura, classificados como LESA (Low Elevation Spray Application). Ainda objetivando diminuir as perdas por evaporação e deriva, surgiram emissores mais eficientes em termo de distribuição de água, como por exemplo os emissores do tipo I-Wob[®] e Rotator[®].

Para expressar a variabilidade de distribuição de água por um sistema de irrigação por aspersão, são empregados muitos coeficientes como o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE) e Coeficiente de Uniformidade de Hart (CUH). Christiansen (1942) propôs o CUC, que adota o desvio médio absoluto como medida de dispersão. Heermann & Hein (1968) apresentaram uma modificação da equação de Christiansen, para o cálculo do CUC pois constaram que a uniformidade da lâmina não é função somente da diferença de pressão, mas também do diâmetro dos emissores à medida que se afasta do ponto pivô. Wilcox & Swailes (1947) apresentaram o Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE) que utiliza o desvio-padrão como medida de dispersão, para o qual se aceitam valores acima de 75%. Criddle et al. (1956) propuseram o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) que considera a razão entre a média do menor quartil e a lâmina média coletada. Hart (1961) apresentou o Coeficiente de Uniformidade de Hart (CUH) que também considera o desvio padrão como média de dispersão. Além dos coeficientes de uniformidade, alguns fatores podem contribuir para verificar a eficiência de aplicação do pivô central. Segundo Mantovani et al. (2009), a taxa de infiltração estável (TIE) pode ser um elemento importante para determinar a intensidade de aplicação e a possibilidade de escoamento superficial.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Colombo et al. (2015), ressalta a importância de se conhecer os índices de eficiência de distribuição para se mensurar o desempenho do sistema de irrigação e para o processo de tomada de decisão, possibilitando um uso mais racional e eficiente de água, energia e fertilizantes. Assim sendo, objetivou-se com este trabalho, avaliar a uniformidade de distribuição por emissores Rotator[®] R3030 e I-Wob2[®] em pivô central, utilizando o Coeficientes de Uniformidade de Christiansens (CUC); Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD); Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE) e Coeficiente de Uniformidade de Hart (CUH).

2.2 Objetivos Específicos

- (i) Analisar a interferência da declividade no Coeficiente de Uniformidade de Christiansen.
- (ii) Determinar a taxa de infiltração estável;
- (iii) Estimar o escoamento superficial;
- (iv) Determinar a capacidade de campo e ponto de murcha da área experimental.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área

O experimento foi conduzido na Fazenda Jatobá, localizada no município de Paula Cândido-MG, com coordenadas centrais do pivô de 20°49'47.98" Sul e 42°55'7.69" Oeste (Figura 1), a uma altitude de 700 metros. Segundo a classificação de Köpen, o clima é do tipo Cwb, mesotérmico, com verões chuvosos e invernos frios e secos.

Figura 1 – Fazenda Jatobá e o pivô central em estudo, Paula Cândido, Minas Gerais



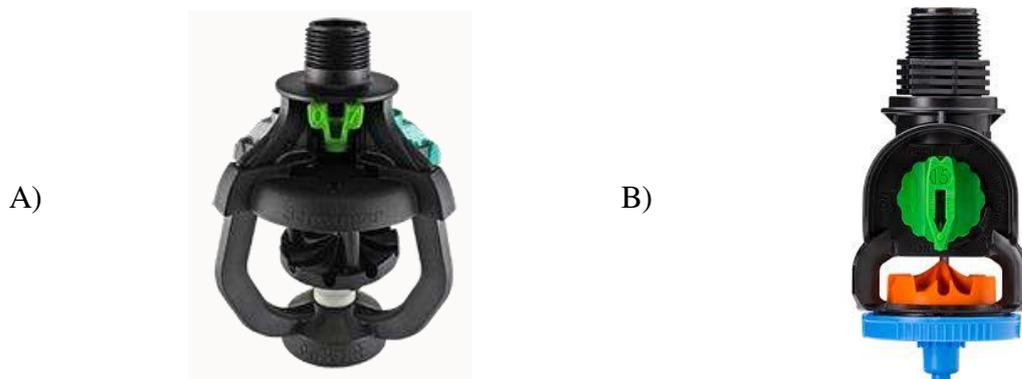
Fonte: (Google Earth).

3.2 Equipamento de Irrigação

O equipamento de irrigação utilizado para a condução do experimento, foi um pivô central Valley 4865 – 8000 VSL, com composição de 1 lance longo de 6 5/8'', com balanço de 25 m. O raio total irrigado pelo equipamento será de 84,56 m, cobrindo uma área de 2,25 ha. O desnível entre o centro do pivô e o ponto mais alto da área irrigada é de 11m e o equipamento possui 21 saídas. A vazão total é de 9,0 m³ h⁻¹, aplicando uma lâmina de 1,1 mm h⁻¹. A velocidade do pivô central a 100% é de 2,75 h.

Para análise de uniformidade, foram instalados emissores Rotator[®] (Figura 2A) e I-Wob[®] (Figura 2B). Os emissores Rotator[®] placa oliva possuem o movimento rotativo e apresentam 10 ranhuras desuniformes que geram jatos multi-trajetórias que com uma válvula redutora de pressão instalada de 10 Psi, é gerado um diâmetro molhado na faixa de 10 a 18m. Os emissores I-Wob2[®] placa preta, possuem um defletor com 9 ranhuras e combinam o movimento de rotação do defletor ranhurado com uma ação oscilante, distribuindo gotículas com menor intensidade de aplicação em uma maior área de cobertura a baixas pressões. Foram instaladas válvulas redutoras de pressão de 10 Psi, gerando um diâmetro de alcance na faixa de 11,6 a 18 metros.

Figura 2 – Emissor I-Wob2 placa preta(A) e Rotator R3030 placa oliva(B).



Fonte: Seninger e Nelson.

Os bocais utilizados em ambos emissores são apresentados na tabela 1.

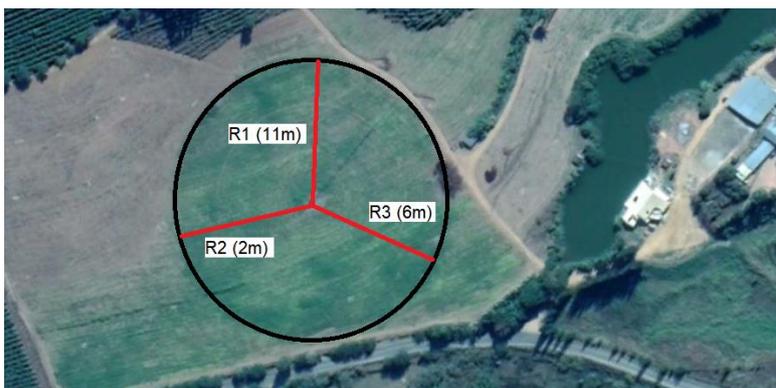
Tabela 1 – Bocais utilizados em emissores Rotator e I-Wob

Rotator	I-Wob
Número e cor do bocal	Número e cor do bocal
12 Dourado	6 Dourado
13 Dourado	7 Lima
14 Dourado	7,5 Lima
15 Lima	8 Lilás
16 Lavanda	8,5 Lilás
17 Lavanda	9 Cinza
18 Cinza	9,5 Cinza
19 Cinza	10 Turquesa
20 Turquesa	10,5 Turquesa
21 Turquesa	
22 Amarelo	
23 Amarelo	
25 Vermelho	
26 Branco	

3.3 Ensaio de Precipitação

Foram utilizados coletores Fabrimar[®] de diâmetro 80 mm para coletar a lâmina precipitada. Os coletores foram instalados em três raios com diferentes declividades ao longo da área irrigada (Figura 3), sendo: R1 o raio de maior aclave (11m); R2 o raio de pequeno declive (2m); e R3 o raio de maior declive (6m).

