

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Tese

**Índices de desempenho da irrigação pressurizada com base na distribuição
logística de probabilidades**

Bernardo Gomes Nörenberg

Pelotas, 2022

Bernardo Gomes Nörenberg

Índices de desempenho da irrigação pressurizada com base na distribuição logística de probabilidades

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Lessandro Coll Faria

Pelotas, 2022

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

N111i Nörenberg, Bernardo Gomes

Índices de desempenho da irrigação pressurizada com base na distribuição logística de probabilidades / Bernardo Gomes Nörenberg ; Lessandro Coll Faria, orientador. — Pelotas, 2022.

64 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2022.

1. Avaliação da irrigação. 2. Irrigação. 3. Aspersão. 4. Gotejamento. 5. Estatística. I. Faria, Lessandro Coll, orient. II. Título.

CDD : 627

Bernardo Gomes Nörenberg

Índices de desempenho da irrigação pressurizada com base na distribuição logística de probabilidades

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutor em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 14/02/2022

Banca examinadora:

Prof. Dr. Lessandro Coll Faria (Orientador)
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras

Prof. Dr. Alberto Colombo
Ph.D. em Engenharia de irrigação pela Utah State University

Prof. Dr. José Antônio Frizzone
Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP

Prof. Dr. Luis Carlos Timm
Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP

Prof. Dr. Samuel Beskow
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras

Agradecimentos

Primeiramente à minha família, minha mãe Neuza Rejane Gomes Nörenberg, meu pai Edgar Martin Nörenberg e minha irmã Marina Gomes Nörenberg por todo apoio e incentivo.

À Universidade Federal de Pelotas, mais especificamente ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, por ter proporcionado minha formação acadêmica, bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fornecimento de bolsa de estudos durante o curso de doutorado, a qual viabilizou a minha formação e realização das pesquisas que originaram essa tese.

Ao meu orientador, Professor Doutor Lessandro Coll Faria, pela orientação, apoio, confiança e empenho dedicado durante todo o período de realização deste curso de pós-graduação.

Agradeço a todos os professores e técnicos por me proporcionarem um grande crescimento pessoal e profissional, por tanto lutarem e se dedicarem no objetivo de fazer o Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos uma referência na área.

Meus agradecimentos aos amigos e colegas que fizeram parte da minha formação e que com certeza vão continuar presentes em minha vida.

Agradeço a todos os estagiários, colegas e, em especial, ao amigo José Henrique Nunes Flores pelo empenho dedicado aos ensaios de campo para a realização deste trabalho.

Professores do setor de Irrigação do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel pela disponibilidade, em especial aos professores Dr. Vitor Emanuel Quevedo Tavares e Dr. Luis Carlos Timm, e, também aos funcionários da Embrapa Terras Baixas, em especial ao pesquisador Dr. José Maria Barbat Parfitt pelo auxílio e dedicação nos trabalhos efetuados em campo, os quais deram início a este estudo.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Resumo

NÖRENBERG, Bernardo Gomes. **Índices de desempenho da irrigação pressurizada com base na distribuição logística de probabilidades**. 2022. 64f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

Com a crescente demanda por recursos hídricos e energéticos, bem como com o aumento da pressão da sociedade para, especialmente no ramo do agronegócio, adotar meios produtivos mais eficientes e que visem minimizar os impactos ambientais associados aos diversos processos produtivos, os avanços na agricultura irrigada se fazem necessários, com a adoção de métodos e sistemas de irrigação que possuem a capacidade de suprir a demanda hídrica das culturas utilizando um volume menor de água, tornando assim essa atividade ambientalmente e economicamente mais sustentável. Para isso, se faz necessário que os sistemas de irrigação depois de instalados, sejam avaliados e monitorados, para que se mantenham operando com elevados níveis de eficiência do uso dos recursos. Dessa forma, esse estudo objetivou propor dois coeficientes de uniformidade de distribuição de água, um usando o desvio médio da lâmina de água e o outro relacionado à média do quartil inferior da lâmina de água coletada, com base na distribuição logística de probabilidades, bem como gerar um conjunto de equações que possibilitem a avaliação da eficiência de distribuição de água do equipamento, do montante de água perdido por percolação e, também, da porção de água que faltou para a cultura devido a desuniformidade, também usando como base a distribuição logística de probabilidades. Para validar as equações de determinação da uniformidade de distribuição de água propostas com base na distribuição logística de probabilidades, foram utilizados dados de distribuição espacial de água de 57 ensaios realizados com aspersores modelos Agropolo/NY e Naan/5024, cujo ângulo de inclinação do jato de água é de 12°, operando isoladamente em diferentes condições de vento, sendo simuladas no total 90 sobreposições com diferentes espaçamentos. Foram realizados 29 ensaios de distribuição de água com um equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel equipados com aspersores Senninger modelo I-Wob com reguladores de pressão de 10psi operando em diferentes condições de vento, e, também, foram realizados 26 ensaios do gotejador RainBird XF-SDI com diâmetro nominal de 16 mm, vazão nominal de 2,27 L.h⁻¹, autocompensante, com faixa de operação nominal de 6,02 a 42,22 m e com diâmetro interno de 13,65 mm. Os coeficientes de uniformidade baseados na distribuição logística de probabilidades foram os que melhor representaram os valores dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de Distribuição (DU) para os 29 ensaios equipamento de irrigação do tipo lateral móvel bem como para os 26 ensaios dos gotejadores RainBird XF-SDI. Já para as 90 sobreposições de aspersores de impacto de média pressão, os coeficientes com base na distribuição normal de probabilidades foram os que melhor representaram os valores de CUC e DU medidos. Os indicadores que indicam a qualidade de irrigação, o coeficiente de distribuição, fator de disponibilidade, eficiência de distribuição e o déficit médio, baseados na distribuição logística de probabilidades, introduziram um

método novo com acurácia comprovada para avaliar sistemas de irrigação, quando comparado com os métodos existentes na literatura.

Palavras-chave: Avaliação da irrigação. Irrigação. Aspersão. Gotejamento. Estatística.

Abstract

NÖRENBERG, Bernardo Gomes. Logistic based performance indexes of pressurized irrigation. **Performance indexes of pressurized irrigation based in the logistic probability function**. 2022. 64p. Thesis (Doctor in Water Resources) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

In a growing demand for water and energy resources, at the same time with the Society pressure over the agribusiness, especially the irrigated agriculture, adopt more advanced and efficient growing technics to minimize the environmental impacts using less power and water resources, keeping the profitability of the land. To reach out these subjects, it is mandatory that the irrigations systems after installed get a complete evaluation and keep its operations monitored, maintaining high efficiency of the system along the time, allowing the grower to use less water and energy. This study aimed to propose two uniformity of distribution coefficients, the first using the average deviation of the collected water and the second adopting the low quarter average of the collected water, both basing on the logistics probabilistic distribution. Also, this study proposed a group of performance equations that allow evaluates the efficiency of distribution, the water lost by deep seepage and the area underirrigated by the nonuniformity, based on the logistics probabilistic distribution. To evaluate the goodness-of-fit of the proposed uniformity of distribution equations, that was used the date of 57 single sprinkle in-field tests with medium sized sprinklers models Agropolo/NY e Naan/5024, jet angle of 12°, in a wind condition and simulating 90 overlapping with different spacing. In the mechanical lateral move system that was performed 29 in-field tests using sprinklers Senninger model I-Wob with 10 psi pressure regulator. In the drip irrigation system that was performed 26 indoor tests with a RainBird model XF-SDI, nominal diameter of 16 mm (13.65 mm internal), nominal flow 2.27 L.h⁻¹, autocompensating and with operating pressure between 6,02 and 42,22 wcm. The uniformity coefficients based on the logistics probability distribution were the best to describe the Christiansen Uniformity coefficient (CUC) and the Distribution Uniformity (DU) to the 29 in-field tests of the mechanical lateral move system and to the 26 indoor tests of the RainBird XF-SDI drip irrigation system. To the 90 overlapping of the single sprinkler in-field test the uniformity coefficient based on normal probability distribution were those that achieved the best goodness-of-fit with de CUC and DU obtained in-field. The group of performance equations that allow evaluates the efficiency of distribution, the water lost by deep seepage and the area underirrigated by the nonuniformity, based on the logistics probabilistic distribution introduced a new and more accurate method to evaluate different irrigation systems that those existing on the literature.

Keywords: Irrigation Evaluation. Irrigation. Sprinkler irrigation. Drip irrigation. Statistics.

Lista de Figuras

Figura 1 – Produtividade das culturas irrigadas e de sequeiro.....	18
Figura 2 – Esquema da malha de coletores para ensaios de distribuição de água do aspersor operando isoladamente.	28
Figura 3 – Esquema do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel: (A) Vista frontal do equipamento e kit coletores de água. (B) Detalhe do emissor tipo spray de placa oscilante (I-WOB) e medidor de pressão LÁMON localizado no equipamento linear móvel. (C) Vista superior com detalhes do equipamento e espaçamento entre coletores.	29
Fonte: Adaptado de Manke et al. (2019)	29
Figura 4 – Croqui da bancada experimental para determinação de perda de carga.....	30
Figura 5 – Manômetro diferencial para leituras utilizando mercúrio e água.	31
Figura 6 – Coletor de água utilizado e balança de precisão.....	32
Figura 7 – Função cumulativa de probabilidade (CDF) da FDP logística, considerando uma área adequadamente irrigada (AAI) de 80%.....	40
Figura 8 – Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (DU) e os coeficientes de uniformidade com bases nas FDPs normal, uniforme e logística em função do coeficiente de variação (CV) para os ensaios de irrigação por aspersão convencional.....	43
Figura 9 – Comparativo entre os coeficientes de uniformidade com base nas FDPs normal, uniforme e logística com o CUC e DU para os ensaios de irrigação por aspersão convencional.....	45
Figura 10 – Erro relativo entre os coeficientes de uniformidade com base nas FDPs normal, uniforme e logística e os valores de CUC e DU para os ensaios de irrigação por aspersão convencional.....	47
Figura 11 – Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (DU) e os coeficientes de uniformidade com bases nas FDPs normal, uniforme e logística em função do coeficiente de variação (CV) para os ensaios de irrigação por aspersão mecanizada do tipo lateral móvel.	48
Figura 12 – Comparativo entre os coeficientes de uniformidade com bases nas FDPs normal, uniforme e logística com o CUC e DU para os ensaios de irrigação por aspersão mecanizada do tipo lateral móvel.	50

Figura. 13 – Erro relativo entre os coeficientes de uniformidade com bases nas FDPs normal, uniforme e logística e o CUC e o DU para os ensaios de irrigação por aspersão mecanizada do tipo lateral móvel.	51
Figura 14 – Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (DU) e os coeficientes de uniformidade com bases nas FDPs normal, uniforme e logística em função do coeficiente de variação (CV) para os ensaios de irrigação por gotejamento.....	52
Figura 15 – Comparativo entre os coeficientes de uniformidade com base nas FDPs normal, uniforme e logística com o CUC e DU para os ensaios de irrigação por gotejamento.....	54
Figura. 16 – Erro relativo entre os coeficientes de uniformidade com base nas FDPs normal, uniforme e logística e o CUC e o DU para os ensaios de irrigação por gotejamento.....	55

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Velocidade média e direção do vento e combinações de bocal e pressões de serviço dos ensaios de campo com aspersores operando isoladamente.	27
Tabela 2 – Modelo, capacidade e precisão dos equipamentos da bancada experimental.....	30
Tabela 3 – Coeficiente de distribuição (H), fator de disponibilidade (F), eficiência de distribuição (E) e déficit médio (Da) baseado na FDP logística.....	56
Tabela 4 – Comparação entre os indicadores de qualidade de irrigação estimados com as FDPs normal e logística, considerando uma área adequadamente irrigada de 80% (AAI = 80%).....	58

Sumário

1	Introdução	14
2	Revisão da Literatura	17
2.1	Importância e caracterização da irrigação	17
2.2	Ensaio de campo para avaliação da uniformidade de irrigação.....	19
2.2.1	Aspersores de impacto de pressão intermediária	19
2.2.2	Sistemas mecanizados de irrigação tipo lateral móvel.....	19
2.2.3	Linhas laterais de gotejadores	20
2.3	Medidas de uniformidade de distribuição de água.....	21
2.4	Uso de funções densidade de probabilidade para modelar a lâmina de água aplicada por sistemas de irrigação	23
2.5	Indicadores de qualidade da irrigação	24
3	Metodologia.....	27
3.1	Ensaio de campo para avaliação da uniformidade de irrigação.....	27
3.1.1	Aspersores de impacto de pressão intermediária	27
3.1.2	Sistemas mecanizados de irrigação tipo lateral móvel.....	28
3.1.3	Linhas laterais de gotejadores	29
3.2	Medidas da uniformidade de distribuição de água.....	32
3.3	Distribuições de probabilidade: aplicabilidade da FDP logística no equacionamento dos coeficientes de uniformidade	33
3.3.1	Coeficiente de Uniformidade de Christiansen baseado na FDP logística (CU _{LOG})	33
3.3.2	Coeficiente de uniformidade de distribuição baseado na FDP logística (DU _{LOG}	36
3.4	Comparação entre os coeficientes de uniformidade baseados nas FDPs normal, uniforme e logística com o CUC e DU	39
3.5	Indicadores de qualidade da irrigação baseados na FDP logística	40
5	Resultados	43
5.1	Aplicabilidade do CU _{LOG} e DU _{LOG} para sistemas de irrigação por aspersão usando aspersores de impacto de pressão intermediária	43
5.2	Aplicabilidade do CU _{LOG} e DU _{LOG} para sistemas de irrigação por aspersão mecanizada do tipo lateral móvel	47
5.3	Aplicabilidade do CU _{LOG} e DU _{LOG} para sistemas de irrigação localizada por gotejamento	52
5.4	Indicadores de qualidade de irrigação baseados na FDP logística	56
6	Conclusões.....	60

7. Referências	61
----------------------	----

1 Introdução

No cenário mundial atual, onde a demanda por recursos hídricos e energéticos está em uma crescente, concomitantemente com o aumento da pressão da sociedade para, especialmente o ramo do agronegócio, trabalhar com meios produtivos mais eficientes, que visem minimizar os impactos ambientais associados aos diversos processos produtivos, a viabilidade econômica e a própria sustentabilidade da agricultura irrigada dependem do emprego de técnicas que proporcionem o uso mais eficiente dos recursos hídricos e energéticos disponíveis.

Nesse sentido, nota-se nos últimos anos o aumento da adoção de métodos e sistemas de irrigação com maior eficiência e, também com maior tecnologia embarcada, como por exemplo, os sistemas de irrigação por aspersão mecanizados tipo pivô central e lateral móvel, bem como, os sistemas de irrigação localizada por gotejamento. Esses sistemas, se bem dimensionados e manejados, têm a capacidade de operar com elevados índices de eficiência, levando às propriedades rurais o que há de mais moderno na tecnologia de irrigação no mundo.

Além disso, um conjunto de fatores que muitas vezes são negligenciados (avaliação, manutenção e monitoramento da qualidade da irrigação) estão diretamente relacionados com o bom funcionamento do sistema de irrigação bem como de sua eficiência em aplicar água à cultura.

Dessa forma, se faz necessário abordar os principais fatores que afetam a eficiência de funcionamento de um equipamento de irrigação pressurizado, podendo eles ser classificados em dois grupos, os fatores intrínsecos ao equipamento, que são todos aqueles fatores que são inerentes ao equipamento e ao projeto em si, como, por exemplo, o padrão de distribuição de água aplicado por um aspersor e o espaçamento entre os emissores de água. E, os fatores externos ao equipamento, que são os fatores que não são diretamente relacionados ao equipamento de irrigação, e o que tem maior destaque é o vento.

A combinação desses fatores pode reduzir a uniformidade de aplicação de água de um equipamento de irrigação, essa desuniformidade de aplicação de água ocasiona frações da área irrigada recebendo água em excesso e outras parcelas recebendo menor quantidade de água do que o projetado e assim podendo causar estresse hídrico na cultura irrigada. Para que isso não aconteça, se faz necessário estimar a

desuniformidade de aplicação de água pelo sistema, e compensar o volume de água aplicado para que uma parcela da área a ser definida, receba uma quantidade mínima de água que proporcione o pleno desenvolvimento da cultura.

Neste contexto, é necessário avaliar e monitorar qualitativamente e quantitativamente o funcionamento dos sistemas de irrigação, para que a sua eficiência seja sempre considerada a mais próxima possível da realidade, bem como atuar no auxílio do momento correto na substituição de componentes ou até do próprio sistema. Para isso, existem na literatura diversos métodos que avaliam os sistemas de irrigação, por meio de diferentes coeficientes de uniformidade, sendo que esses coeficientes medem a variação da lâmina aplicada pelo equipamento de irrigação ao longo da área irrigada.

Além disso, também se faz necessário a utilização de métodos que forneçam além da variação da lâmina de água ao longo da área, também métodos para que o projetista ou o irrigante possam fazer uma análise quantitativa de qual a porção de água que está sendo aplicada, está sendo efetivamente utilizada pela cultura, qual a fração que está sendo perdida por percolação bem como quanto de água faltou para a cultura devido à desuniformidade do sistema.

Com isso, ao longo dos anos diversos pesquisadores têm utilizado diferentes métodos para estimar os indicadores que indicam a qualidade da irrigação, sendo que o primeiro método adotado baseado no uso do desvio médio absoluto da lâmina de água coletada adimensionalizado pela da média, conhecido como Coeficiente de Uniformidade de Christiansen. Ao longo dos anos, diversos autores introduziram o uso de funções densidade de probabilidades (FDPs) para modelar o perfil da lâmina de água aplicada por sistemas de irrigação, e até os dias atuais, a FDP mais utilizada é a normal.