Figura 3 - Croqui da área experimental



Fonte: elaborado pelos autores.

Foram realizados 10 testes para cada um dos raios, sendo 5 testes para cada emissor, totalizando 30 testes em campo. Os coletores foram espaçados a cada 2 metros, formando 3 linhas de 88 m de comprimento com 44 coletores cada, totalizando 132 coletores. A velocidade de deslocamento do equipamento de irrigação foi verificada aferindo o tempo necessário para o equipamento percorrer uma distância de 10 metros. O volume de água coletado em cada coletor foi aferido, utilizando uma proveta Fabrimar, imediatamente após o término de aplicação em cada ponto, evitando problemas com perdas por evaporação. Os testes foram realizados durante o período de 22 de maio até 09 de junho de 2019, em diferentes horários, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Horários de realização dos testes para os diferentes emissores

Emissor	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
I-Wob	11h às 12h	10h às 12h	16h às 18h	18h às 20h	20h às 22h
Rotator	16h às 18h	15h às 17h	9h às 11 h	11h às 13h	14h às 16h

3.4 Desempenho dos emissores

As vazões dos emissores foram obtidas medindo, com auxílio de um balde graduado, o volume emitido por cada emissor em um tempo cronometrado. Foram realizadas três repetições de volume coletado para cada emissor.

A interpretação dos valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen Modificado (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE) foi realizada segundo a metodologia apresentada por Mantovani (2001) (Tabela 3). Não foi aplicada nenhuma metodologia para avaliação do Coeficiente de Uniformidade de Hart.

Tabela 3 – Classificação do sistema de aspersão quanto aos coeficientes de uniformidade

CLASSIFICAÇÃO	CUC (%)	CUD (%)	CUE (%)
Excelente	>90	>84	95 – 100
Bom	80-90	68 – 84	85 – 90
Razoável	70-80	52 – 68	75 – 80

CUC: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen Modificado. CUD: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição. CUE: Coeficiente de Uniformidade Estatístico.

Fonte: Mantovani (2001).

3.4.1 Coeficiente de Uniformidade de Christiansen Modificado (CUC)

A uniformidade de distribuição de água do ensaio de precipitação foi analisada segundo o coeficiente de uniformidade de Christiansen (1942) modificado por Heermann e Hein (1968) (Equação 1).

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

A lâmina média coletada é dada pela equação 2.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \times X_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (2)$$

Em que:

CUC = Coeficiente de Uniformidade de Christiansen Modificado, %;

a_i = Área coletada do coletor de ordem i , m^2 ;

x_i = Lâmina coletada do coletor de ordem i , mm ;

\bar{x} = Lâmina média coletada, mm ; e

n = Número total de coletores, adimensional.

Foi calculado o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen Teórico (CUCt) utilizando os valores de lâmina aplicada por cada emissor. A lâmina aplicada por cada emissor foi calculada utilizando a Equação 3.

$$X_i = \frac{Q_i \times T}{A_i} \quad (3)$$

Em que:

X_i = Lâmina aplicada pelo emissor de ordem i , mm ;

Q = Vazão coletada em campo do emissor de ordem i , l/h ;

T = Tempo por volta do pivô, h ; e

A_i = Área molhada pelo emissor de ordem i , m^2 .

3.4.2 Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)

Para calcular o coeficiente de uniformidade de distribuição, adotou-se a definição dada por Criddle et al. (1956), por meio da equação 4.

$$\text{CUD} = \left(\frac{d_{25}}{\bar{x}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Em que:

CUD = Coeficiente de Uniformidade de Distribuição, %;

d_{25} = média ponderada da quantidade de água coletada em 25% da área total que recebe menos água, mm; e

\bar{x} = Lâmina média coletada, mm.

3.4.3 Coeficiente de Uniformidade Hart

O Coeficiente de Uniformidade de Hart proposto por Hart (1961) pôde ser calculado pela equação 5.

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

Onde:

CUH = Coeficiente de Uniformidade Hart, %;

S = Desvio padrão, mm; e

\bar{x} = Lâmina média coletada, mm.

3.4.4 Coeficiente de Uniformidade Estatístico

O Coeficiente de Uniformidade Estatístico proposto por Wilcox & Swailes (1947) pôde ser calculado pela equação 6.

$$\text{CUE} = 100 \left(1 - \frac{S}{\bar{x}} \right) \quad (6)$$

Onde:

CUE = Coeficiente de Uniformidade Estatístico, %;

S = Desvio padrão, mm; e

\bar{x} = Lâmina média coletada, mm.

3.5 Curva de Retenção de Água no Solo

Foram coletadas amostras de solos nos quatro quadrantes da área irrigada no pivô. As amostras foram coletadas em locais diferentes e obteve-se uma amostra composta para confecção da curva de retenção. A curva foi determinada a partir de amostras de solo deformadas previamente peneiradas, que após saturadas, foram levadas à câmara de pressão de Richards com placa porosa, para estabilização e posterior determinação da umidade em porcentagem de peso correspondente as tensões de: -0,1; -0,33; -1; -2,5; -5 e -15 bar, com três repetições.

3.6 Infiltração de Água no Solo e Escoamento Superficial

A taxa de infiltração específica (TIE), foi determinada de acordo com a metodologia apresentada por Bernardo et al. (2008), utilizando-se o método do infiltrômetro de anel, que consiste em dois anéis, colocados concentricamente sendo um menor com diâmetro de 20 cm e o maior com 40 cm, e altura de 15 cm. Na tabela 4 são apresentadas as classificações de valores de taxa de infiltração específica segundo Bernardo (2008).

Tabela 4 – Classificação da Taxa de Infiltração Estável (TIE)

Classificação	TIE (mm/h)
Muito Alta	> 30
Alta	15 – 30
Média	5 – 15
Baixa	< 5

Fonte: Bernardo (2008).

Para análise da possibilidade de escoamento superficial, foi calculada a intensidade de precipitação de cada emissor através da equação 7.

$$I_m = 3600 \left(\frac{3Q}{2\pi r^2} \right) \quad (7)$$

Onde:

I_m = Intensidade máxima de precipitação, mm/h;

Q = Vazão do emissor coletada em campo, em L/s;

r = Raio molhado do emissor, m.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Vazões e Intensidade de Aplicação

As vazões de cada emissor foram medidas e os resultados comparados com as vazões de catálogo fornecidas pelo fabricante. Os resultados de vazão e o mapa de bocal para emissores Rotator[®] são apresentados na Tabela 5. Durante o teste de vazão, a pressão no ultimo emissor foi de 34,1 Psi.

Tabela 5 - Vazão de catálogo, vazão coletada e intensidade de aplicação calculada para Rotator[®]

	Distância do centro do pivô (m)	Modelo Rotator [®] 3NV	Vazão Catálogo (L/h)	Vazão Campo (L/h)	Intensidade de aplicação (mm/h)
Primeira torre	6,3	12 GOLD	179,41	198,67	2,63
	10,9	12 GOLD	179,41	182,67	2,42
	15,5	12 GOLD	179,41	181,33	2,41
	20	13 GOLD	208,93	201,33	2,67
	24,6	15 LIME	279,33	293,33	3,31
	29,2	16 LAVENDER	317,94	330,00	3,73
	33,8	17 LAVENDER	358,82	363,00	4,10
	38,3	18 GRAY	397,42	394,50	3,84
	42,9	19 GRAY	447,39	450,00	4,38
	47,5	20 TURQUOISE	497,35	487,50	4,75
	52	21 TURQUOISE	540,50	550,50	5,36
Balanço	56,7	22 YELLOW	599,54	608,82	5,93
	61,3	23 YELLOW	649,51	603,53	5,88
	65,8	24 RED	717,64	768,71	6,52
	70,4	25 RED	774,41	818,27	6,95
	75	26 WHITE	840,27	879,43	7,46
	79,5	20 TURQUOISE	497,35	534,00	5,20
	80,4	22 YELLOW	599,54	704,16	6,86
	Vazão Total (L/h)			8264,2	8549,8

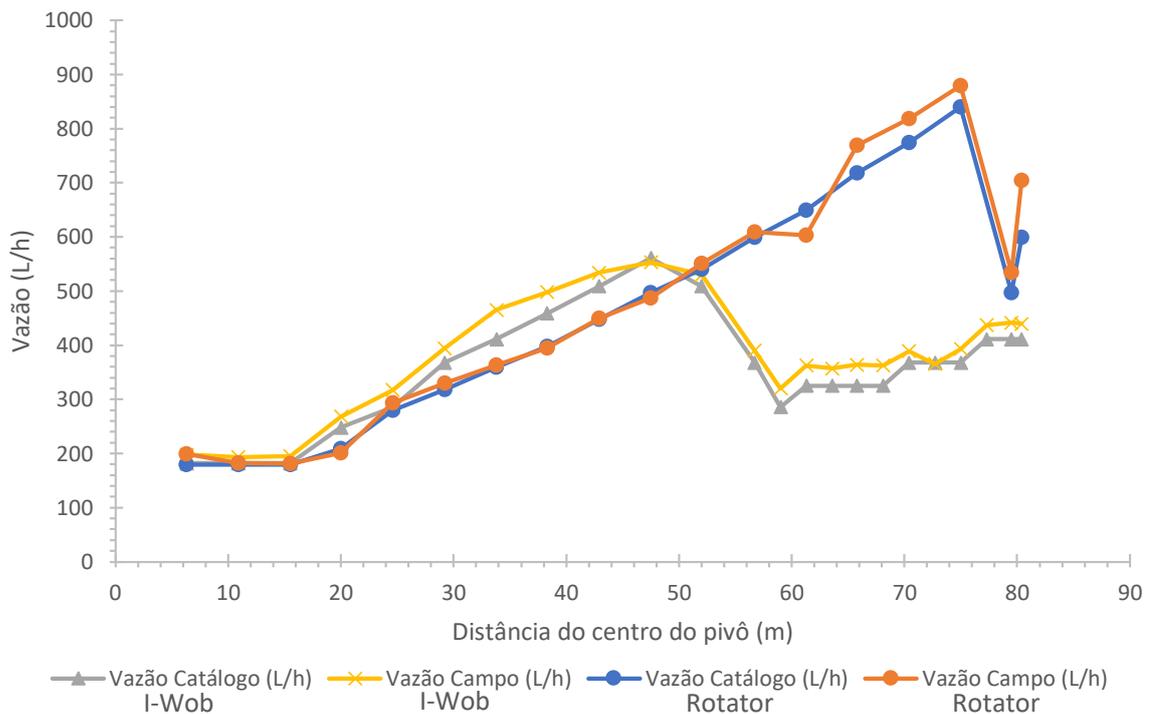
Os resultados de vazão e o mapa de bocal para emissores I-Wob® são apresentados na Tabela 6. Durante o teste de vazão, a pressão no ultimo emissor foi de 36,2 Psi.

Tabela 6 - Vazão de catálogo, vazão coletada e intensidade de aplicação calculada para I-Wob®

	Distância do centro do pivô (m)	Modelo I-Wob®	Vazão Catálogo (L/h)	Vazão Campo (L/h)	Intensidade aplicação (mm/h)
Primeira torre	6,3	6 Dourado	182	198	2,62
	10,9	6 Dourado	182	193,3	2,56
	15,5	6 Dourado	182	195,3	2,59
	20	7 Lima	248	268	3,55
	24,6	7,5 Lima	286	317,3	4,20
	29,2	8,5 Lilás	368	394,5	5,23
	33,8	9 Cinza	411	465,2	6,17
	38,3	9,5 Cinza	459	498	6,60
	42,9	10 Turquesa	509	534	7,08
	47,5	10,5 Turquesa	561	553	7,33
52	10 Turquesa	509	530	7,02	
Balanço	56,7	8,5 Lilás	368	390	5,17
	59	7,5 Lima	286	320	4,24
	61,3	8 Lilás	325	362,3	4,80
	63,6	8 Lilás	325	357	4,73
	65,8	8 Lilás	325	363,8	4,82
	68,1	8 Lilás	325	362,3	4,80
	70,4	8,5 Lilás	368	389,3	5,16
	72,7	8,5 Lilás	368	365,3	4,84
	75	8,5 Lilás	368	393	5,21
	77,3	9 Cinza	411	437,1	5,79
	79,5	9 Cinza	411	441,4	5,85
	80,4	9 Cinza	411	439,7	5,83
Vazão Total (L/h)			8188	8767,8	

Observou-se para o emissor Rotator[®] uma variação de 3,5% quando comparada a vazão de catálogo e vazão coletada. Já emissores I-Wob[®] apresentaram uma variação de 7,1%. A variação entre os dados de catálogo e campo para os dois modelos de emissores é melhor observada na Figura 4. A elevada variação entre os valores para emissores I-Wob[®] pode ter ocorrido devido a vida útil das válvulas de pressão e à falta de manutenção dos bicos dos emissores. Já os emissores Rotator[®], que apresentaram uma baixa variação de vazão, são emissores novos e o seu primeiro uso ocorreu durante os experimentos.

Figura 4 – Vazão coletada e de catálogo ao longo do raio do pivô central, comparando os emissores Rotator[®] e I-Wob[®]



4.2 Desempenho dos Emissores

Na Tabela 7 são apresentados os valores de lâmina média para as três situações de declividade estudada para emissores I-Wob[®] e Rotator[®] respectivamente.