Porém, com o avanço tecnológico em engenharia de irrigação, com modelos de aspersores, equipamentos com maior nível de tecnologia embarcada, a prática da irrigação vem apresentando maiores níveis de uniformidade de distribuição de água. Com isso, surgiu a necessidade da avaliação de FDPs que apresentem uma maior capacidade de se ajustar ao padrão de distribuição de água desses equipamentos. Nesse contexto, a logística é uma das FDPs que apresenta uma melhor capacidade em descrever a lâmina de água aplicada com elevados níveis de uniformidade.

Com o uso de FDPs que apresentem um adequado ajuste à distribuição da lâmina aplicada por um sistema de irrigação, pode-se conhecer as frações da área irrigada que receberão determinadas quantidades de água, bem como estimar o volume de água em déficit ou em excesso, por exemplo. A combinação dessas informações será capaz de fornecer ao irrigante os dados necessários para correta tomada de decisão com relação às manutenções necessárias do sistema, se aquele momento do dia é o mais indicado para se irrigar, ou também, qual é a quantidade de água que está sendo efetivamente aproveitada pela cultura, auxiliando assim o cálculo da lâmina bruta de irrigação.

Dessa forma, este estudo teve por objetivos: i) propor e validar a aplicação de dois coeficientes de uniformidade de distribuição de água, um usando o desvio médio da lâmina de água e o outro relacionado à média do quartil inferior da lâmina de água coletada, com base na FDP logística; ii) gerar um conjunto de equações que possibilitem a avaliação da eficiência de distribuição de água do equipamento, do montante de água perdido por percolação e, também, da porção de água que faltou para a cultura devido à desuniformidade, usando como base a mesma FDP.

2 Revisão da Literatura

2.1 Importância e caracterização da irrigação

De acordo com dados do Atlas da Irrigação da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), a irrigação tem os primeiros registros históricos nas antigas civilizações do Egito e da Mesopotâmia; no Brasil, os primeiros registros da adoção dessa técnica são do início do século XX, no Rio Grande do Sul, adotando o sistema de irrigação por inundação para as plantações de arroz. No Brasil, a irrigação teve importante expansão a partir das décadas de 70 e 80, com o avanço dos cultivos de grãos no Sudeste e centro-oeste do país, onde a prática da irrigação possibilitou a realização da safra, também nas estações sem chuva (ANA, 2017).

Em escala global, no ano de 2007, o consumo de água foi cerca de 3918 km³, sendo 12% para consumo urbano e rural, 19% destinado ao consumo industrial e o restante (69%) destinado para a agricultura irrigada. Já no Brasil, em 2007, o volume de água consumido foi de 74,8 km³, sendo a agricultura irrigada a atividade que mais utilizou água (60%), o restante estando dividido entre abastecimento urbano e rural (23%) e abastecimento industrial (17%) (FAO, 2021).

De maneira geral, a agricultura irrigada possui uma produtividade 2,7 vezes maior do que a agricultura de sequeiro, que depende da variabilidade temporal e espacial da chuva. Dessa forma, a irrigação possibilita a melhora no manejo da produção, assegurando a produtividade em períodos de estiagem e, assim, garantindo a utilização dos recursos naturais de maneira mais sustentável (CHRISTOFIDIS, 2013).

Na Figura 1 é possível ver o comparativo de produtividade das culturas de feijão, trigo e arroz irrigados e de sequeiro, realizado pela ANA (2017). Analisando a Figura 1 é possível notar a maior produtividade das culturas irrigadas frente às culturas de sequeiro, se tornando uma opção para o aumento da produtividade de forma vertical.

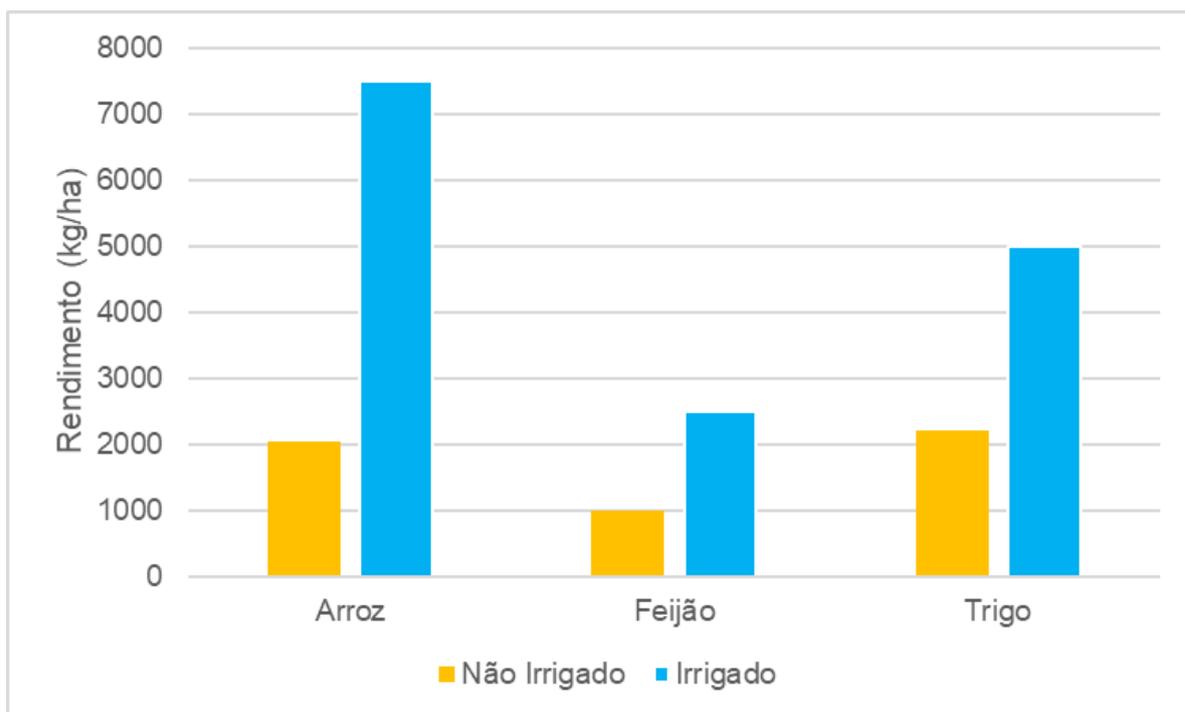


Figura 1 – Produtividade das culturas irrigadas e de sequeiro.
 Fonte: Adaptado de ANA, 2017.

Nesse sentido, conforme Molden et al. (2007), melhorar a produtividade da água é papel fundamental, tendo em vista que se estima no ano de 2050, se mantidos os níveis de eficiência de utilização da água e produtividade das culturas obtidos atualmente, o consumo de água pela agricultura aumentará cerca de 70 a 90%.

Frente à crescente demanda e competição pelos recursos hídricos, uma solução é a adoção de sistemas de irrigação que apliquem a água de maneira mais eficiente, como os sistemas de irrigação pressurizados (YACOUBI et al., 2012). Tendo em vista a necessidade de adoção de sistemas de irrigação com maior eficiência de aplicação de água e, de acordo com Smesrud e Selker (2001), determinar os índices de eficiência de irrigação, que além de auxiliar o projetista no dimensionamento do sistema, possibilitam a redução no consumo de água devido à subestimação da eficiência de irrigação e, para isso, aplicar um volume de água maior do que o requerido pela cultura, como um coeficiente de segurança.

2.2 Ensaios de campo para avaliação da uniformidade de irrigação

2.2.1 Aspersores de impacto de pressão intermediária

A fim de padronizar e normatizar os equipamentos de irrigação com aspersores de tamanho médio, foi criada a norma ISO 15886 (ISO - International Organization for Standardization). Estando a norma dividida em três partes: sendo a ISO 15886-1 a que define os termos e parâmetros de aspersores de impacto, a ISO 15886-2 que trata sobre os padrões de projeto, dimensionamento e operação desses equipamentos, e, por fim, a ISO 15886-3 que determina os critérios de avaliação de desempenho desses sistemas operando tanto em campo como em ambiente fechado (ISO, 2012; ISO, 2021a, b).

As medidas de desempenho de um aspersor incluem a uniformidade de distribuição de água, o raio molhado e a altura do jato de água. Para isso, a ISO 15886-3 aplica a todos os equipamentos essas três medidas, a fim de verificar se o equipamento está operando dentro dos padrões recomendados pelos fabricantes (ISO, 2021b).

Conforme definido na ISO 15886-3, para testes de campo de aspersores de impacto de pressão intermediária, os coletores devem formar uma malha, instalados em um terreno plano, com não mais do que 2% de declividade, não podendo possuir qualquer obstáculo que possa bloquear ou interferir o movimento das gotas de água pelo ar. Além disso, a vegetação existente não pode ser mais alta do que a borda do coletor para que não haja influência na coleta de água pelos coletores (ISO, 2021b).

Quatro medidas de uniformidade de distribuição de água são sugeridas na ISO 15886-3, sendo eles o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), o coeficiente de uniformidade de Wilcox e Swales (CU_{WS}), o coeficiente de uniformidade de distribuição (DU) e o Scheduling Coefficient (SC) (ISO, 2021b).

2.2.2 Sistemas mecanizados de irrigação tipo lateral móvel

Para a avaliação de equipamentos de irrigação mecanizados tipo pivô central e lateral móvel, existem duas principais normas que regulamentam essa atividade, sendo que no Brasil é adotada a ABNT/ISO 11545. Esta norma especifica um método de campo para determinação da uniformidade de distribuição da água no campo de

máquinas de irrigação pivô central e lateral móvel equipadas com aspersores ou *sprayers* (ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016).

A norma ABNT/ISO 15545 define que para ensaios de avaliação de equipamentos mecanizados de irrigação do tipo lateral móvel deve-se utilizar coletores dispostos no campo ao longo da linha lateral do equipamento, com espaçamento mínimo entre coletores de 3 metros e com no mínimo duas linhas paralelas, não distantes mais do que 50 metros uma da outra. Além disso, a abertura dos coletores deve estar localizada acima da cultura irrigada para que não haja nenhuma interferência na distribuição das gotas aspergidas (ABNT, 2016). Além disso, segundo a ABNT (2016), deve-se medir as variáveis meteorológicas pertinentes como velocidade e direção do vento, temperatura e umidade relativa do ar e, também, a pressão de operação no início da linha lateral do equipamento de irrigação.

Como parâmetro de avaliação do equipamento de irrigação, o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) é sugerido pela ABNT (2016) na norma ABNT/ISO 11545. Sendo que o coeficiente de uniformidade calculado deve ser utilizado como um indicador do desempenho do conjunto aspersor em relação às condições do campo, ambientais e de pressão, e às variações de pressão que prevalecem durante o ensaio. Além disso, segundo a ABNT (2016). O CUC também pode ser utilizado para a comparação de diferentes tipos de conjuntos aspersores.

2.2.3 Linhas laterais de gotejadores

Para estabelecer os métodos de ensaios de conformidade de gotejadores e tubos emissor, bem como para padronizar os requisitos mecânicos e funcionais para emissores e tubos emissores para irrigação agrícola e, onde aplicável, suas conexões, foi criada a norma técnica ABNT/ISO 9261 (ABNT, 2006).

Como critério de ensaio, a ABNT (2006), por meio da norma ABNT/ISO 9621, determina que os ensaios de uniformidade de distribuição de água, devam ser realizados à temperatura de ar ambiente e a uma temperatura de água de $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Também deve assegurar-se de que será usada água clara e filtrada por um filtro com abertura nominal de 75 a 100 μm , ou conforme recomendado pelo fabricante, com uma carga total de contaminantes que não exceda 25 mg L^{-1} .

O procedimento padrão para o ensaio exige uma estabilização do sistema, a qual consiste em manter-se durante 3 minutos a pressão igual à pressão nominal

mínima e mais 3 minutos com pressão nominal máxima do tubo emissor. Repete-se por três vezes e, por fim, estabiliza-se durante 1 hora na pressão a ser ensaiada. Para calcular a uniformidade de distribuição de água, deve-se medir a vazão das unidades de emissores/tubos emissores com a pressão de água na entrada da linha igual à pressão a ser ensaiada e assim, registrar a vazão medida em cada gotejador (ABNT, 2006).

Conforme recomendado pela ABNT (2006), na norma ABNT/ISO 9261, a medida padrão para a avaliação de sistemas de irrigação por gotejamento é o coeficiente de variação da vazão ao longo da linha lateral.

2.3 Medidas de uniformidade de distribuição de água

Frente a necessidade da otimização do uso da água e mantendo a boa produtividade das culturas irrigadas, para que o produtor rural se manter competitivo, se faz necessário quantificar, tanto na fase de projeto, na fase de implantação bem como com o sistema já em operação, a eficiência que o sistema de irrigação está aplicando a água no campo (BURT et al., 1997). De acordo com Heermann et al. (1992), a uniformidade de distribuição da água aplicada pelos equipamentos de irrigação por aspersão é o fator que mais afeta a eficiência desses sistemas, reforçada assim a importância se dimensionar e manejar corretamente esses sistemas de irrigação.

Conforme apontado por Chaudhry (1976), a uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação é determinada com base em coeficientes de uniformidade. Sendo esses coeficientes medidas da dispersão da água aplicada na área irrigada, permitem avaliar a qualidade e a adequabilidade do sistema de irrigação em condições de operação.

Entretanto, conforme relatado por Walker (1979), quanto maior a uniformidade de aplicação e a eficiência de um sistema de irrigação, maior será o seu custo de implantação e operação, sendo o desafio dos projetistas desenhar e manejar os sistemas com elevados índices de eficiência, sem elevar muitos os custos, e assim, tornar possível o aumento da produtividade na área com economia de fertilizantes e redução do impacto ambiental ocasionado pela prática da irrigação.

Para comparar os padrões de distribuição de água e avaliar os sistemas de irrigação operando sob diferentes condições, tanto climáticas quanto operacional, foi

proposto o Coeficiente de Uniformidade (CHRISTIANSEN, 1942), posteriormente chamado de Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) (Equação 1).

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |X_i - \mu|}{n \cdot \mu} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Onde X_i : Lâmina coletada no coletor “i” (mm);

μ : Lâmina de água média (mm);

n: Número de coletores.

Posteriormente ao desenvolvimento do CUC, Wilcox e Swailes (1947) propuseram o CU_{ws} , o qual ao invés de usar o desvio absoluto médio da lâmina como o CUC, abordou o coeficiente de variação (CV) expresso em decimal da lâmina de água aplicada pelo equipamento de irrigação ao longo da área irrigada (Equação 2).

$$CU_{ws} = (1 - CV) \cdot 100 \quad (2)$$

Criddle et al. (1956) sugerem a estimativa do Coeficiente de uniformidade de distribuição (DU) (Equação 3), definido como a uniformidade que a água aplicada é distribuída em diferentes áreas do terreno e levando em conta para a determinação da uniformidade a média do quartil inferior das lâminas coletadas no ensaio (LQA).

$$DU = \frac{(LQA)}{\bar{x}} \quad (3)$$

Hart (1961) identificou que a FDP normal se ajusta adequadamente ao perfil de lâmina de água aplicada por sistemas de irrigação por aspersão do tipo convencional, desta forma propôs a utilização do Coeficiente de Uniformidade da Associação Havaiana dos Produtores de Açúcar (CU_H), Equação 4, o qual é obtido correlacionando o desvio médio com a FDP normal. Concomitantemente, Hart (1961) também correlacionou o LQA com a FDP normal, vindo a propor o Eficiência Padrão da Associação Havaiana dos Produtores de Açúcar (PE_H), Equação 5.

$$CU_H = (1 - 0.798 CV) \cdot 100 \quad (4)$$

$$PE_H = (1 - 1,27 CV) \cdot 100 \quad (5)$$

Karmeli (1978) comparou a qualidade do ajuste das lâminas de água aplicadas por sistemas de irrigação por aspersão do tipo convencional às FDPs normal e uniforme. O autor concluiu que o desempenho das duas FDPs apresenta resultados similares foi similar quando operando com valores de uniformidades aceitáveis. Warrick (1983) propôs a estimativa o coeficiente de uniformidade para a FDP uniforme (Equação 6) e do coeficiente de uniformidade de distribuição com base na FDP uniforme (Equação 7), ambos os coeficientes relacionados ao coeficiente de variação da lâmina de água coletada.

$$CU_U = (1 - 0.866 \cdot CV) \cdot 100 \quad (6)$$

$$DU_U = (1 - 1,30 \cdot CV) \cdot 100 \quad (7)$$

2.4 Uso de funções densidade de probabilidade para modelar a lâmina de água aplicada por sistemas de irrigação

De acordo com Elliot et al. (1980), a distribuição da água aplicada por um equipamento de irrigação exerce uma grande influência na operação do sistema, e para analisar a distribuição de água, pode-se adotar funções densidade de probabilidade (FDPs) teóricas.

Para indicar a fração da área que está recebendo uma determinada quantidade de água pode-se adotar a função cumulativa de probabilidades (FCPs), a qual é matematicamente igual à probabilidade de excedência, permitindo demonstrar a fração da área que recebeu uma lâmina de água igual ou maior do que uma determinada lâmina (ANYOJI e WU, 1994). Usando essas frações, conforme indicado por Hart e Reynolds (1965), pode-se determinar indicadores que indicam a qualidade com que a irrigação está sendo realizada.

Ao longo da história, a FDP normal tem se mostrado adequada para modelar a distribuição de água aplicada por sistemas de irrigação. Além disso, ao longo do tempo foram propostas funções capazes de determinar os indicadores que demonstram a

eficiência de irrigação com base na FDP normal (HART e REYNOLDS, 1965; ANYOJI e WU, 1994 HEERMANN et al. 1995).