Tabela 7 – Lâmina média aplicada por emissores I-Wob® e Rotator®

Emissor	Raio do Pivô	Lâmina Média (mm)	Erro padrão	Mediana	Desvio padrão	Variância	Mínimo	Máximo
I-Wob	R1	1,077	0,108	0,97	0,241	0,058	0,855	1,451
	R2	1,167	0,073	1,19	0,164	0,027	0,976	1,343
	R3	1,197	0,063	1,21	0,141	0,020	0,982	1,348
Rotator	R1	1,194	0,043	1,22	0,096	0,0092	1,060	1,310
	R2	1,268	0,034	1,31	0,077	0,0060	1,150	1,340
	R3	1,308	0,030	1,31	0,068	0,0047	1,200	1,390

R1- Raio em maior aclave, R2-Raio em pequeno declive, R3- Raio em maior declive

4.2.1 Coeficiente de Uniformidade de Christiansen Modificado (CUC)

Os valores de Coeficiente de Uniformidade de Christiansen Modificado nos três raios amostrais, nos diferentes testes e para os dois emissores testados estão apresentados na Tabela 8. A estatística descritiva dos valores de CUC é apresentado na Tabela 9 para ambos emissores testados.

Tabela 8 – Coeficiente de Uniformidade de Christiansen Modificado para emissores I-Wob® e Rotator®

Emissor	Raio	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
I-Wob	R1	81,5%	85,9%	87,5%	83,5%	91,3%
	R2	83,9%	87,0%	84,1%	91,5%	91,8%
	R3	83,9%	91,2%	92,3%	88,0%	91,3%
Rotator	R1	81,5%	85,9%	87,5%	83,5%	91,3%
	R2	83,9%	87,0%	84,1%	91,5%	91,8%
	R3	83,9%	91,2%	92,3%	88,0%	91,3%

R1- Raio em maior aclave, R2-Raio em pequeno declive, R3- Raio em maior declive

Tabela 9 – Estatística descritiva dos valores de Uniformidade de Christiansen Modificado (CUC) para emissores I-Wob[®] e Rotator[®]

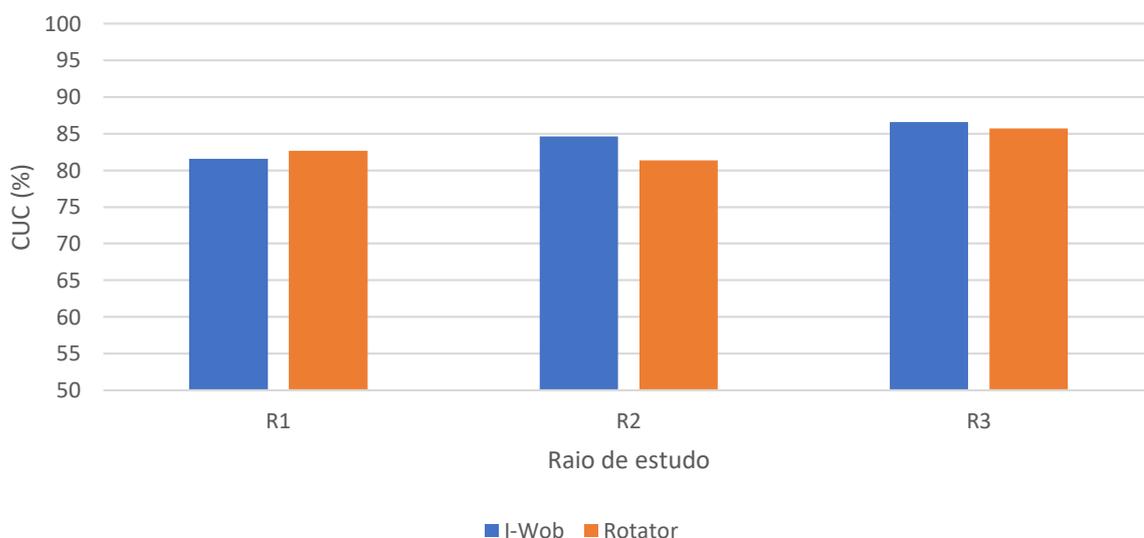
Emissor	Situação	CUC Médio	Erro padrão	Mediana	Desvio padrão	Variância	Mínimo	Máximo
I-Wob	R1	85,97%	0,0168	0,8595	0,0375	0,0014	81,51%	91,25%
	R2	87,70%	0,0171	0,8698	0,0383	0,0014	83,91%	91,76%
	R3	89,32%	0,0154	0,9120	0,0343	0,0012	83,89%	92,26%
Rotator	R1	85,7%	0,01133	0,8594	0,0253	0,0006	83,19%	89,00%
	R2	87,4%	0,00988	0,8860	0,0221	0,0004	84,90%	89,40%
	R3	88,4%	0,00765	0,8907	0,0171	0,0002	86,56%	90,40%

R1- Raio em maior aclave, R2-Raio em pequeno declive, R3- Raio em maior declive

Os valores de CUC médio encontrados para ambos emissores são classificados segundo a metodologia de Mantovani (2001) como bom pois estão entre 80 e 90%. Os valores de CUC para os emissores Rotator[®] expressaram menor variabilidade quando comparado aos valores do I-Wob[®] para as diferentes condições de topografia como é possível observar os valores de variância da Tabela 9. Resultados obtidos por Mantovani et al. (2012) confirmam a importância do CUC como referência na avaliação da eficiência dos equipamentos de irrigação, bem como sua importância no rendimento das culturas, uma vez que quanto menor a uniformidade de irrigação, maior será a água excedente nas áreas superirrigadas e maior será o déficit de água para a cultura nas áreas subirrigadas.

Os emissores Rotator[®] apresentaram um CUC teórico de 90,81% e os emissores I-Wob[®] de 89,9%. Os valores de CUC encontrados, comparados com os valores de CUC teórico, obtiveram uma variação de até 4% para I-Wob[®] e até 5% para Rotator[®]. Na figura 5 é possível observar a comparação do CUC para os diferentes emissores.

Figura 5 – Comparativo de Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) para emissores Rotator® e I-Wob®



R1- Raio em maior aclive, R2-Raio em pequeno declive, R3- Raio em maior declive

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A Tabela 10 mostra a análise de variância para os valores de CUC para as diferentes situações de declividade estudada. Através do fator F é possível concluir que a declividade da área de estudo não exerceu influência significativa nos valores de CUC dos emissores testados.

Tabela 10 – Análise de variância (ANOVA) dos valores de CUC

Emissor	Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	valor-P	F crítico
I-Wob®	Entre grupos	0,002803	2	0,001401	1,067576	0,374356	3,885294
	Dentro dos grupos	0,015751	12	0,001313			
Rotator®	Entre grupos	0,001822	2	0,000911	1,920792	0,188928	3,885294
	Dentro dos grupos	0,005691	12	0,000474			

4.2.2 Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)

Os valores de coeficiente de uniformidade de distribuição encontrados em cada teste são apresentados na Tabela 11 e a estatística descritiva dos valores de CUD para cada emissor é apresentada na Tabela 12.

Tabela 11 – Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) para emissores I-Wob[®] e Rotator[®]

Emissor	Raio	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
I-Wob	R1	74,6%	78,0%	81,3%	78,9%	72,6%
	R2	74,5%	78,5%	82,4%	86,1%	85,9%
	R3	78,0%	85,5%	91,8%	83,5%	85,9%
Rotator	R1	79,0%	80,7%	79,7%	76,5%	76,1%
	R2	80,7%	74,1%	77,2%	78,9%	79,4%
	R3	80,4%	85,1%	81,5%	77,9%	76,7%

R1- Raio em maior aclave, R2-Raio em pequeno declive, R3- Raio em maior declive

Tabela 12 – Estatística descritiva dos valores de Uniformidade de Distribuição (CUD) para emissores I-Wob[®] e Rotator[®]

Emissor	Raio	CUD Médio	Erro padrão	Mediana	Desvio padrão	Variância
I-Wob	R1	77,09%	0,015608	0,780475	0,034901	0,001218
	R2	81,48%	0,022314	0,824353	0,034901	0,002490
	R3	84,95%	0,022146	0,855367	0,034901	0,002452
Rotator	R1	78,4%	0,009073	0,79039	0,020280	0,000412
	R2	78,1%	0,011480	0,789345	0,025670	0,000659
	R3	80,3%	0,014614	0,803977	0,032670	0,001068

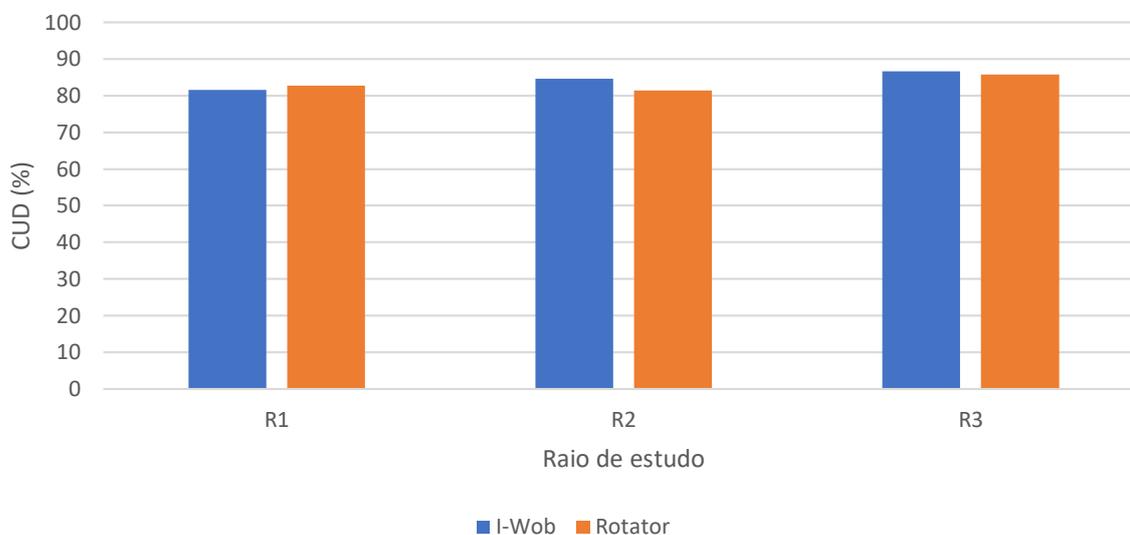
R1- Raio em maior aclave, R2-Raio em pequeno declive, R3- Raio em maior declive

Para emissores Rotator[®], nos três raios amostrais, a uniformidade de distribuição pôde classificada como boa segundo Mantovani (2001), pois está entre 68 e 84%. Já para os emissores I-Wob[®], o CUD para R1 e R2 pôde ser considerado bom, pois também está entre 68 e 84% e para R3 excelente, pois está acima de 84%. Pelos valores de variância apresentados na Tabela 12 é possível observar uma menor variação dos valores de CUD para os emissores Rotator[®]. Os resultados médios de CUD foram inferiores aos valores médios de CUC. Este fato era esperado, uma vez que o CUD é um coeficiente mais restritivo que utiliza a média dos 25% menores valores de lâmina coletada, expressando o quanto a precipitação média da área menos irrigada se aproxima da precipitação média total. Já o CUC expressa o quanto as precipitações coletadas em toda a área se aproximam da precipitação média.

A atuação adequada dos reguladores de pressão tem grande importância sobre a uniformidade de aplicação de água, conforme comprovado por Teixeira et al. (2003). Tanto para os valores de CUD e CUC, os emissores I-Wob[®] apresentaram uma maior variação nos valores para as situações testadas em aclave e declive, constatando que os reguladores de

pressão, devido sua vida útil, podem não ter sido eficiente no equilíbrio da pressão. A Figura 6 apresenta um comparativo entre os valores de CUD para os dois emissores testados.

Figura 6 – Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) para emissores Rotator® e I-Wob® para as condições de topografia



R1- Raio em maior aclave, R2-Raio em pequeno declive, R3- Raio em maior declive

Fonte: Elaborada pelos próprios autores

4.2.3 Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE)

Os valores de coeficiente de uniformidade estatística para os emissores testados são apresentados na Tabela 13 e a estatística descritiva apresentada na tabela 14.

Tabela 13 – Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE) para emissores I-Wob® e Rotator®

Emissor	Raio	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
I-Wob	R1	71,5%	78,5%	75,1%	74,8%	84,8%
	R2	76,3%	81,2%	78,2%	83,7%	84,3%
	R3	80,6%	81,7%	84,8%	82,6%	86,3%
Rotator	R1	79,8%	77,6%	82,2%	76,1%	75,9%
	R2	69,6%	74,9%	83,9%	76,1%	78,7%
	R3	80,3%	85,2%	84,5%	79,3%	81,2%

R1- Raio em maior aclave, R2-Raio em pequeno declive, R3- Raio em maior declive

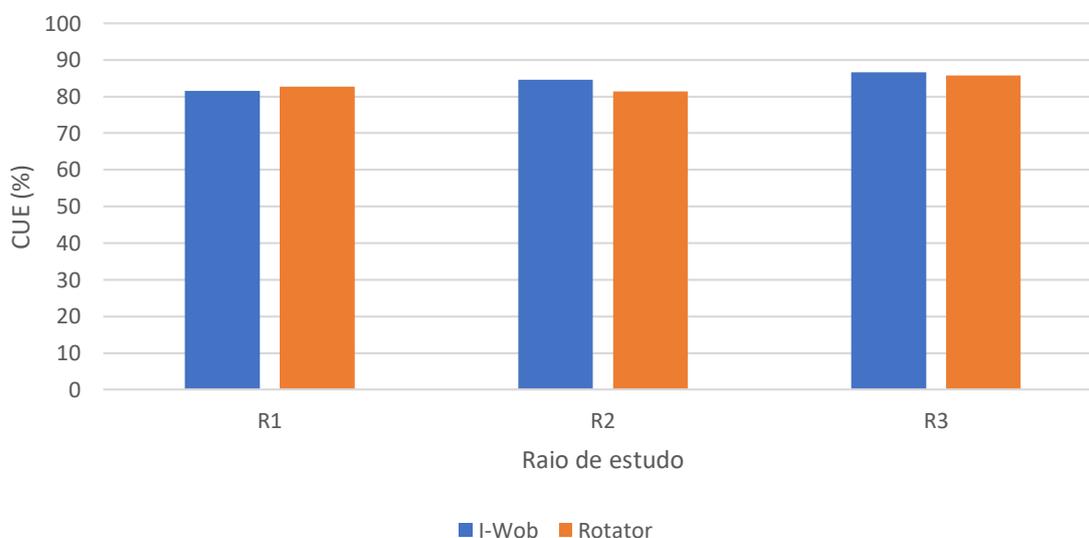
Tabela 14 – Estatística descritiva dos valores de Uniformidade Estatístico (CUE) para emissores I-Wob® e Rotator®