Karmeli (1978), comparando a qualidade em representar perfis de distribuição de água das FDPs normal e uniforme em sistemas de irrigação por aspersão convencional, observou que quando o sistema opera com baixos índices de uniformidade, a FDP uniforme é a que melhor representa a lâmina aplicada, entretanto, para irrigação com elevados índices de uniformidade, as duas FDPs apresentam resultados semelhantes e satisfatórios. No mesmo sentido, Faria et al. (2019) avaliaram as FDPs normal, uniforme, Weibull, gama e logística para modelar a lâmina de água aplicada por um equipamento de irrigação do tipo lateral móvel, concluindo que a Logística e a Weibull foram as FDPs que forneceram melhores desempenho na modelagem da lâmina. Além disso, os autores ainda recomendaram o uso da FDP logística por sua maior facilidade e simplicidade de uso.

De acordo com Warrick, Hart e Yatayew (1989), o uso de FDPs para modelar a distribuição da lâmina aplicada por um equipamento de irrigação apresenta melhores resultados quando comparados com as medições diretas dos dados obtidos em campo. Visando facilitar a adoção de FDPs teóricas, os mesmos autores propuseram uma metodologia para calcular os indicadores de desempenho de sistemas de irrigação a partir dos parâmetros das FDPs normal, log-normal, uniforme e potência especializada.

A fim de avaliar a qualidade da prática de irrigação, Hart e Reynolds (1965) propuseram uma metodologia para determinar a fração de água aplicada de forma adequada para a planta, bem como a porção de água que foi perdida por percolação e também a fração de água que ficou em déficit devido à desuniformidade da aplicação de água.

2.5 Indicadores de qualidade da irrigação

Diversos fatores podem interferir na uniformidade de distribuição da água de um sistema de irrigação por aspersão, como o espaçamento entre os aspersores, a velocidade e direção do vento, a pressão de operação do sistema, entre outros (CHRISTIANSEN, 1942).

Na prática, a distribuição de água aplicada por equipamentos de irrigação se dá de maneira imperfeita, forçando os irrigantes a sobreirrigar o que causa desperdícios de água e energia, além de lixiviar nutrientes da zona radicular influenciando na

qualidade da água no lençol freático, e de subirrigar uma parcela da área causando uma redução na produtividade da cultura (SMESRUD; SELKER, 2001). Desta forma, Hart e Reynolds (1965) propuseram uma metodologia para determinar a fração da área que recebe uma determinada lâmina de irrigação, baseando-se na função cumulativa de probabilidades da FDP normal, com o valor de área acumulado no intervalo de lâminas de irrigação analisado, concomitantemente com a uniformidade de distribuição de água, se torna possível calcular as áreas subirrigadas e sobreirrigadas.

A FDP normal, na sua forma cumulativa apresenta uma curva em forma de “S”, permitindo determinar a frequência ou a probabilidade de um valor ser igual ou menor a um valor específico. Com isso, baseado na FDP normal é possível determinar parcelas da área que receberam água adequadamente, parcelas que ficaram em déficit e a quantidade de água que foi aplicada em excesso (ANOYOJI e WU, 1994).

Assim, Hart e Reynolds (1965) indicaram que a FDP normal descreve adequadamente a distribuição de água aplicada por sistemas de irrigação. Esses autores também propuseram funções capazes de determinar os indicadores Coeficiente de distribuição (H); fator de disponibilidade (F); déficit médio (D_a) e a eficiência de distribuição (E) em função do Coeficiente de Uniformidade da Associação Havaiana dos Produtores de Açúcar (CU_H) (Equação 4) e da Eficiência Padrão da Associação Havaiana dos Produtores de Açúcar (PE_H) (Equação 5) propostos por Hart (1961), assim como a área adequadamente irrigada (AAI).

No mesmo sentido, porém utilizando um sistema de irrigação localizada do tipo gotejamento, Anyoji e Wu (1994) indicaram que a FDP normal representa adequadamente o perfil da lâmina de água aplicada por esse tipo de irrigação. Além disso, estes autores propuseram uma metodologia para determinar os indicadores de desempenho da irrigação (H, F, D_a e E) através do coeficiente de variação de vazão (CV) dos gotejadores ao longo da linha lateral.

Warrick et al. (1989) propuseram uma metodologia para calcular os indicadores de desempenho de sistemas de irrigação a partir dos indicadores das FDPs normal, log-normal, uniforme e potência especializada. Além disso, os autores observaram que estimar estes indicadores de desempenho através de FDPs teóricas podem gerar resultados melhores quando comparados com medições diretas com os dados obtidos em campo.

Segundo Smesrud e Selker (2001), a FDP normal não possui solução analítica para a sua FCP, então forçando os projetistas a usarem métodos numéricos, os quais são de difícil execução e necessitam de bastante trabalho. Devido ao fato de serem métodos de aproximação, não fornecem o resultado exato, mas sim, aproximado.

3 Metodologia

3.1 Ensaios de campo para avaliação da uniformidade de irrigação

3.1.1 Aspersores de impacto de pressão intermediária

Neste estudo, foram utilizados dados de distribuição espacial de água de Beskow et al. (2011) e apresentados por Faria et al. (2012), de 57 ensaios realizados com aspersores modelos Agropolo/NY e Naan/5024, cujo ângulo de inclinação do jato de água foi de 12°, operando isoladamente em diferentes condições de vento (Tabela 1).

Os ensaios de distribuição de água foram conduzidos de acordo com a norma ISO 7749-2 (ISO, 1990), e tiveram duração de 1 h. Foi utilizada uma malha de coletores do tipo lata de óleo (de cozinha), pintados na cor branca, com diâmetro interno de 83,5 mm e altura de 190 mm, situados a 500 mm da superfície do solo, regularmente espaçados de 2 m. As variáveis meteorológicas velocidade e a direção do vento foram registradas por meio de uma estação agrometeorológica modelo Vantage Pro2, em intervalos regulares de 5 min, localizada a 2 m de altura da superfície do solo e a 50 m da área irrigada.

Tabela 1 – Velocidade média e direção do vento e combinações de bocal e pressões de serviço dos ensaios de campo com aspersores operando isoladamente.

Agropolo/NY (Bocal = 3,5 mm)			Naan/5024 (Bocal = 3,0 mm)		
Pressão de serviço (kPa)			Pressão de serviço (kPa)		
194	245	294	245	294	343
Velocidade (m s ⁻¹) / Direção do vento (graus)			Velocidade (m s ⁻¹) / Direção do vento (graus)		
0,23 / 239,10	0,00 / 0,00	0,68 / 298,64	0,00 / 0,00	0,00 / 0,00	0,00 / 0,00
0,58 / 104,31	0,42 / 270,99	0,68 / 27,35	0,00 / 0,00	0,45 / 281,22	0,29 / 315,43
0,85 / 301,37	0,47 / 78,88	0,78 / 230,86	0,23 / 251,82	0,87 / 263,66	0,61 / 287,89
0,94 / 310,31	0,62 / 274,43	0,85 / 270,55	0,58 / 78,69	1,06 / 277,48	0,92 / 292,97
1,02 / 258,67	0,62 / 223,85	1,36 / 315,22	0,78 / 78,90	1,13 / 40,03	1,12 / 246,87
1,09 / 247,66	0,62 / 327,90	1,40 / 209,37	1,40 / 279,68	1,36 / 267,33	1,29 / 261,82
1,37 / 20,87	0,82 / 341,13	1,64 / 348,06	1,46 / 297,94	1,68 / 239,31	2,40 / 239,64
2,20 / 265,36	1,12 / 348,34	2,01 / 320,81	1,46 / 255,84	2,15 / 247,56	-
2,45 / 217,86	1,17 / 272,94	2,13 / 206,45	2,05 / 254,16	-	-
2,92 / 343,57	1,33 / 210,79	-	-	-	-
-	1,46 / 273,46	-	-	-	-
-	1,48 / 309,89	-	-	-	-
-	2,08 / 279,95	-	-	-	-
-	2,40 / 239,64	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Faria et al. (2012).

Os volumes de água coletados ao final de cada ensaio foram convertidos em valores de intensidade de precipitação (mm h^{-1}) e registrados em uma matriz “A”, de 12 m x 12 m. Na Figura 2 pode-se observar o sistema de eixos (X, Y) adotado nos ensaios de campo para identificação das coordenadas dos 144 coletores representados na matriz “A”, bem como a notação do registro do ângulo, que descreve a direção predominante do vento (Φ).

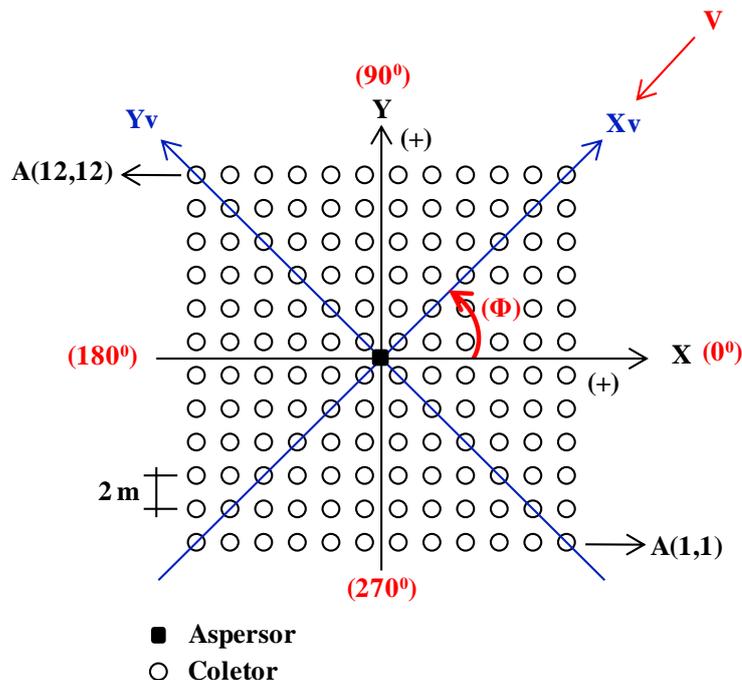


Figura 2 – Esquema da malha de coletores para ensaios de distribuição de água do aspersor operando isoladamente.

Fonte: Adaptado de Faria et al. (2012)

3.1.2 Sistemas mecanizados de irrigação tipo lateral móvel

Foram realizados 29 ensaios de distribuição de água com um equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel, conforme preconizado nas normas técnicas ABNT/ISO 11545 (ABNT, 2016). Seguindo as referidas normas técnicas, e ilustrado na Figura 3, foram instaladas duas linhas de coletores de plástico, espaçadas entre si em 20 m (Figura 3C, dimensão B), com 80 mm de diâmetro, espaçados uniformemente entre si em 2 m (Figura 3C, dimensão A).

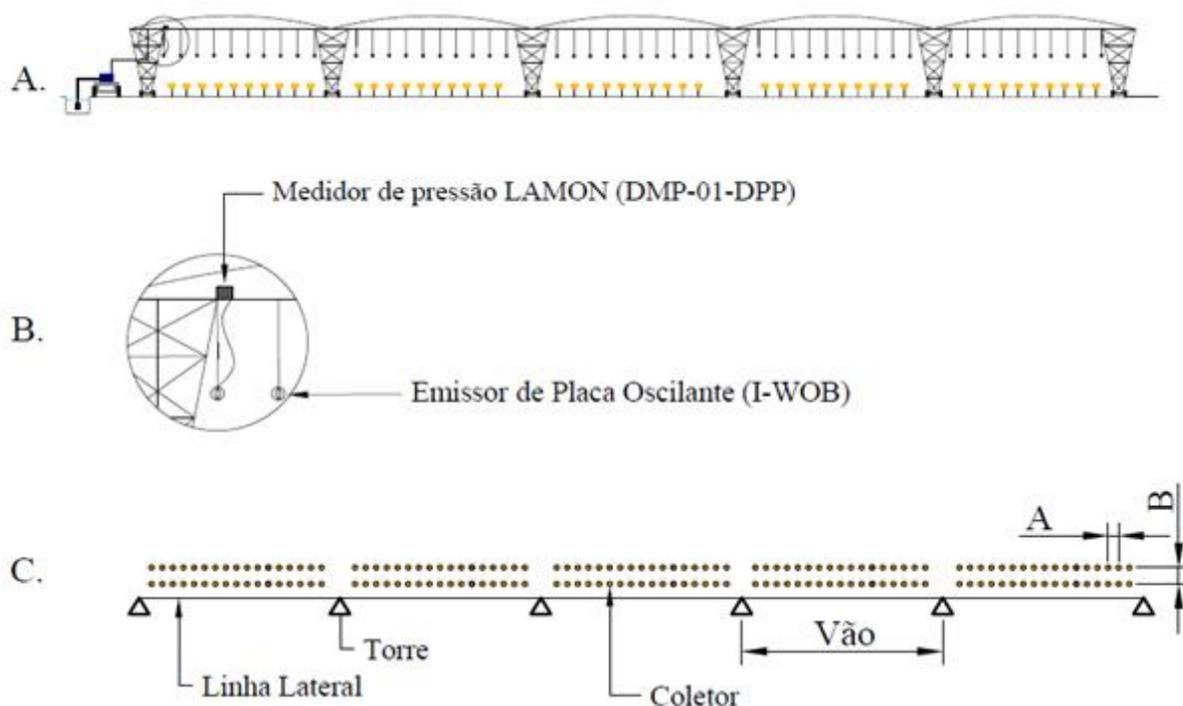


Figura 3 – Esquema do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel: (A) Vista frontal do equipamento e kit coletores de água. (B) Detalhe do emissor tipo spray de placa oscilante (I-WOB) e medidor de pressão LÁMON localizado no equipamento linear móvel. (C) Vista superior com detalhes do equipamento e espaçamento entre coletores.

Fonte: Adaptado de Manke et al. (2019).

Em todos os ensaios de campo do equipamento linear móvel, a umidade relativa, a temperatura, a velocidade e a direção de vento, a déficit de pressão de vapor e a radiação solar foram mensuradas a uma altura de 2 m em relação à superfície do solo, conforme o recomendado pela norma técnica ABNT/ISO 11545 (ABNT, 2016). Os dados foram coletados e gravados automaticamente em intervalos regulares de 1 min, utilizando-se uma estação meteorológica automática, modelo Monitor II da marca Davis. Além disso, conforme preconizado nas normas técnicas, a hora do dia em que os ensaios foram realizados também foi registrada.

Para a conferência da pressão de operação do equipamento de irrigação, foi realizado monitoramento ao longo de toda linha lateral do equipamento (Figura 3). Para isso, utilizou-se um medidor de pressão, marca LÁMON modelo DMP-01-DDP, instalado no início da linha lateral (Figuras 3A e 3B).

3.1.3 Linhas laterais de gotejadores

Para realizar os testes de distribuição de água ao longo de uma linha lateral de irrigação por gotejamento, utilizou-se os dados obtidos por Lima (2019), o qual adotou

uma bancada experimental de ensaios de tubos, tubos emissores e emissores de irrigação localizada (Figura 4), desenvolvida por Flores et al. (2017). A bancada experimental foi constituída por um reservatório acoplado a uma unidade de bombeamento, filtro de disco, tubulações e válvulas para controle de vazão e pressão, e equipamentos para realização de medições (Tabela 2), localizada no Laboratório de Irrigação e Hidráulica do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas.

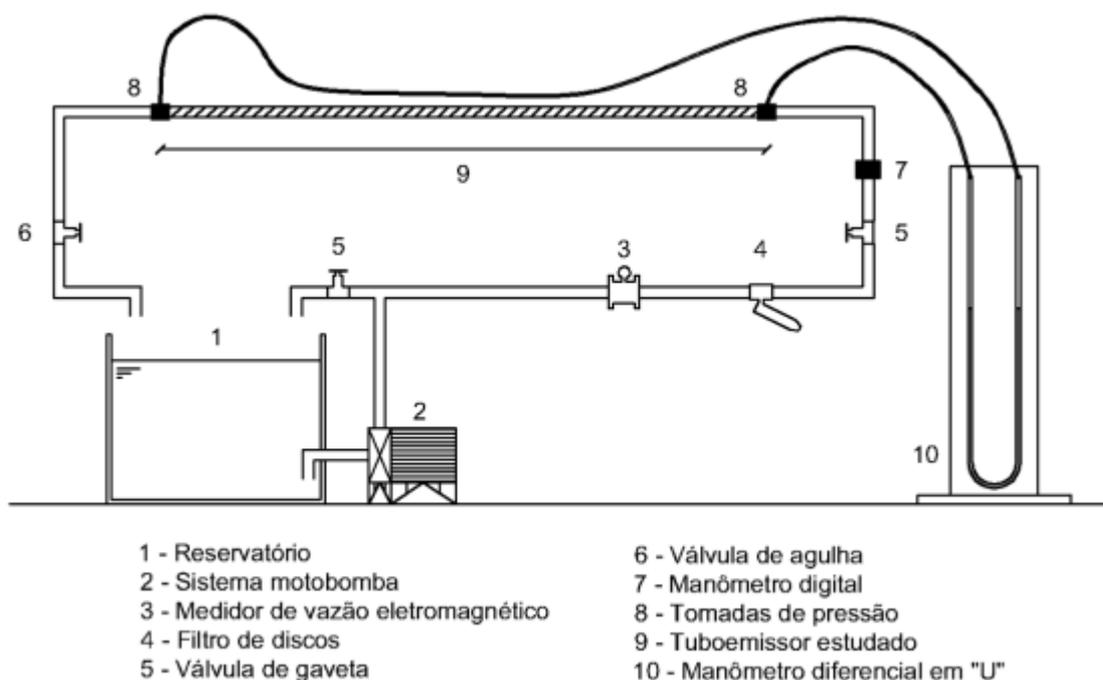


Figura 4 – Croqui da bancada experimental para determinação de perda de carga.
 Fonte: Flores et al. (2017)

Tabela 2 – Modelo, capacidade e precisão dos equipamentos da bancada experimental.