Emissor	Raio	CUE Médio	Erro padrão	Mediana	Desvio padrão	Variância
I-Wob	R1	76,93%	0,02266	0,751149	0,05060	0,002567
	R2	80,77%	0,015564	0,812491	0,03480	0,001211
	R3	83,18%	0,010476	0,825641	0,02342	0,000549
Rotator	R1	78,3%	0,011992	0,775994	0,02681	0,000719
	R2	76,7%	0,023470	0,761262	0,05248	0,002754
	R3	82,1%	0,011748	0,812169	0,02626	0,000690

R1- Raio em maior aclave, R2-Raio em pequeno declive, R3- Raio em maior declive

O CUC é coeficiente mais utilizado em campo, entretanto não é um coeficiente estético. Assim, é de extrema importância a avaliação do Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE) uma vez que este utiliza o desvio padrão das lâminas coletadas como medida de dispersão. Segundo Wilcox & Swailes (1947) são aceitáveis valores de CUE acima de 75%. Segundo Mantovani (2001), valores de CUE entre 75 e 80% são considerados razoáveis. Na figura 7 é possível observar a comparação do coeficiente de uniformidade estatístico dos dois emissores.

Figura 7 –Coeficiente de uniformidade estatístico (CUE) para emissores Rotator® e I-Wob® para três diferentes situações de topografia



R1- Raio em maior aclave, R2-Raio em pequeno declive, R3- Raio em maior declive.

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

4.2.4 Coeficiente de Uniformidade de Hart (CUH)

Os valores de coeficiente de uniformidade de Hart para os emissores testados são apresentados na tabela 15 e a estatística descritiva é apresentada na tabela 16.

Tabela 15 – Coeficiente de Uniformidade de Hart (CUH) para emissores I-Wob® e Rotator®

Emissor	Raio	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
I-Wob	R1	77,2%	82,8%	80,1%	79,9%	87,9%
	R2	81,1%	85,0%	82,6%	87,0%	87,5%
	R3	84,5%	85,4%	87,8%	86,1%	89,1%
Rotator	R1	83,9%	82,1%	85,8%	80,9%	80,8%
	R2	75,8%	80,0%	87,2%	81,0%	83,0%
	R3	84,2%	88,2%	87,6%	83,5%	85,0%

R1- Raio em maior aclave, R2-Raio em pequeno declive, R3- Raio em maior declive

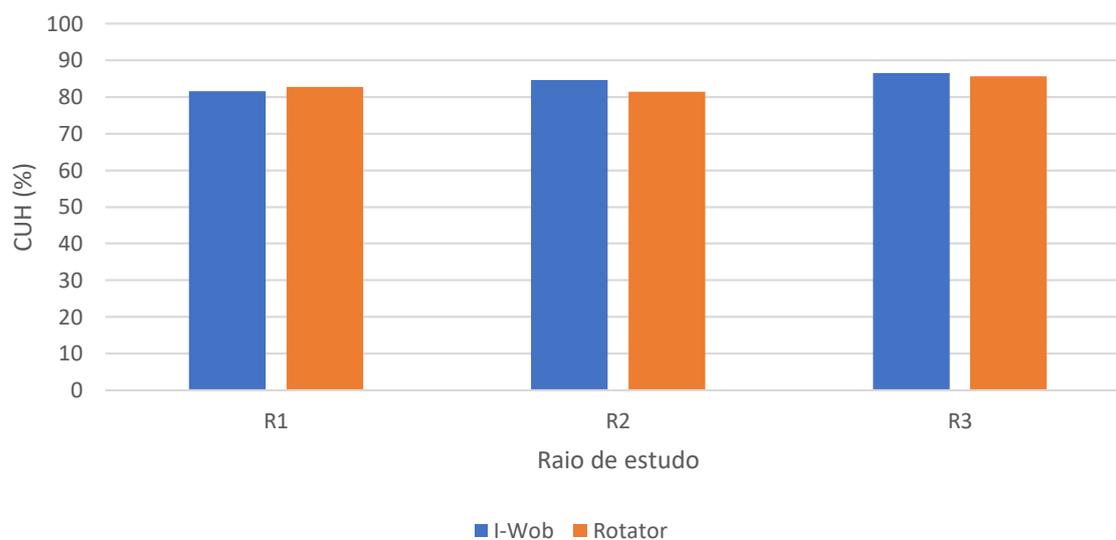
Tabela 16 – Estatística descritiva dos valores de Uniformidade de Hart (CUH) para emissores I-Wob® e Rotator®

Emissor	Raio	CUH Médio	Erro padrão	Mediana	Desvio padrão	Variância
I-Wob	R1	81,60%	0,01808	0,801446	0,040429	0,001635
	R2	84,65%	0,012418	0,850389	0,027768	0,000771
	R3	86,58%	0,008359	0,860882	0,018691	0,000349
Rotator	R1	82,69%	0,009568	0,821269	0,021396	0,000458
	R2	81,38%	0,018727	0,809515	0,041874	0,001753
	R3	85,71%	0,009373	0,850133	0,02096	0,000439

R1- Raio em maior aclave, R2-Raio em pequeno declive, R3- Raio em maior declive

Na irrigação por aspersão quando a lâmina de água aplicada tem distribuição normal, tem-se que o CUH é igual ao CUC (Hart, 1961). Para ambos emissores, os valores de CUH são inferiores aos valores de CUC, indicando que a lâmina aplicada pelo pivô não tem distribuição normal. Na figura 8 é possível observar a comparação do coeficiente de uniformidade de Hart dos dois emissores.

Figura 8 –Coeficiente de uniformidade de Hart (CUH) para emissores Rotator® e I-Wob® para três diferentes situações de topografia



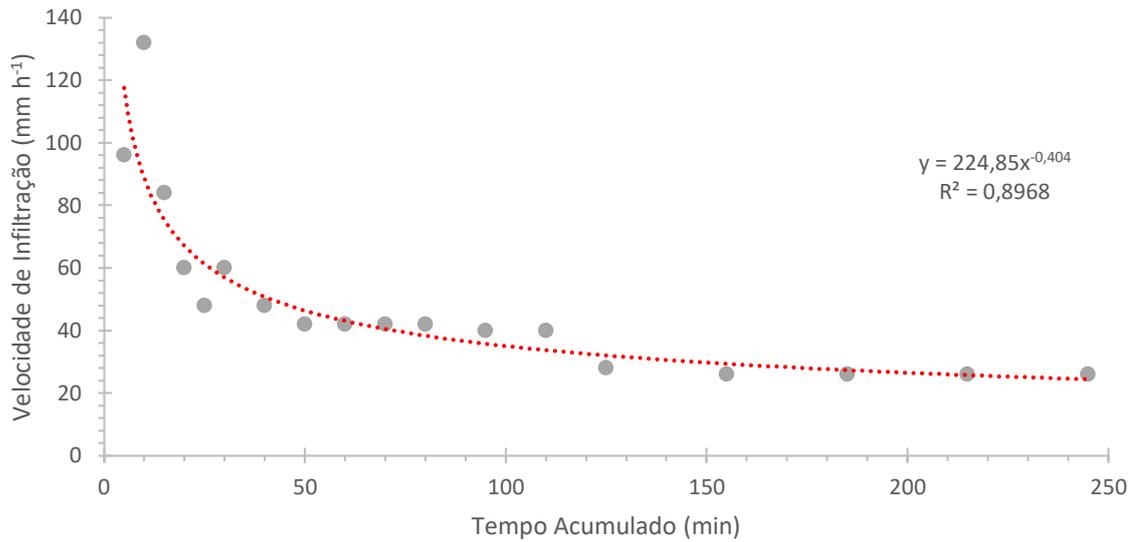
R1- Raio em maior acento, R2-Raio em pequeno declive, R3- Raio em maior declive.

Fonte: Elaborado pelo próprio autores.

4.3 Características Físico-hídricas do Solo

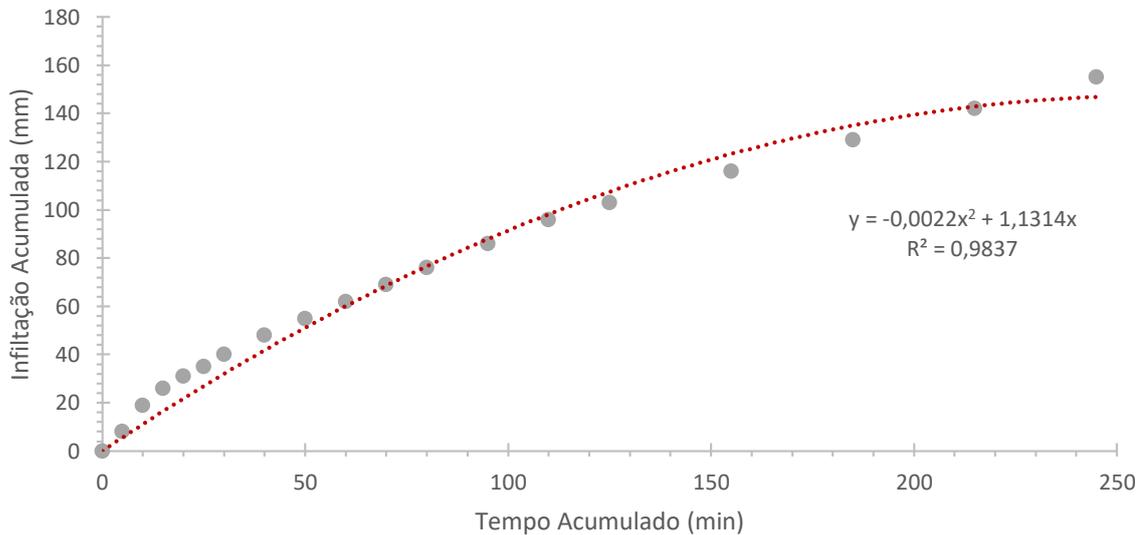
Após a realização do teste de infiltração utilizando o infiltrômetro de anel, foi encontrado um valor de taxa de infiltração estável (TIE) de $26,0 \text{ mm h}^{-1}$. O solo da área de estudo pode ser classificado segundo Bernardo (2008) como solo com alta taxa de infiltração, pois apresenta valor entre 15 e 30 mm h^{-1} . O gráfico de velocidade de infiltração por tempo (Figura 9) e infiltração por tempo (Figura 10) foi traçado para uma melhor representação da área e para um estudo de possibilidade de escoamento superficial.

Figura 9 – Curva da velocidade de infiltração observada na área experimental



Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

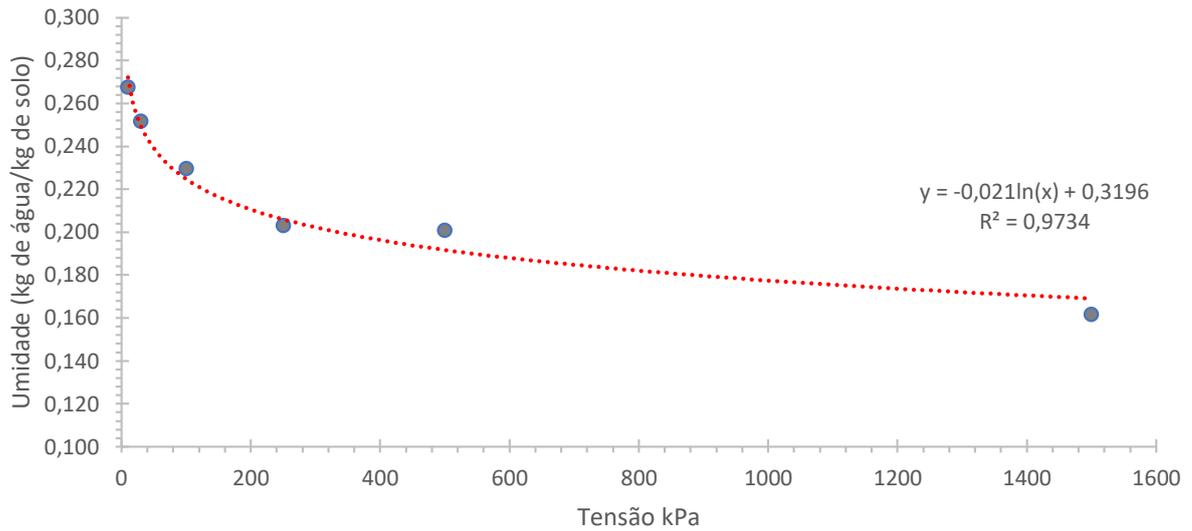
Figura 10 – Curva de infiltração acumulada observada na área experimental



Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

Foi determinada a umidade correspondente às tensões de 0,1; -0,33; -1; -2,5; -5 e -15 bar para as amostras de solo levadas à câmara de pressão de Richards. Na Figura 11 é possível observar a tendência logarítmica que melhor representa os valores de umidade e tensão obtidos no teste. Para determinação da capacidade de campo, foi considerada a umidade a uma tensão de 33 kPa e para ponto de murcha a 1500 kPa. Assim, obteve-se um valor de capacidade de campo de 24,6% e ponto de murcha de 16,1% em porcentagem de peso.