Figura	Equipamento	Modelo	Capacidade	Precisão
1	Reservatório	-- ⁽¹⁾	372 L	-- ⁽¹⁾
2	Bomba	KSB Hidrobloc P1000T	1 cv	-- ⁽¹⁾
4	Filtro de disco	Plastubos	120 mesh	-- ⁽¹⁾
-- ¹	Termômetro	-- ⁽¹⁾	0°C - 100°C	1°C
3	Medidor de Vazão	Krhone Conaut KC1000F/6	0 - 3,5 m ³ h ⁻¹ ⁽²⁾	0,005 VM ⁽³⁾
7	Manômetro	Lámon DMP-01 DPP	0 - 200 m	0,001 FE ⁽⁴⁾
10	Manômetro diferencial (água)	-- ⁽¹⁾	0 - 1,8 m ⁽⁵⁾	1 mm ⁽⁵⁾
10	Manômetro diferencial (mercúrio)	-- ⁽¹⁾	0 - 1,8 m ⁽⁶⁾	1 mm ⁽⁶⁾
-- ¹	Balança de precisão	SHIMADZU UX600H	6200 g	0,01 g

⁽¹⁾ não se aplica; ⁽²⁾ faixa de operação certificada; ⁽³⁾ valor medido; ⁽⁴⁾ fundo de escala, equivale a 0,2 m; ⁽⁵⁾ metros de coluna de água ($\gamma = 1.000 \text{ kgf m}^{-3}$); ⁽⁶⁾ metros de coluna de mercúrio ($\gamma = 13.600 \text{ kgf m}^{-3}$).

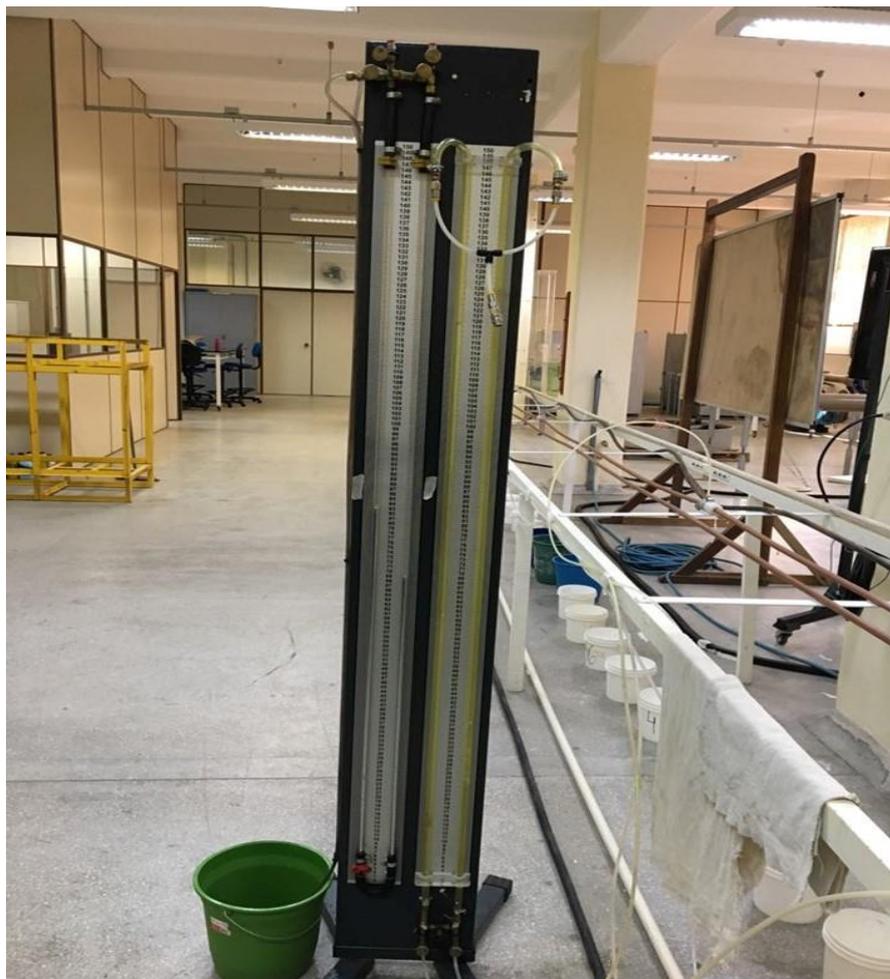


Figura 5 – Manômetro diferencial para leituras utilizando mercúrio e água.
Fonte: Lima (2019).

O tubo emissor estudado por Lima (2019) foi o modelo XF-SDI, fabricado pela RainBird, com diâmetro nominal de 16 mm, vazão nominal de $2,27 \text{ L h}^{-1}$, autocompensante, faixa de pressão de operação nominal de 6,02 a 42,22 mca, diâmetro interno de 13,65 mm e índice de obstrução de 0,28.

Para realização dos ensaios, foram adotados os requisitos da norma NBR ISO 9261/2006 (ABNT, 2006). O procedimento padrão para o ensaio consiste em primeiramente ligar a bomba; em um segundo momento, para estabilização do sistema, mantém-se durante 3 minutos a pressão igual à pressão nominal mínima e mais 3 minutos com a pressão nominal máxima, repetindo esse procedimento por três vezes; e, por fim, estabiliza-se durante 1 hora na pressão a ser ensaiada. A linha ensaiada foi constituída de 34 emissores, espaçados em 0,30 m, totalizando 10,2 m de comprimento entre a primeira e última tomada de pressão.

Os ensaios foram realizados com cargas de pressão de 5, 10, ... 45 m, sendo que para cada carga de pressão foram adotadas três condições de velocidade de escoamento: i) com o registro final fechado; ii) o registro final aberto resultando na velocidade inicial de fluxo de aproximadamente 1 m s^{-1} e iii) o registro final aberto resultando na velocidade inicial de aproximadamente 2 m s^{-1} .

A coleta de água se deu por meio de coletores com 3 litros de volume de capacidade, durante aproximadamente 30 minutos para cada condição. Para cada ensaio foram anotados os valores de vazão e carga de pressão inicial, temperatura da água no início e no final do ensaio, massa de água coletada em cada emissor e duração do ensaio, conforme Figura 6.

Com a massa de água coletada em cada emissor, com a temperatura da água e com a duração de cada ensaio, calculou-se a vazão do emissor. Baseado na vazão de entrada e na vazão individual dos emissores, calculou-se a vazão em cada trecho, e com base no diâmetro do tubo, calculou-se a velocidade de escoamento em cada trecho. O volume de água em cada emissor foi obtido por meio da densidade da água e da massa de água coletada em cada emissor e, a partir da duração do teste, a descarga do emissor foi calculada.

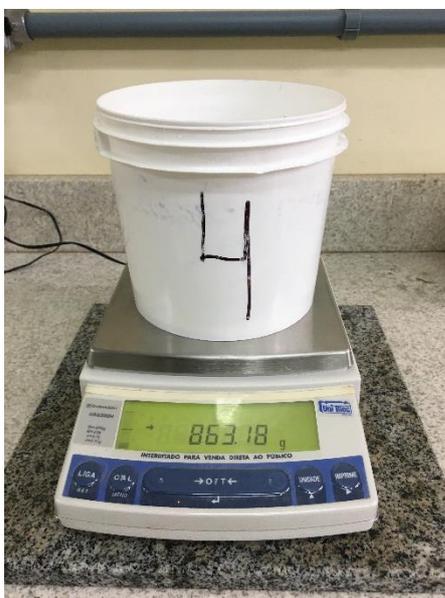


Figura 6 – Coletor de água utilizado e balança de precisão.
Fonte: Lima (2019).

3.2 Medidas da uniformidade de distribuição de água

Para determinar a uniformidade de distribuição de água no ensaios dos equipamentos avaliados foram usados os seguintes coeficientes: o coeficiente de

uniformidade de Christiansen (CUC), proposto por Christiansen (1942), equação 1; o coeficiente de uniformidade da Hawaiian Sugar Planters Association (CU_H), apresentado por Hart (1961), equação 4; o coeficiente de uniformidade baseado na FDP uniforme (CU_U), equação 6, proposto por Warrick (1983), os quais possuem como característica serem determinados com base no coeficiente de variação da lâmina de água coletada (CV).

Para determinar a eficiência padrão, de acordo com a nomenclatura dada por Hart (1961), foi adotado o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (DU), Equação 3, conforme proposto por Criddle et al. (1956); A Eficiência Padrão da Hawaiian Sugar Planters Association (PE_H) proposto por Hart (1961), Equação 5; e a Eficiência padrão baseado na FDP uniforme (DU_U) proposta por Warrick (1983) e apresentado na Equação 7.

3.3 Distribuições de probabilidade: aplicabilidade da FDP logística no equacionamento dos coeficientes de uniformidade

Para determinar os coeficientes de uniformidade baseados no CUC e no DU para a FDP logística foi adotada a metodologia proposta por Warrick (1983), onde foram relacionadas as equações de CUC e o DU com parâmetros de localização, forma e escala das FDPs log-normal, uniforme, potência especializada, beta e gama.

3.3.1 Coeficiente de Uniformidade de Christiansen baseado na FDP logística (CU_{Log})

A partir da Equação 1 e, considerando que o resultado do somatório da diferença entre a lâmina média coletada e a lâmina coletada no coletor “In” ($|\mu - X_i|$), dividido pelo número de coletores é igual ao desvio médio absoluto (AD), podemos definir como:

$$CUC = \left(1 - \frac{AD}{\mu}\right) \cdot 100 \quad (8)$$

O Desvio médio (AD) é descrito de acordo com a equação 9, onde após a sua expansão, resulta na equação 10:

$$AD = \int_{-\infty}^{\mu} (\mu - X) \cdot FDP(X) \cdot dX \quad (9)$$

$$AD = \int_0^{\mu} (\mu - X) \cdot FDP(X) \cdot dX + \int_{\mu}^{\infty} (X - \mu) \cdot FDP(X) \cdot dX \quad (10)$$

Conforme proposto por Warrick (1983), a primeira parte da integral descrita na equação 10 pode ser igualada a 0 e então substituída na equação 9, resultando em:

$$\int_{-\infty}^{\mu} (\mu - X) \cdot FDP(X) \cdot dX = \int_{\mu}^{\infty} (X - \mu) \cdot FDP(X) \cdot dX \quad (11)$$

Ainda seguindo o proposto por Warrick (1983), a equação 11, que determina o desvio médio (AD), pode ser relacionada a uma distribuição de probabilidades (FDP), resultando na equação 12.

$$AD = 2 \cdot \int_{\mu}^{\infty} (X - \mu) \cdot FDP(X) \cdot dX \quad (12)$$

Conforme relatado por Kissel & Poserina (2017), a distribuição logística de probabilidade é uma distribuição contínua de probabilidades, simétrica (com assimetria igual à 0) e que apresenta caudas alongadas, quando comparada com a distribuição normal, essas características tem atraído o uso dessa distribuição em diferentes áreas do conhecimento, como física, esportes e mais recentemente na irrigação, onde Nörenberg (2015) verificou que a FDP logística apresentou um melhor ajuste às lâminas de irrigação quando comparado com a FDP normal em um sistema de irrigação mecanizado tipo lateral móvel.

De acordo com o definido por Balakrishnan (1991), a função na forma distribuída da FDP logística pode ser definida conforme a Equação 13, já a sua forma cumulativa (CDF_{LOG}), é apresentada conforme descrito na equação 14.

$$FDP_{LOG}(X) = \frac{e^{(-z)}}{k \cdot (1 + e^{(-z)})^2} \quad (13)$$

$$FCP_{LOG}(X) = \frac{1}{1 + e^{(-z)}} \quad (14)$$

O parâmetro de escala da FDP logística (k) é determinado em função do desvio padrão (σ) conforme equação 15, descrita por Balakrishnan (1991). Já o parâmetro “z” é uma simplificação de escrita, conforme descrito na equação 16.

$$k = \frac{\sigma \cdot \sqrt{3}}{\pi} \quad (15)$$

$$z = \frac{X - \mu}{k} \quad (16)$$

Então, para determinar o desvio médio da lâmina de água coletada (AD) em função da FDP logística (FDP_{LOG}), foi substituída a equação 13 na equação 12, resultando assim na equação 17.

$$AD = 2 \cdot \int_{\mu}^{\infty} (X - \mu) \frac{e^{(-z)}}{k \cdot (1 + e^{(-z)})^2} \cdot dX \quad (17)$$

A solução simbólica da equação 17 é apresentada na equação 17.1. Para realizar uma análise numérica, a equação foi decomposta no conjunto de equações 17.2, 17.3, 17.4, 17.5 e 17.6. Devido à impossibilidade de uma solução analítica da equação 17 com limite superior a integral igual ao infinito (∞), foi adotado um valor elevado que simule um número tendendo ao infinito para representar ($\infty = 10$).

$$AD = 2 \cdot k \cdot \ln(2) - 2 \cdot k \cdot \ln\left(e^{-\frac{\mu}{k}} \cdot e^{\frac{10}{k}} + 1\right) - 2 \cdot \mu + \frac{2 \cdot \mu - 20}{e^{\frac{10}{k}} \cdot e^{-\frac{\mu}{k}} + 1} + 20 \quad (17.1)$$

Para a solução numérica do conjunto de equações 17.2, 17.3, 17.4, 17.5 e 17.6, foi definido valores para média e desvio padrão igual a $\mu = 1$ e $k = 0.055$.

$$A = 2 \cdot k \cdot \ln(2) \quad (17.2)$$

$$B = -2 \cdot k \cdot \ln\left(e^{-\frac{\mu}{k}} \cdot e^{\frac{10}{k}} + 1\right) \quad (17.3)$$

$$C = -2 \cdot \mu \quad (17.4)$$

$$D = \frac{2 \cdot \mu - 20}{e^{\frac{10}{k}} \cdot e^{-\frac{\mu}{k}} + 1} \quad (17.5)$$

$$E = 20 \quad (17.6)$$

Analisando o conjunto de equações 17.2, 17.3, 17.4, 17.5 e 17.6, verifica-se que a soma das equações 17.3, 17.4, 17.5 e 17.6 é sempre igual a zero, resultando somente o termo contido na equação 17.2, resultando assim na equação 18.

$$AD = 2 \cdot k \cdot \ln(2) \quad (18)$$

Para obter-se o coeficiente de uniformidade baseado na FDP logística, foi substituída a equação 18 na equação 8, resultando assim na equação 19:

$$CU_{\text{LOG}} = \left(1 - \frac{2 \cdot k \cdot \ln(2)}{\mu} \right) \cdot 100 \quad (19)$$

Para deixar a equação que representa o CU_{LOG} em função do desvio padrão, foi substituída a equação 15 na equação 19:

$$CU_{\text{LOG}} = \left(1 - \frac{2 \cdot \sigma \cdot \sqrt{3} \cdot \ln(2)}{\mu \cdot \pi} \right) \cdot 100 \quad (20)$$

E, por fim, com o objetivo de escrever o CU_{LOG} em função do coeficiente de variação (CV), obtém-se a equação 21.

$$CU_{\text{LOG}} = (1 - 0.764 \cdot CV) \cdot 100 \quad (21)$$

Onde: CU_{LOG} – Coeficiente de uniformidade baseado na FDP logística, %;

CV – Coeficiente de variação, adimensional.

3.3.2 Coeficiente de uniformidade de distribuição baseado na FDP logística (DU_{LOG})

Para determinar o coeficiente de uniformidade de distribuição (DU), é necessário, em primeiro lugar, calcular a lâmina média do quartil inferior (LQA) e, conforme definido por Warrick (1983), a LQA pode ser encontrada por meio da

equação 22, integrando de negativo infinito até a lâmina equivalente ao quartil inferior das lâminas coletadas ($X_{25\%}$).

$$LQA = 4 \cdot \int_{-\infty}^{X_{25\%}} X \cdot FDP(X) \cdot dX \quad (22)$$

Para determinar a LQA com base na FDP logística foi substituída a equação 13 (FDP_{LOG}) na equação 22, resultando assim na equação 23.

$$LQA = 4 \cdot \int_{-\infty}^{X_{25\%}} X \cdot \frac{e^{(-z)}}{k \cdot (1 + e^{(-z)})^2} \cdot dX \quad (23)$$

A solução analítica da equação 23 é mostrada na equação 24. Devido à impossibilidade de uma solução analítica para a equação 23 quando a integral possui limite inferior igual ao infinito ($-\infty$), foi-se adotado um valor que represente esse limite ($\infty = -10$).

$$LQA = \frac{4 \cdot X_{25\%}}{e^{\frac{\mu}{k}} \cdot e^{\frac{10}{k}} + 1} - 4 \cdot X_{25\%} + 4 \cdot k \cdot \ln \left(e^{\frac{\mu}{k}} \cdot e^{\frac{10}{k}} \right) - \dots \quad (24)$$

$$4 \cdot k \cdot \ln \left(e^{\frac{\mu}{k}} \cdot e^{\frac{X_{25\%}}{k}} \right) + \frac{40}{e^{\frac{\mu}{k}} \cdot e^{\frac{X_{25\%}}{k}} + 1} - 40$$

Com as propriedades da FDP_{LOG} foi determinado que a equação 25 representa a lâmina equivalente ao quartil inferior, ou seja, a lâmina equivalente aos 25% menores valores ($X_{25\%}$):

$$X_{25\%} = \mu - 1.0986 \cdot k \quad (25)$$

E, substituindo a equação 25 na equação 24, resulta-se a equação 26.

$$LQA = 4 \cdot k \cdot \ln \left(e^{\frac{\mu}{k}} \cdot e^{\frac{10}{k}} \right) - 4 \cdot \mu + 1 \cdot \mu + \frac{40}{e^{\frac{\mu}{k}} \cdot e^{\frac{10}{k}} + 1} - 2.249 \cdot k - 40 \quad (26)$$

Decompondo a equação 26, para análises numéricas, obtém-se o conjunto de equações 26.1, 26.2, 26.3, 26.4, 26.5 e 26.6. Como valores padrão para realizar a análise numérica foi definido os coeficientes $\mu = 1$, $\sigma = 0.10$ e $k = 0.055$.

$$A = 4 \cdot k \cdot \ln \left(e^{\frac{\mu}{k}} \cdot e^{\frac{10}{k}} \right) \quad (26.1)$$

$$B = -4 \cdot \mu \quad (26.2)$$

$$C = 1 \cdot \mu \quad (26.3)$$

$$D = \frac{40}{e^{\frac{\mu}{k}} \cdot e^{\frac{10}{k}} + 1} \quad (26.4)$$

$$E = -2.249 \cdot k \quad (26.5)$$

$$F = -40 \quad (26.6)$$

Após a análise numérica do conjunto de equações 26.1, 26.2, 26.3, 26.4, 26.5 e 26.6, verifica-se que a soma dos das equações 26.1, 26.2, 26.4 e 26.6 é sempre igual a 0, ou seja, eles se cancelam entre si, restando as equações explícitas nas equações 26.3 e 26.5, assim obtendo-se a LQA em função da FDP logística, conforme descrito na equação 27.

$$LQA = 1 \cdot \mu - 2.249 \cdot k \quad (27)$$

Para obter-se o coeficiente de uniformidade de distribuição baseado na FDP logística (DU_{LOG}), substituiu-se a equação 27 na equação 3 (DU), e assim, obtendo-se a equação 28.

$$DU_{LOG} = \left(\frac{\mu - 2.249 \cdot k}{\mu} \right) \cdot 100 \quad (28)$$

Para expressar o DU_{LOG} em função do coeficiente de variação (CV), conforme recomendado por Hart (1961), o parâmetro de escala da FDP logística foi primeiramente substituído pelo desvio padrão, resultando na equação 29.

$$DU_{LOG} = \left(1 - \frac{1.240 \cdot \sigma}{\mu} \right) \cdot 100 \quad (29)$$

E, por fim, substituindo-se o desvio padrão pelo coeficiente de variação, é possível simplificar a equação 29, resultando na equação 30.

$$DU_{LOG} = (1 - 1.240 \cdot CV) \cdot 100 \quad (30)$$

Onde:

DU_{LOG} – Coeficiente de uniformidade de distribuição baseado na distribuição logística de probabilidades, %;

CV – Coeficiente de variação, adimensional.

3.4 Comparação entre os coeficientes de uniformidade baseados nas FDPs normal, uniforme e logística com o CUC e DU

Os coeficientes de uniformidade CU_H , PE_H , CU_U , DU_U , CU_{LOG} e o DU_{LOG} foram comparados com o CUC e com DU observados nos ensaios de avaliação de uniformidade de distribuição de água dos equipamentos testados no presente estudo (aspersão convencional, lateral móvel e gotejamento).

Para realizar a comparação entre os diferentes coeficientes de uniformidade foi adotada a raiz quadrática do quadrado do erro médio (RMSE) (Equação 31). Também foi usado o índice de confiança e desempenho (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997), o qual relaciona o coeficiente de correlação (r) e o índice de Willmott para a acurácia (d).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (31)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (32)$$

$$c = r \cdot d \quad (33)$$

Onde:

O_i – Valor do coeficiente de uniformidade (CUC ou DU) calculado nos ensaios de uniformidade de número “n”;

\bar{O} - Valor médio do coeficiente de uniformidade (CUC ou DU) calculado nos ensaios;

P_i – valor do coeficiente de uniformidade (CU_H , CU_U e CU_{LOG} ou PE_H , DU_U e DU_{LOG}) calculado com os dados observados no ensaio de número “n”;

N – Número de ensaios para cada equipamento de irrigação.

3.5 Indicadores de qualidade da irrigação baseados na FDP logística

Conforme a metodologia proposta por Anyoji e Wu (1994), que definiu as áreas A, B, C e D, mostradas na Figura 7, pode ser observado que a soma das áreas A, B e C é equivalente ao total de água aplicado na área, já a área D é a quantidade de água em déficit para a cultura. Além disso, a área B representa o volume de água em excesso, e, assim, perdida por percolação.

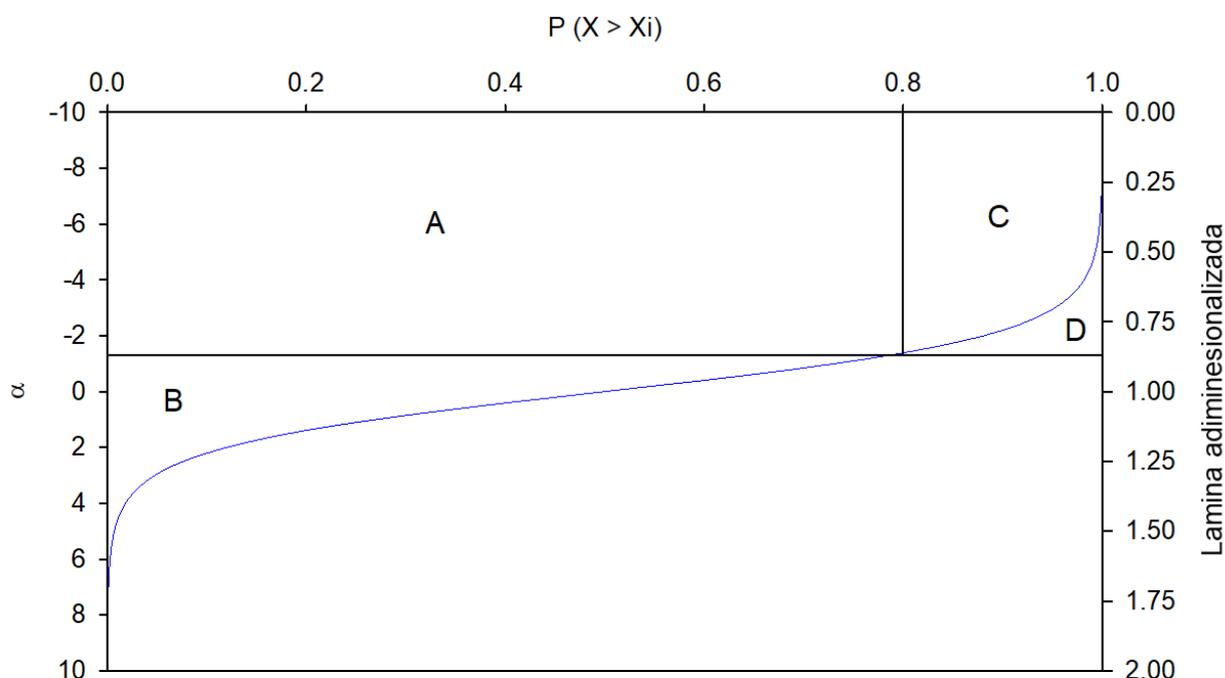


Figura 7 – Função cumulativa de probabilidade (CDF) da FDP logística, considerando uma área adequadamente irrigada (AAI) de 80%.

Ainda de acordo com a metodologia proposta por Anyoji e Wu (1994), as áreas A e B (Figura 7) podem ser definidas pela equação 34, reescrita com base na FDP logística conforme equação 35.

$$A + B = \int_{\mu+\alpha k}^{\infty} x \cdot FDP_{LOG} \cdot dx \quad (34)$$

$$A + B = 1 - \left(\mu - x - k \cdot \ln(e^{-z} + 1) + \frac{x}{e^{-z} + 1} \right) \quad (35)$$

Para calcular a área A isoladamente, a equação 36 foi adotada, de acordo com o sugerido por Anyoji e Wu (1994). Substituindo a equação 36 na equação 35, é possível obter de forma isolada a equação para determinar a área B (equação 37).

$$A = x \cdot \text{FDP}_{\text{LOG}} \quad (36)$$

$$B = k \cdot \ln(e^{-z} + 1) - \mu + 1 \quad (37)$$

Também pode-se definir que a soma das áreas A, B e C é igual à média da lâmina coletada (μ). Assim, se isolando a área C, se obtém a equação 38 e, substituindo as equações 36 e 37 na equação 38, resulta na equação 39.

$$C = \mu - A - B \quad (38)$$

$$C = 2 \cdot \mu - x - k \cdot \ln(e^{-z} + 1) + \frac{x}{e^{-z} + 1} - 1 \quad (39)$$

De acordo com Anyoji e Wu (1994), a soma das áreas C e D pode ser definida conforme a equação 40.

$$C+D = (1 - \text{FCP}_{\text{Logística}}) \cdot (x) \quad (40)$$

Substituindo a equação 39 na equação 40, obtém-se a equação 41, a qual determina a área D de forma isolada.

$$D = x - 2 \cdot \mu + k \cdot \ln(e^{-z} + 1) + 1 \quad (41)$$

Ainda, conforme as áreas apresentadas na Figura 7, Anyoji e Wu (1994) propuseram um conjunto de equações para determinar o fator de disponibilidade (F), o déficit médio (Da), Eficiência de distribuição (E) e o coeficiente de distribuição (H) que indica a qualidade de irrigação e foi proposto originalmente por Hart e Reynolds (1965).

Para determinar os indicadores que indicam a qualidade da irrigação (F, Da e E)

Anyoji e Wu (1994) propuseram as equações 42, 43 e 44, respectivamente, bem como o indicador H que é obtido igualando a função inversa da função cumulativa da FDP logística à probabilidade de não excedência da área adequadamente irrigada (AAI), conforme observado na equação 45.

$$F = \frac{A+C}{H} \quad (42)$$

$$E = \frac{A+C}{A+B+C} \quad (43)$$

$$D_a = \frac{D}{1 - AAI} \quad (44)$$

$$AAI = 1 - \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{H-\mu}{k}\right)}} \quad (45)$$

Onde:

A + C = água efetivamente disponível para a cultura

B = água perdida por percolação

D = Déficit de água

AAI = Área adequadamente irrigada

μ = Lâmina média

k = Parâmetro de escala da FDP logística.

As equações para determinar as áreas A, B, C e D foram substituídas nas equações 42, 43 e 44, e assim resultando nas equações 46, 47 e 48, que determinam os indicadores de qualidade da irrigação, com base na FDP logística.

$$F = \frac{-\left(k \cdot \ln(e^{-z} + 1) - 2 \cdot \mu + 1\right)}{x} \quad (46)$$

$$E = \frac{-\left(k \cdot \ln(e^{-z} + 1) - 2 \cdot \mu + 1\right)}{\mu} \quad (47)$$

$$D_a = (e^{-z} + 1) \cdot (x - 2 \cdot \mu + k \cdot \ln(e^{-z} + 1) + 1) \quad (48)$$

Onde:

F = Fator de disponibilidade

E = Eficiência de distribuição

Da = Déficit médio

5 Resultados

5.1 Aplicabilidade do CU_{LOG} e DU_{LOG} para sistemas de irrigação por aspersão usando aspersores de impacto de pressão intermediária

As equações propostas para determinar os coeficientes de uniformidade baseados na FDP logística (CU_{LOG} e DU_{LOG}), Equações 21 e 30, apresentaram uma maior simplicidade de cálculo quando comparadas com a FDP normal, a qual foi adotada por Hart (1961).

Na Figura 8 está apresentada a relação entre os coeficientes de uniformidade CUC (Equação 1), CU_H (Equação 4), CU_U (Equação 6) e CU_{LOG} (Equação 21) e o coeficiente de variação da lâmina de água coletada (CV), bem como os coeficientes DU (Equação 3), PE_H (Equação 5), DU_U (Equação 7) e DU_{LOG} (Equação 30) com o CV em 90 sobreposições dos volumes de água coletados dos aspersores de impacto de pressão intermediária nos ensaios de campo realizados por Beskow et al. (2011).

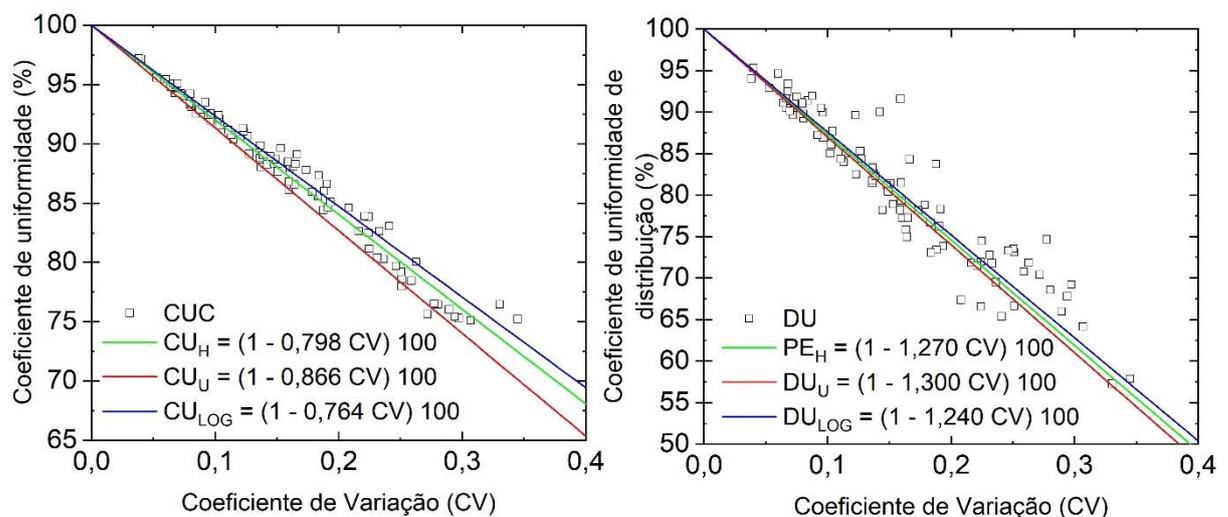


Figura 8 – Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (DU) e os coeficientes de uniformidade com bases nas FDPs normal, uniforme e logística em função do coeficiente de variação (CV) para os ensaios de irrigação por aspersão convencional.

Pode-se verificar na Figura 8 que o coeficiente de uniformidade baseado na FDP uniforme apresentou tendência em subestimar o valor de CUC e DU observados em campo, diferentemente dos coeficientes de uniformidade baseados nas FDPs normal e logística, os quais representaram melhor o comportamento do CUC e DU observados em campo, corroborando assim com o observado por Karmeli (1978) que indicou o uso da FDP uniforme para sistemas com baixas uniformidades de distribuição de água.

Na Figura 9 são apresentados valores calculados do índice de Willmott para a acurácia (d , Equação 32), do coeficiente de confiança e desempenho (c , Equação 33), do coeficiente de correlação (r) e da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE, Equação 31) usando os valores obtidos dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (DU) nos ensaios de campo de irrigação por aspersão convencional e os coeficientes de uniformidade com bases nas distribuições normal (CU_H e PE_H), uniforme (CU_U e DU_U) e logística (CU_{LOG} e DU_{LOG}) de probabilidades, calculados em função do coeficiente de variação (CV) da lâmina de irrigação nos ensaios.

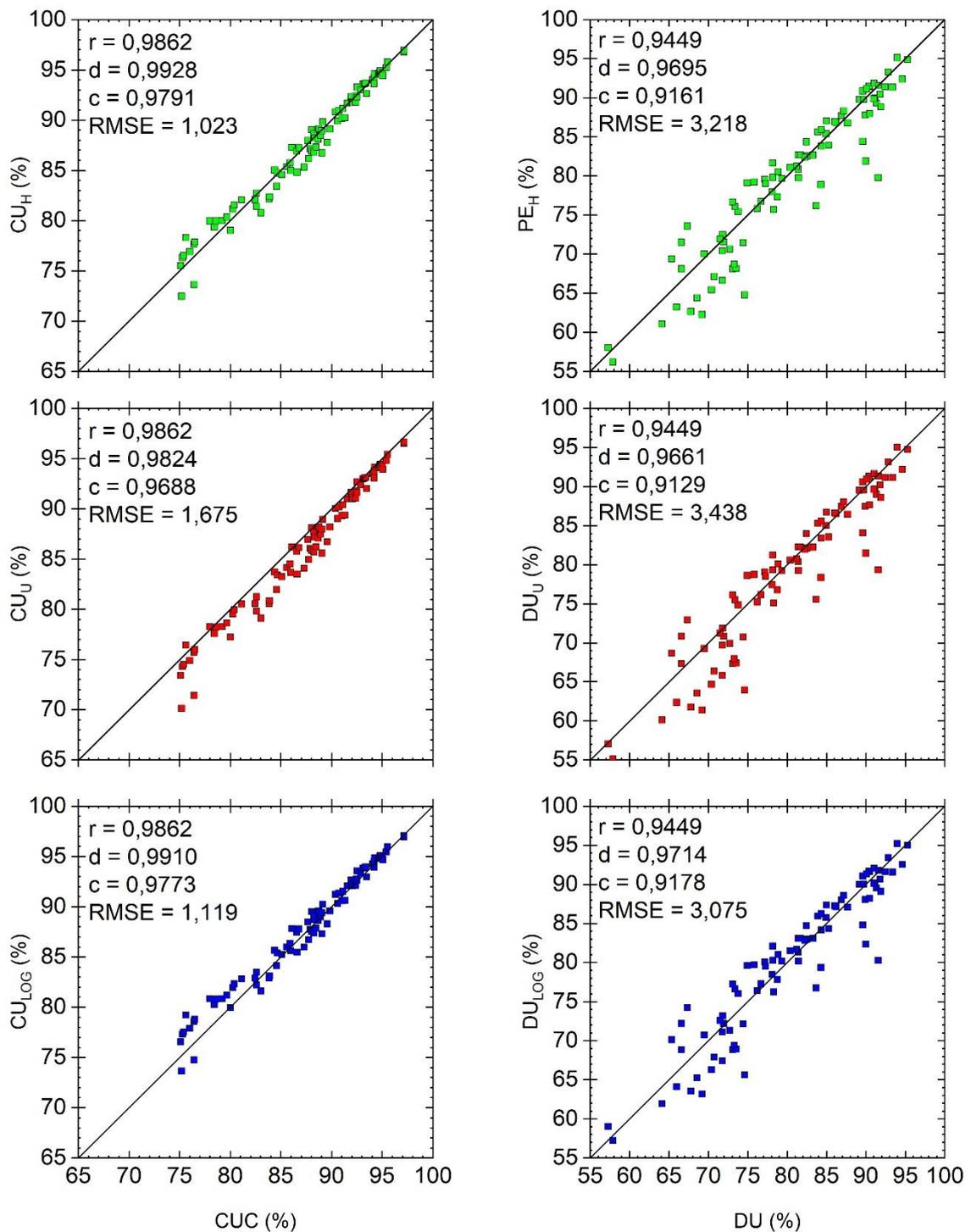


Figura 9 – Comparativo entre os coeficientes de uniformidade com base nas FDPs normal, uniforme e logística com o CUC e DU para os ensaios de irrigação por aspersão convencional.