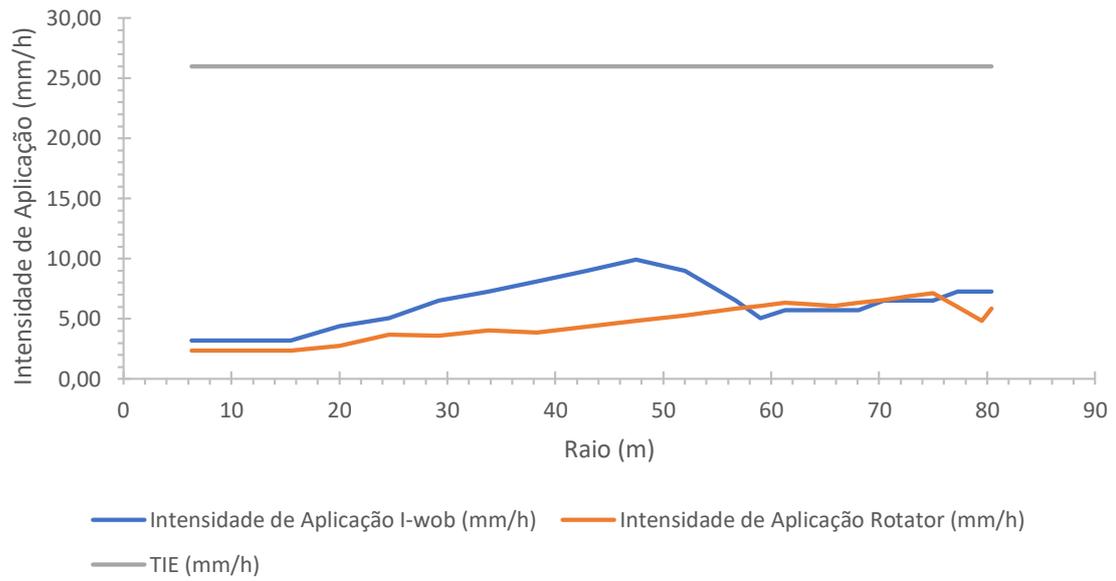
Figura 11 – Curva de retenção de água no solo da área experimental



Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

Na Figura 12 são apresentados os valores de intensidade de aplicação (I_a) de cada emissor no raio irrigado do pivô. É possível observar que, para emissores Rotator, com o incremento do raio há um incremento da intensidade de aplicação. Isto é esperado, uma vez que com o aumento do raio irrigado, há um aumento da área irrigada, sendo necessário maior intensidade de aplicação para se obter uma mesma lâmina em toda área, entretanto, analisando os valores de I_a dos emissores I-Wob, observa-se que não há um aumento da intensidade de aplicação com o incremento do raio no final do pivô. Isto pode ser justificado, pois os emissores I-Wob no vão em balanço estão espaçados a uma menor distância, sendo possível utilizar emissores de menor I_a no final do pivô. Observa-se também que para ambos emissores a intensidade de aplicação é inferior a TIE, não havendo possibilidade de escoamento superficial para condições normais de funcionamento.

Figura 12 – Intensidade de Aplicação dos emissores e taxa de infiltração específica (TIE) do solo



Fonte: Elaborado pelos próprios autores.

5 CONCLUSÃO

Os dois emissores, para as condições testadas, apresentaram desempenho similar. Os valores de Coeficiente de Uniformidade de Christiansen Modificado médio encontrados para ambos emissores foram classificados como bom.

Ao analisar os Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD) médio, obteve-se que, para os três raios amostrais, a uniformidade de distribuição pôde classificada como boa para emissores Rotator[®]. Para os emissores I-Wob[®], o CUD para os raios em maior aclive e pequeno declive pôde ser considerado bom e para o raio de maior declive foi considerado excelente.

Para ambos emissores, os valores médios de Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE) foram superiores a 75% e são considerados aceitáveis. Os valores médios de Coeficiente de Uniformidade de Hart (CUH), para as situações de declividade testadas, variaram entre 82 e 85% para ambos emissores. Considerando todos os coeficientes, os emissores Rotator[®] apresentaram um menor valor de variância para as diferentes declividades

A declividade da área de estudo não exerceu influência no coeficiente de uniformidade de Christiansen. O solo da área de estudo apresentou uma Taxa de Infiltração Estável (TIE) considerada alta e um valor de capacidade de campo de 24,6% e ponto de murcha de 16,1% em porcentagem de peso.

Para uma melhor caracterização dos emissores, recomenda-se para uma próxima pesquisa, a avaliação das perdas por evaporação e arraste.

6 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. NBR 14244: Equipamentos de irrigação mecanizada: pivô central e lateral móvel providos de emissores fixos ou rotativos: determinação da uniformidade de distribuição de água. Rio de Janeiro, RJ, 1998. 11 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS & Embrapa. Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil – 2014: Relatório Síntese. Brasília: ANA, 2016, 33 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2017. 86p.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de irrigação. 8. ed. Atual. e Ampl. Viçosa: UFV, 2008. 625 p.
- BRONER, I. Irrigation: Center pivot irrigation systems. Colorado, s/n, 2005
- CHRISTIANSEN, J. E. Irrigation by sprinkling. California: University of California, 1942.
- CRIDDLE, W.D.; DAVIS, S.; PAIR, C.H.; SHOCKLEY, D.G. Methods for evaluating irrigation systems. Washington DC: Soil Conservation Service - USDA, 1956. 24p.
- COLOMBO, A.; FARIA, L. C.; SILVA JÚNIOR, J. J. D.; SANT'ANA, J. A. D. V.; BESKOW, S.; NÖRENBERG, B. G. Modelagem das perdas de água por evaporação e arraste de sprays de placa oscilante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p. 719-726, 2015.
- FAO. Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias. Brasília, 2017.
- HART, W. E. Overhead irrigation pattern parameters. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, 42, 7, 354-355, 1961.
- HEERMANN, D. F.; HEIN, P. R. Performance characteristics of self propelled center pivot sprinkler irrigation system. Transaction of the ASAE, Saint Joseph, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1968.
- HOWELL, T.A. Irrigation Efficiency. Stewart, BA., Howell, T.A., Editors. Marcel-Dekker, inc., New York, NY. Encyclopedia of Water Science, p. 467-472, 2003.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. Irrigação: princípios e métodos. 3 ed. Viçosa, Ed. UFV, 2009. 355p.
- MANTOVANI, E. C. AVALIA: Programa de Avaliação da Irrigação por Aspersão e Localizada. Viçosa, MG: UFV, 2001.

NASCIMENTO, V. F.; FEITOSA, E. O.; SOARES, J. I. Uniformidade de distribuição de um sistema de irrigação por aspersão via pivô central. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 4, n. 4, p. 65-69, dez. 2017.

TOMAZELA, C; MANTOVANI, E, C.; FERNANDE A,L.; Irrigação localizada em sistemas de pivô central e linear: a nova fronteira da irrigação no Brasil. Brasília, n. 60, pag 70-79, jun 2003.

WILCOX, J.C.; SWAILES, G.E. Uniformity of water distribution by some under tree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, v.27, n.11, p.565-583, 1947.