Observa-se na Figura 9, que os coeficientes de uniformidade baseados na FDP normal (CU_H e PE_H) apresentaram índice de confiança e desempenho (c) igual a 0,9791 para o CU_H e 0,9161 para o PE_H e, quando avaliando a raiz quadrática do erro médio ao quadrado (RMSE), obteve-se respectivamente, 1,023 e 3,218. O pior ajuste

para o coeficiente PE_H , pode ser atribuído, de acordo com Beale e Howell (1966) e, nessas condições a porção caudal da distribuição das lâminas é mais afetada.

Além disso, pode-se observar que os coeficientes com base na FDP logística (CU_{LOG} e DU_{LOG}) apresentaram desempenho similar ao CU_H e ao PE_H , com c igual a 0,9773 para o CU_{LOG} e c igual a 0,9178 para o DU_{LOG} , fato também observado quando analisado o RMSE que foi igual a 1,119 para o CU_{LOG} e 3,075 para o DU_{LOG} . Já os coeficientes baseados na FDP uniforme (CU_U e DU_U) apresentaram desempenho inferior aos demais com c igual a 0,9688 para o CU_U e 0,9129 para o DU_U , porém com o RMSE mais elevado que os demais coeficientes com 1,675 e 3,438 para o CU_U e DU_U , respectivamente.

Na Figura 10 são apresentados os erros relativos entre os coeficientes de uniformidade com base em FDPs, CU_H , CU_U e CU_{LOG} e o CUC, bem como os erros relativos entre o PE_H , DU_U e DU_{LOG} e o DU. Pode-se verificar na Figura 10 que o erro relativo, para todos os coeficientes tende a ser menor quanto mais uniforme é a irrigação, ou seja, quanto mais elevados os coeficientes, menores são os erros relativos, estando essa observação de acordo com o observado com Beale e Howell (1966), que afirmaram que os dados apresentam um melhor desempenho para coeficientes de uniformidade acima de 75%, e quanto mais elevado for o coeficiente menor o erro. Além disso, pode-se verificar a concentração dos pontos próximo ao erro relativo igual a 0, estando os coeficientes com base na FDP normal (levemente subestimando os valores de CUC e DU). Já os coeficientes com base na FDP uniforme subestimaram de maneira mais notada, principalmente o CUC. Para os coeficientes com base na FDP logística, verificou-se levemente uma superestimação dos valores de CUC, especialmente devido aos ensaios com baixa uniformidade de distribuição de água ($CUC < 82\%$), e para o DU as médias foram muito próximas, resultando em um erro relativo médio próximo de 0.

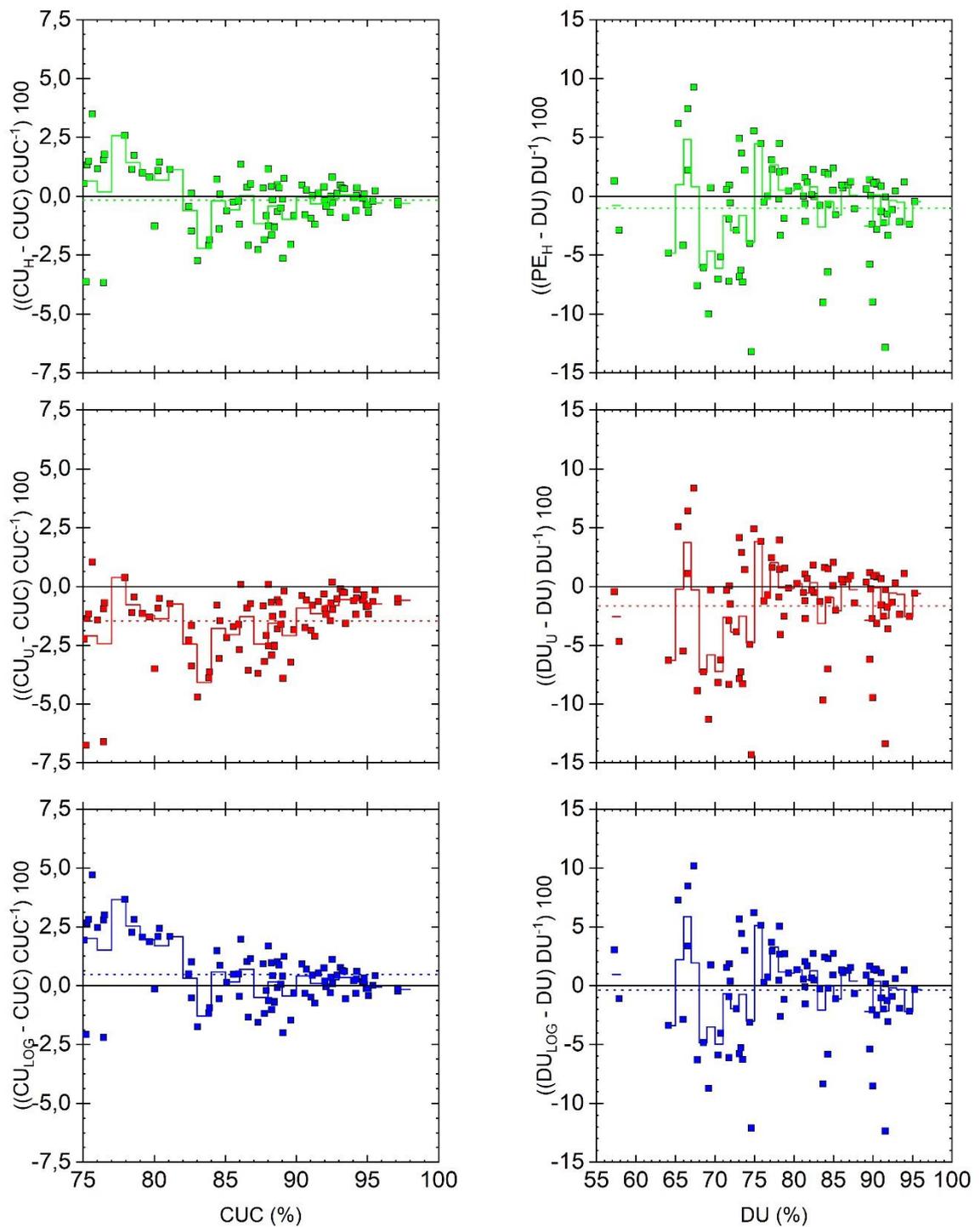


Figura 10 – Erro relativo entre os coeficientes de uniformidade com base nas FDPs normal, uniforme e logística e os valores de CUC e DU para os ensaios de irrigação por aspersão convencional.

5.2 Aplicabilidade do CU_{LOG} e DU_{LOG} para sistemas de irrigação por aspersão mecanizada do tipo lateral móvel

As equações propostas para determinar os coeficientes de uniformidade baseados na FDP logística (CU_{LOG} e DU_{LOG}), Equações 21 e 30, apresentaram uma

maior facilidade de cálculo quando comparadas com a FDP normal, a qual foi adotada por Hart (1961).

A qualidade do ajuste dos coeficientes de uniformidade (CU_{LOG} e DU_{LOG}) ao coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) pode ser observado na Figura 11. No lado esquerdo da Figura 11 são apresentados os coeficientes CUC, CU_H , CU_U , CU_{LOG} em função do coeficiente de variação da lâmina de água coletada (CV), já no lado direito da Figura 11 são apresentadas as relações entre os coeficientes DU, PE_H , DU_U e DU_{LOG} com o CV das lâminas de água coletadas em 29 ensaios de campo do equipamento mecanizado de irrigação do tipo lateral móvel.

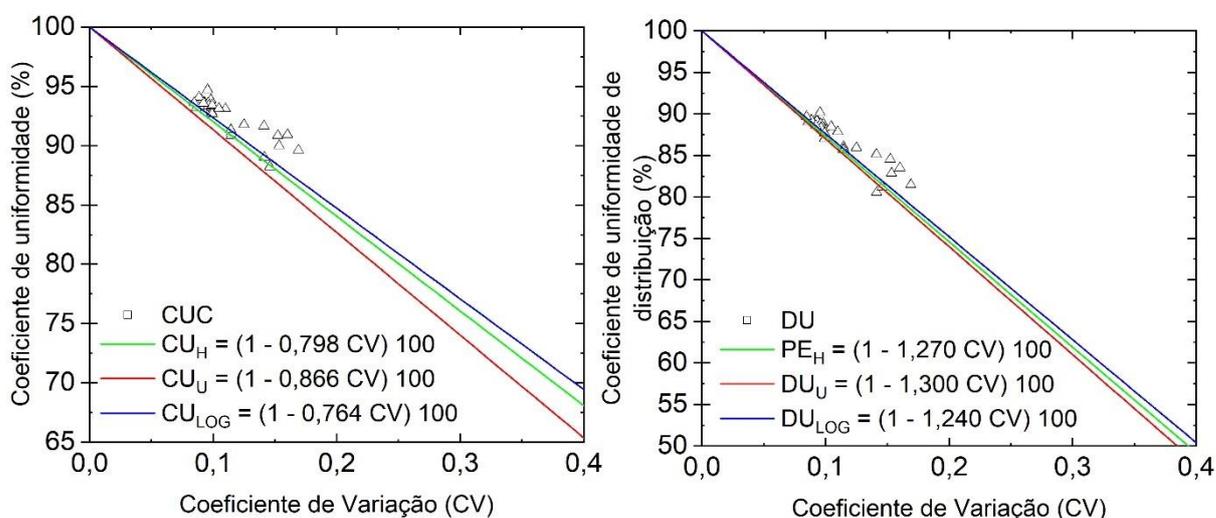


Figura 11 – Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (DU) e os coeficientes de uniformidade com bases nas FDPs normal, uniforme e logística em função do coeficiente de variação (CV) para os ensaios de irrigação por aspersão mecanizada do tipo lateral móvel.

Na Figura 11 pode ser observado que, todos os coeficientes de uniformidade apresentaram relação negativa com os valores do CV, ou seja, quanto maior o valor de CV menor os coeficientes de uniformidade. Esses resultados estão de acordo com o observado por Heermann et al. (1992) avaliando 60 sistemas pivôs centrais e por Dukes (2006) avaliando 1 sistema lateral móvel. Os autores observaram que o valor do CUC tende a ser maior que o de DU e que os dois coeficientes possuem relação inversa com o CV calculado usando os valores da lâmina de irrigação aplicada, o CUC cerca de $1 - 0,8CV$ e o DU $1 - 1,3CV$, apresentando assim, relações bastante próximas às demais observadas na literatura.

Warrick (1983), analisando o desempenho de diferentes FDPs (normal, log-normal, uniforme, potência especializada, beta e gama), indicaram que o coeficiente de

uniformidade baseado na FDP normal (CU_H) foi, dentre os testados, o que melhor se ajustou aos valores de CUC.

Já na Figura 12 estão mostrados os comparativos entre os coeficientes de uniformidade baseados em FDPs (CU_H , CU_U e CU_{LOG}) com o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), e, também os coeficientes de uniformidade de distribuição (PE_H , DU_U e DU_{LOG}) com o DU.

Verifica-se na Figura 12 que o coeficiente de uniformidade (CU_{LOG}), baseado na FDP logística é o que mais se aproxima dos resultados observados de CU observados em campo, superando inclusive o desempenho do CU_H . Esse resultado é reforçado quando analisada a raiz quadrática do erro médio ao quadrado (RMSE) obtidas na comparação entre os valores observados de CUC e os coeficientes CU_H (1,61%), CU_U (2,31%) e CU_{LOG} (1,30%). Além disso, na Figura 12 pode ser verificado que o DU_{LOG} foi o coeficiente que mais se aproximou dos valores observados de DU em campo para o equipamento de irrigação do tipo lateral móvel, sendo esse resultado confirmado quando se observa o menor valor de RMSE ($DU_{LOG} = 1,41\%$) quando comparado aos coeficientes $PE_H = 1,642\%$ e $DU_U = 1,906\%$ e os maiores valores do índice de Willmott para a acurácia (d) e do coeficiente de confiança e desempenho (c).

Esses resultados corroboram os observados por Dukes (2006), que verificou que a FDP logística apresenta uma boa capacidade em descrever a lâmina de água aplicada por um sistema de irrigação lateral móvel ao longo da área irrigada. Dukes (2006) também obteve um bom desempenho da FDP normal e um pior desempenho da FDP uniforme em descrever a lâmina de água aplicada por um lateral móvel. Fato esse podendo ser explicado com as observações de Karmeli (1978) e Elliot et al. (1981), os quais afirmam que a melhor aplicabilidade da FDP uniforme se dá para situações e sistemas com menor uniformidade de aplicação de água.

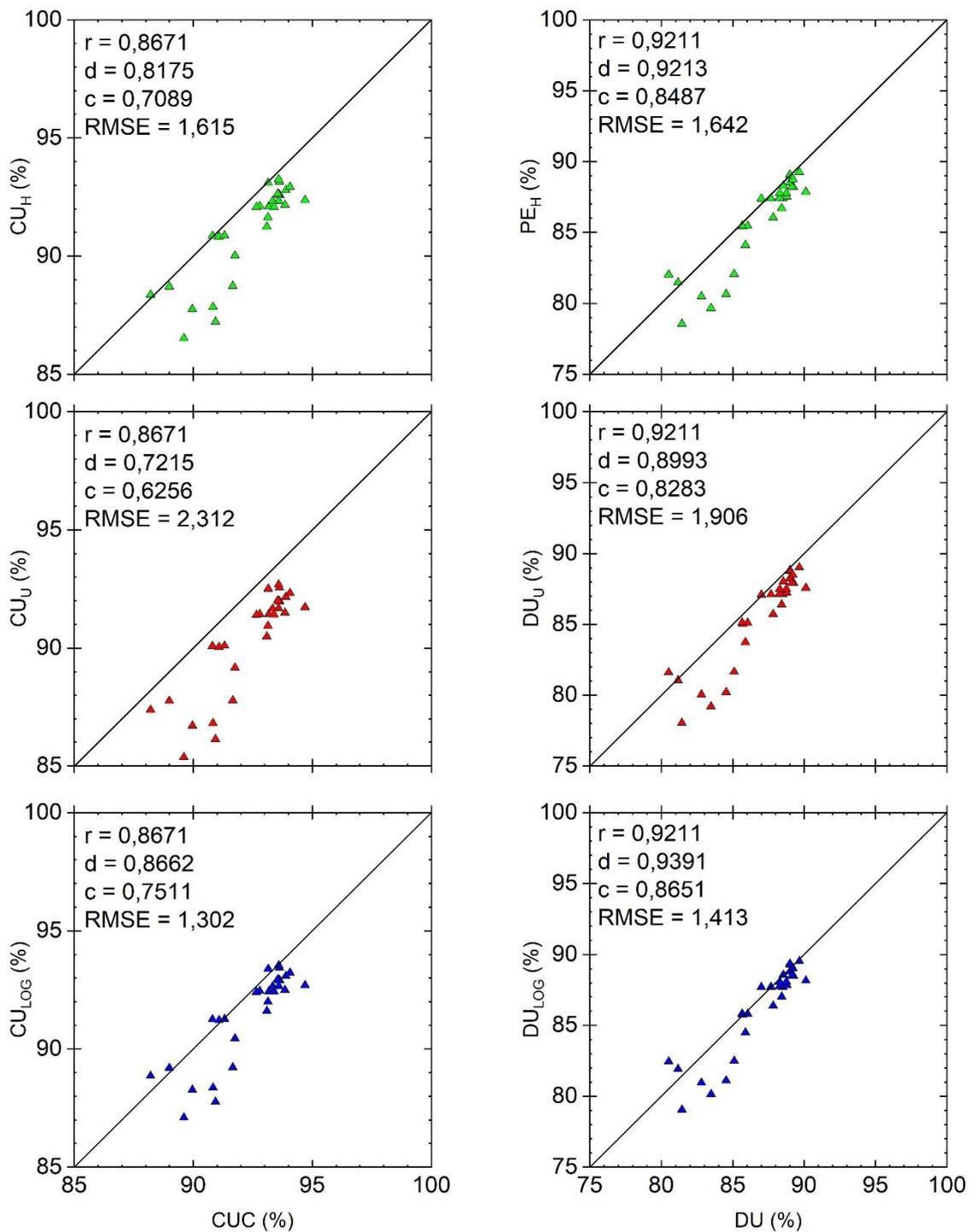


Figura 12 – Comparativo entre os coeficientes de uniformidade com bases nas FDPs normal, uniforme e logística com o CUC e DU para os ensaios de irrigação por aspersão mecanizada do tipo lateral móvel.

Os erros relativos entre os coeficientes de uniformidade avaliados nesse trabalho estão mostrados na Figura 13, sendo do lado esquerdo da figura os coeficientes relacionados ao CUC e do lado direito os coeficientes relacionados ao DU.

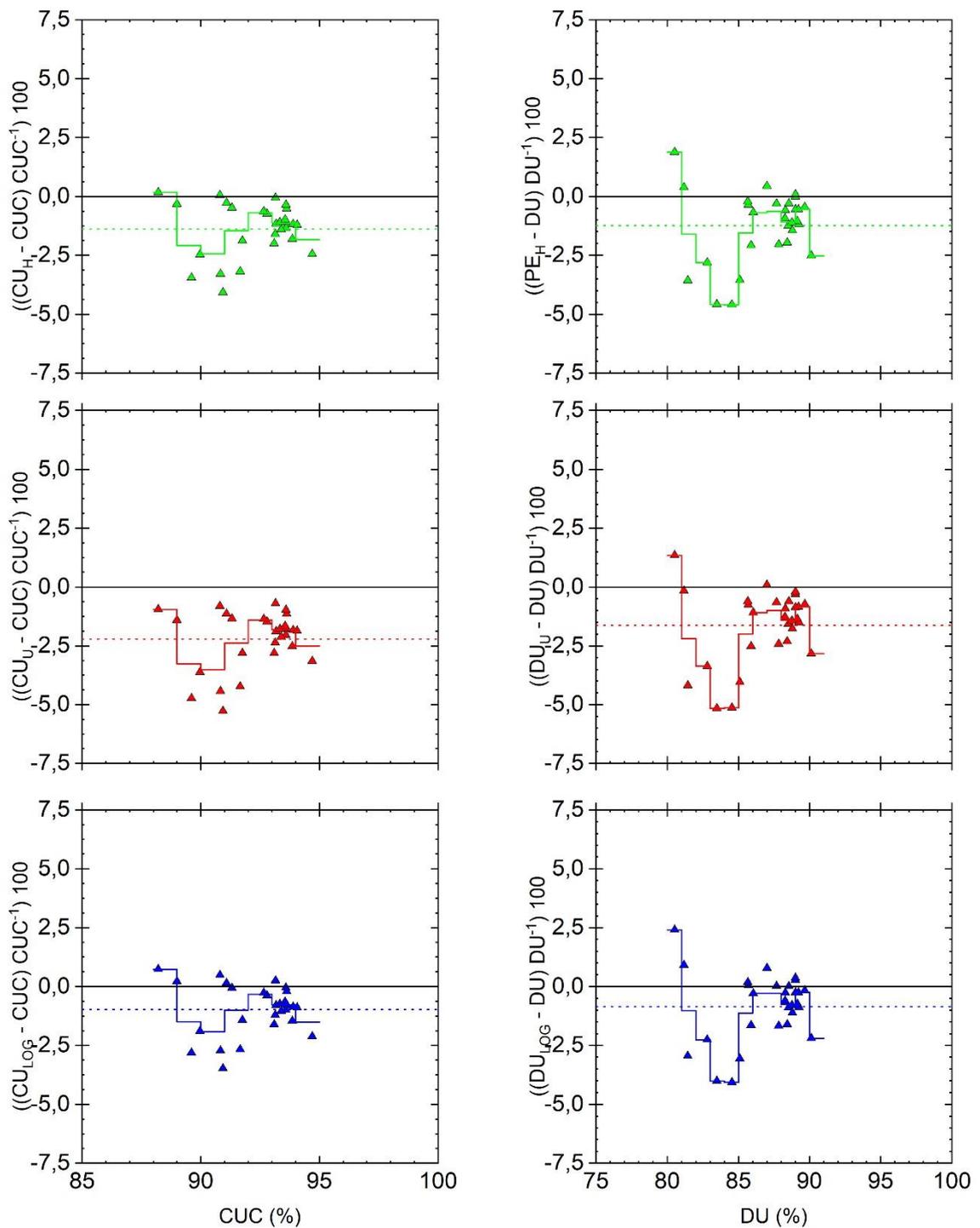


Figura. 13 – Erro relativo entre os coeficientes de uniformidade com bases nas FDPs normal, uniforme e logística e o CUC e o DU para os ensaios de irrigação por aspersão mecanizada do tipo lateral móvel.

Na Figura 13, observa-se que os coeficientes tendem subestimar os valores de CUC e DU, porém os coeficientes que obtiveram o melhor desempenho foram os com base na FDP logística, o CU_{LOG} e o DU_{LOG} , os quais se aproximaram mais do erro relativo médio igual a 0. Os coeficientes com base na FDP normal (CU_{H} e PE_{H})

apresentaram erro relativo médio superior ao CU_{LOG} e DU_{LOG} . Os coeficientes com base na FDP uniforme foram os que apresentaram os maiores erros relativos médios, resultado esse estando de acordo com o observado na literatura, que indica esses coeficientes para sistemas com baixa uniformidade de aplicação de água, como relatado por Karmeli et al. (1978) e por Elliot et al. (1981).

5.3 Aplicabilidade do CU_{LOG} e DU_{LOG} para sistemas de irrigação localizada por gotejamento

Na Figura 14 estão mostradas as relações entre os coeficientes de uniformidade CUC , CU_H , CU_U e CU_{LOG} e o coeficiente de variação da lâmina de água coletada (CV), assim como os coeficientes DU , PE_H , DU_U e DU_{LOG} com o CV para os em 26 ensaios para o tubo gotejador modelo RainBird modelo XF-SDI, operando com pressões de entrada variando entre 5 e 45 mca.

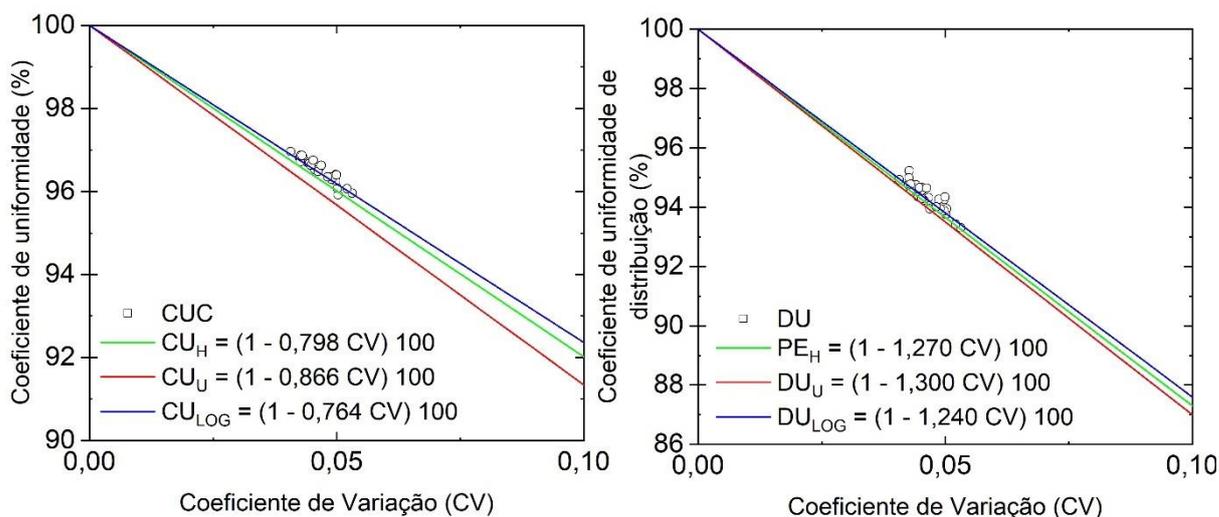


Figura 14 – Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (DU) e os coeficientes de uniformidade com bases nas FDPs normal, uniforme e logística em função do coeficiente de variação (CV) para os ensaios de irrigação por gotejamento.

Verifica-se na Figura 14 que os coeficientes de uniformidade avaliados apresentaram uma relação negativa com o coeficiente de variação da lâmina coletada nos 26 ensaios de gotejamento, da mesma forma que para os sistemas de irrigação por aspersão convencional e lateral móvel, analisados anteriormente.

Entretanto, quando analisamos a qualidade do ajuste dos coeficientes com base nas FDPs normal (CU_H e PE_H), uniforme (CU_U e DU_U) e logística (CU_{LOG} e DU_{LOG}) com os coeficientes originalmente propostos por Christiansen (1942) (CUC) e por Criddle et al. (1956) (DU), que estão apresentadas na Figura 15, observa-se que o

Coeficiente de Uniformidade baseado na FDP logística (CU_{LOG}) foi o que apresentou maior índice de confiança e desempenho ($c = 0,8929$), bem como o menor RMSE 0,12, indicando assim o seu ótimo ajuste aos dados observados nos ensaios de aspersores da mesma forma que o DU_{LOG} melhor se ajustou ao DU observado com c igual a 0,8244 e RMSE de 0,236 .

Já o Coeficiente de Uniformidade baseado na FDP uniforme (CU_U) e o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (DU_U) foram os que apresentaram piores desempenhos, com valor de c igual a 0,5470 e RMSE de 0,552 para o CU_U e para o DU_U o valor de c foi igual a 0,7066 e o RMSE igual a 0,4443, resultados esses esperados devido aos altos valores de uniformidade observados nos ensaios dos gotejadores e a baixa aptidão desse coeficiente em se ajustar a essas condições.

O coeficiente de uniformidade da Hawaiian Sugar Planters Association (CU_H) apresentou uma boa capacidade em se ajustar aos valores de CUC observados nos ensaios, apresentando c igual à 0,7799 e RMSE de 0,247, e o PEH com c igual a 0,7752 e RMSE 0,526 com relação aos valores de DU. Pode ser observado também, na Figura 15, que o CU_H apresentou uma tendência em subestimar os valores de CUC observados, fato esse pode ser verificado com maior clareza na Figura 18, a qual apresenta o erro relativo entre os valores dos coeficientes baseados nas FDPs e os dados de CUC e DU observados nos 26 ensaios do gotejador RainBird modelo XF-SDI.

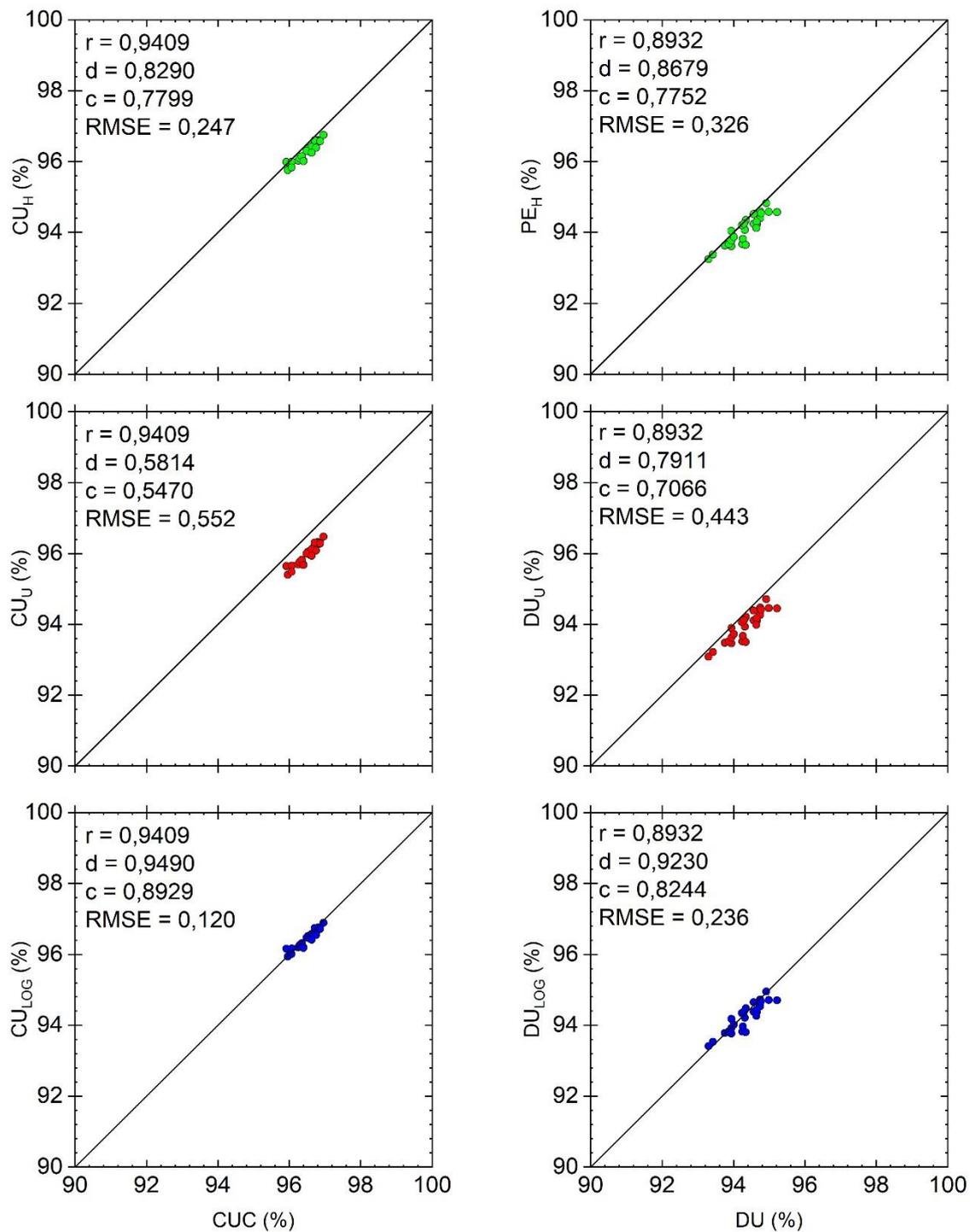


Figura 15 – Comparativo entre os coeficientes de uniformidade com base nas FDPs normal, uniforme e logística com o CUC e DU para os ensaios de irrigação por gotejamento.

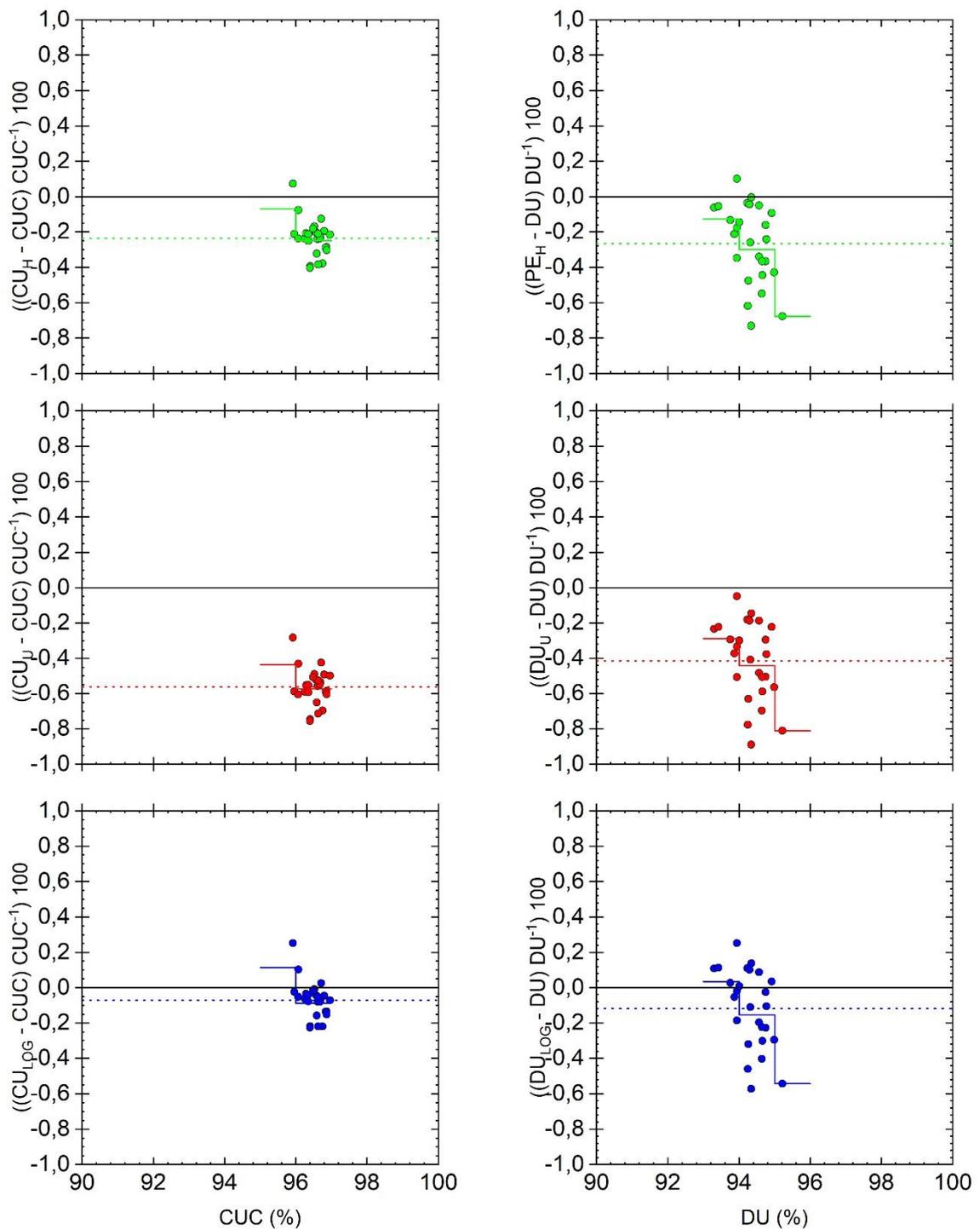


Figura. 16 – Erro relativo entre os coeficientes de uniformidade com base nas FDPs normal, uniforme e logística e o CUC e o DU para os ensaios de irrigação por gotejamento.

Na Figura 16, pode-se observar a concentração dos erros relativos entre os dados calculados com o CU_{LOG} e o CUC em torno ao valor de zero, mostrando a excelente capacidade e desempenho desse coeficiente em descrever a uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação por gotejamento. Já o CU_U e o DU_U

apresentaram uma forte tendência em subestimar o valor de CUC e DU, da mesma forma que os coeficientes com base na FDP normal, (CU_H e PE_H) apresentaram tendência em subestimar os valores dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (DU) nos 26 ensaios do gotejador RainBird XF-SDI. Além disso, cabe ressaltar a escassez de estudos avaliando a aplicabilidade de FDPs para modelar a uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação por gotejamento.

5.4 Indicadores de qualidade de irrigação baseados na FDP logística

A Tabela 3 apresenta os indicadores de qualidade de irrigação baseados na FDP logística: Coeficiente de distribuição (H), fator de disponibilidade (F), eficiência de distribuição (E) e o déficit médio (Da); considerando o CU_{LOG} variando de 99,9% até 60%, bem como a área adequadamente irrigada (AAI) variando de 99,9% até 50%.

Tabela 3 – Coeficiente de distribuição (H), fator de disponibilidade (F), eficiência de distribuição (E) e déficit médio (Da) baseado na FDP logística.

CU _{LOG}	CV	Indicador	AAI (%)										
			99,9	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50
99,9	0,0013	H	0,9950	0,9979	0,9984	0,9987	0,9990	0,9992	0,9994	0,9996	0,9997	0,9999	1,0000
		F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Da	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	0,0262	H	0,9003	0,9575	0,9683	0,9750	0,9800	0,9841	0,9878	0,9911	0,9941	0,9971	1,0000
		F	1,0000	0,9992	0,9984	0,9976	0,9967	0,9958	0,9948	0,9937	0,9926	0,9913	0,9900
		E	0,9003	0,9568	0,9668	0,9726	0,9768	0,9800	0,9826	0,9848	0,9868	0,9885	0,9900
		Da	0,0144	0,0148	0,0152	0,0156	0,0161	0,0166	0,0172	0,0178	0,0184	0,0192	0,0200
96	0,0524	H	0,8006	0,9150	0,9366	0,9499	0,9600	0,9683	0,9755	0,9821	0,9883	0,9942	1,0000
		F	1,0000	0,9984	0,9968	0,9951	0,9933	0,9914	0,9894	0,9873	0,9851	0,9826	0,9800
		E	0,8006	0,9135	0,9335	0,9452	0,9535	0,9600	0,9652	0,9697	0,9736	0,9770	0,9800
		Da	0,0289	0,0296	0,0304	0,0313	0,0322	0,0332	0,0343	0,0355	0,0369	0,0383	0,0400
92	0,1047	H	0,6013	0,8300	0,8732	0,8999	0,9200	0,9366	0,9511	0,9643	0,9766	0,9884	1,0000
		F	0,9999	0,9964	0,9930	0,9896	0,9860	0,9823	0,9783	0,9742	0,9698	0,9651	0,9600
		E	0,6012	0,8271	0,8671	0,8905	0,9071	0,9200	0,9305	0,9394	0,9471	0,9539	0,9600
		Da	0,0578	0,0592	0,0608	0,0625	0,0644	0,0664	0,0686	0,0711	0,0737	0,0767	0,0800
88	0,1571	H	0,4019	0,7450	0,8097	0,8498	0,8800	0,9049	0,9266	0,9464	0,9649	0,9826	1,0000
		F	0,9998	0,9940	0,9887	0,9834	0,9780	0,9725	0,9667	0,9606	0,9542	0,9473	0,9400
		E	0,4018	0,7406	0,8006	0,8357	0,8606	0,8800	0,8957	0,9091	0,9207	0,9309	0,9400
		Da	0,0866	0,0888	0,0912	0,0938	0,0966	0,0996	0,1030	0,1066	0,1106	0,1150	0,1200
84	0,2094	H	0,2025	0,6600	0,7463	0,7997	0,8399	0,8732	0,9022	0,9285	0,9532	0,9768	1,0000
		F	0,9994	0,9910	0,9837	0,9765	0,9693	0,9620	0,9544	0,9464	0,9381	0,9293	0,9200
		E	0,2024	0,6541	0,7341	0,7810	0,8142	0,8399	0,8610	0,8788	0,8942	0,9078	0,9200
		Da	0,1155	0,1184	0,1217	0,1251	0,1288	0,1329	0,1373	0,1421	0,1475	0,1534	0,1601
80	0,2618	H	-	0,5750	0,6829	0,7497	0,7999	0,8414	0,8777	0,9107	0,9415	0,9710	1,0000
		F	-	0,9871	0,9777	0,9687	0,9597	0,9507	0,9414	0,9317	0,9217	0,9111	0,9000
		E	-	0,5676	0,6677	0,7262	0,7677	0,7999	0,8262	0,8485	0,8678	0,8848	0,9000
		Da	-	0,1481	0,1521	0,1564	0,1610	0,1661	0,1716	0,1776	0,1843	0,1917	0,2001

76	0,3141	H	-	0,4900	0,6195	0,6996	0,7599	0,8097	0,8533	0,8928	0,9298	0,9652	1,0000
		F	-	0,9819	0,9705	0,9598	0,9491	0,9385	0,9276	0,9164	0,9048	0,8927	0,8800
		E	-	0,4812	0,6012	0,6714	0,7213	0,7599	0,7915	0,8182	0,8413	0,8617	0,8800
		Da	-	0,1777	0,1825	0,1876	0,1932	0,1993	0,2059	0,2132	0,2212	0,2301	0,2401
72	0,3665	H	-	0,4051	0,5560	0,6495	0,7199	0,7780	0,8288	0,8749	0,9181	0,9595	1,0000
		F	-	0,9744	0,9617	0,9494	0,9374	0,9253	0,9130	0,9005	0,8876	0,8741	0,8599
		E	-	0,3947	0,5347	0,6167	0,6748	0,7199	0,7567	0,7879	0,8149	0,8387	0,8599
		Da	-	0,2073	0,2129	0,2189	0,2254	0,2325	0,2402	0,2487	0,2580	0,2684	0,2801
68	0,4188	H	-	0,3201	0,4926	0,5994	0,6799	0,7463	0,8043	0,8570	0,9064	0,9537	1,0000
		F	-	0,9630	0,9506	0,9374	0,9242	0,9110	0,8976	0,8839	0,8699	0,8552	0,8399
		E	-	0,3082	0,4683	0,5619	0,6283	0,6799	0,7220	0,7576	0,7884	0,8156	0,8399
		Da	-	0,2369	0,2433	0,2502	0,2576	0,2657	0,2745	0,2842	0,2949	0,3068	0,3201
64	0,4712	H	-	-	0,4292	0,5494	0,6399	0,7146	0,7799	0,8392	0,8947	0,9479	1,0000
		F	-	-	0,9362	0,9231	0,9094	0,8954	0,8812	0,8666	0,8517	0,8361	0,8199
		E	-	-	0,4018	0,5072	0,5819	0,6399	0,6872	0,7273	0,7620	0,7926	0,8199
		Da	-	-	0,2737	0,2815	0,2899	0,2989	0,3089	0,3197	0,3318	0,3451	0,3601
60	0,5236	H	-	-	0,3658	0,4993	0,5998	0,6829	0,7554	0,8213	0,8830	0,9421	1,0000
		F	-	-	0,9169	0,9060	0,8926	0,8784	0,8637	0,8486	0,8330	0,8168	0,7999
		E	-	-	0,3353	0,4524	0,5354	0,5998	0,6525	0,6970	0,7355	0,7695	0,7999
		Da	-	-	0,3041	0,3127	0,3221	0,3322	0,3432	0,3553	0,3686	0,3835	0,4002

Considerando baixos valores de CU_{LOG} e altos valores de AAI, as soluções numéricas apresentam valores negativos, e dessa forma foram omitidos. Bem como não existe solução numérica para os indicadores F, E e Da quando CU_{LOG} é igualado a 99,9% (Tabela 3), estando esse fato de acordo com o observado por Hart e Reynolds (1965) e posteriormente por Smesrud e Selker (2001).

Quando a AAI é igualada à 80% o indicador H é equivalente ao CU_{LOG} . Esse fato torna a aplicação do coeficiente de uniformidade baseado na FDP logística mais fácil e mais preciso do que os outros coeficientes de uniformidade baseados nas FDPs normal (CU_H) e uniforme (CU_U), tornando assim a utilização do CU_{LOG} mais prática e usual na avaliação de sistemas de irrigação, já que o CU_{LOG} não necessita de aproximações numéricas e o seu valor é igual ao indicador H.

Comparando os indicadores derivados da FDP logística (H, F, E e Da) com aqueles propostos por Hart e Reynolds (1965), Walker (1979) e Smesrud e Selker (2001), com base na FDP normal, a adoção da FDP logística e os indicadores têm seu uso sugerido devido ao fato da não necessidade de aproximações numéricas na determinação dos indicadores H, F, E e Da.

Na Tabela 4 estão apresentadas a comparação entre os indicadores H, F, E e Da estimados com a FDP normal (HART e REYNOLDS, 1965) e determinados por meio da FDP logística, considerando a AAI igual a 80%. Podendo-se observar o melhor

ajuste entre o indicador H e o CU_{LOG} quando comparado com o ajuste do CU_H com o indicador H estimado com a FDP normal (células coloridas de cinza).

Tabela 4 – Comparação entre os indicadores de qualidade de irrigação estimados com as FDPs normal e logística, considerando uma área adequadamente irrigada de 80% (AAI = 80%).

CV	CU _H	CU _{LOG}	Indicador	Normal	Logística	Δ
			AAI	80		
0,001	99,92	99,92	H	0,9992	0,9992	-
			F	0,9999	-	-
			E	0,9990	-	-
			Da	0,0006	-	-
0,02	98,40	98,47	H	0,9832	0,9847	-0,0015
			F	0,9977	0,9975	0,0002
			E	0,9809	0,9823	-0,0013
			Da	0,0112	0,0123	-0,0011
0,05	96,01	96,18	H	0,9579	0,9618	-0,0039
			F	0,9942	0,9936	0,0006
			E	0,9523	0,9556	-0,0033
			Da	0,0279	0,0308	-0,0028
0,10	92,02	92,36	H	0,9158	0,9236	-0,0077
			F	0,9878	0,9867	0,0011
			E	0,9047	0,9113	-0,0066
			Da	0,0558	0,0615	-0,0057
0,15	88,03	88,54	H	0,8738	0,8854	-0,0116
			F	0,9808	0,9792	0,0017
			E	0,8570	0,8669	-0,0099
			Da	0,0837	0,0923	-0,0085
0,20	84,04	84,72	H	0,8317	0,8471	-0,0155
			F	0,9732	0,9710	0,0022
			E	0,8093	0,8225	-0,0132
			Da	0,1116	0,1230	-0,0114
0,25	80,05	80,90	H	0,7896	0,8089	-0,0193
			F	0,9647	0,9620	0,0027
			E	0,7617	0,7782	-0,0165
			Da	0,1395	0,1538	-0,0142
0,30	76,06	77,08	H	0,7475	0,7707	-0,0232
			F	0,9552	0,9521	0,0031
			E	0,7140	0,7338	-0,0198
			Da	0,1675	0,1845	-0,0171
0,35	72,07	73,26	H	0,7054	0,7325	-0,0271
			F	0,9446	0,9412	0,0034
			E	0,6664	0,6894	-0,0231
			Da	0,1954	0,2153	-0,0199
0,40	68,08	69,44	H	0,6634	0,6943	-0,0309
			F	0,9327	0,9291	0,0036
			E	0,6187	0,6451	-0,0264
			Da	0,2233	0,2461	-0,0228
0,45	64,09	65,62	H	0,6213	0,6561	-0,0348
			F	0,9191	0,9156	0,0035
			E	0,5710	0,6007	-0,0297
			Da	0,2512	0,2768	-0,0256
0,50	60,10	61,80	H	0,5792	0,6178	-0,0387
			F	0,9036	0,9004	0,0032

E	0,5234	0,5563	-0,0330
Da	0,2791	0,3076	-0,0285

Considerando como exemplo a comparação descrita por Smesrud e Selker (2001) para a FDP normal, foi adotado a mesma comparação agora para a FDP logística. Para isso, foi adotado um coeficiente de variação igual a 0,20, um CU_H de 84,04% e CU_{LOG} de 84,74% (Tabela 4), uma lâmina líquida anual de irrigação igual à 800 mm, (valor máximo considerando uma área de Soja para o estado do Rio Grande do Sul).

Para as condições descritas, a lâmina bruta de irrigação (d) calculada adotando-se a FDP normal é de 961,9 mm ($d = 800/0,8471$), já usando a FDP logística é de 944,4 mm ($d = 800/0,8317$). Essa diferença entre os métodos resultou em uma economia de água de 15,5 mm de água, e considerando um pivô central de 100 ha operando nas condições supracitadas, quando calculando a uniformidade com base na FDP logística de probabilidades, pode gerar uma economia de 15500 m³ de água por safra e soja. Ou seja, quando adotada a metodologia proposta nesse trabalho, com base na FDP logística de probabilidades, pode-se reduzir em até 10,7% a lâmina extra para compensar a desuniformidade do sistema de irrigação, isso devido ao fato da determinação do coeficiente ser mais precisa e com melhor ajuste às lâminas observadas em campo.

6 Conclusões

Os coeficientes de uniformidade baseados na FDP logística (CU_{LOG} e DU_{LOG}), por meio das equações geradas neste estudo, foram os que melhor representaram os valores dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de Distribuição (DU) para os 29 ensaios de campo do equipamento de irrigação mecanizado do tipo lateral móvel, bem como para os 26 ensaios de distribuição de água de gotejadores. Já para as 90 sobreposições de aspersores de impacto de pressão intermediária, os coeficientes com base na FDP normal (CU_H e PE_H) foram os que melhor representaram os valores de CUC e DU medidos em campo.

Os coeficientes de uniformidade com base na FDP uniforme (CU_U e DU_U) foram os que apresentaram os piores ajustes aos valores de CUC e DU para os ensaios de todos os equipamentos, este fato pode ser atribuído à alta uniformidade de aplicação alcançada pelos equipamentos avaliados nesse estudo.

Os indicadores que indicam a qualidade de irrigação, o coeficiente de distribuição (H), fator de disponibilidade (F), eficiência de distribuição (E) e o déficit médio (D_a), baseados na FDP logística, introduziram um método novo e com maior acurácia para avaliar sistemas de irrigação dos que os métodos já existentes na literatura.

Considerando que a eficiência de irrigação é dividida em eficiência de aplicação (perdas de água por evaporação e arraste) e eficiência de distribuição (uniformidade de distribuição da água), e ainda considerando que o coeficiente de distribuição (H) é igual à eficiência de distribuição e ao CU_{LOG} para uma área adequadamente irrigada de 80%, pode-se utilizar diretamente o CU_{LOG} para determinar a eficiência de distribuição de água, o que representa uma vantagem técnica do coeficiente proposto na determinação da eficiência de irrigação e assim na correta e precisa avaliação do sistema de irrigação.

7 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada** /Agência Nacional de Águas. 86 p. Brasília: ANA, 2017. ISBN 978-85-8210-051-

ANYOJI, H.; WU, I. P. Normal distribution water application for drip irrigation schedules. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 37, n.1, p.159-164, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **ABNT/ISO 9261 Equipamentos de irrigação agrícola — Emissores e tubos emissores — Especificação e métodos de ensaio**, 17 p. ABNT, Rio de Janeiro. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **ABNT/ISO 11545 Equipamentos de irrigação agrícola — Máquinas de irrigação pivô central e linear móvel, equipadas com sprayers ou aspersores — Determinação da uniformidade de distribuição de água**, 13 p. ABNT, Rio de Janeiro. 2016.

BALAKRISHNAN, N. **Handbook of the logistic distribution: Statistics: A Series of Textbooks and Monographs** New York, USA. 624 p. 1991.

BEALE, J. G., HOWELL, D. T. Relationships among sprinkler uniformity measures. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, v. 92, n.1, p. 41-48, 1966.

BESKOW, S.; FARIA, L. C.; COLOMBO, A.; MOURA, D. C. M. Modelagem das perdas de água por evaporação e arraste em aspersores de média pressão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p. 221-228, 201.

BURT, C. M.; CLEMMENS, A. J.; STRELKOFF, T. S.; SOLOMON, K. H.; BLIESNER, R. D.; HARDY, L. A.; HOWELL, T. A.; EISENHAUER, D. E. Irrigation performance measures: Efficiency and uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 123, n. 6, p. 423-442, 1997.

CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p.89-97, 1997.

CHAUDHRY, F. H. Sprinkler uniformity measures and skewness. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 106, n. 4, p.425-433, 1976.

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

CHRISTOFIDIS, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. **Revista de Política Agrícola**, ano XXII, n. 1, jan./fev./mar., 2013.

CRIDDLE, W. D.; DAVIS, S.; PAIR, C. H.; SHUCKELY, D. G. **Methods for evaluation irrigation systems**. Washington: USDA, 1956, 24 p. (Agricultural Handbook, 82).

DUKES, M. D. Effect of wind speed and pressure on linear move irrigation system uniformity. **Applied Engineering in Agriculture**. v. 22, n. 4, p 541-548, 2006.

ELLIOT, R. L.; NELSON, J. D.; LOFTIS, J. C.; HART, W. E. Comparison of sprinkler uniformity models. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, v. 106, n. 4, p. 321-330, 1980.

FARIA, L. C.; BESKOW, S.; COLOMBO, A.; OLIVEIRA, H. F. E. Modelagem dos efeitos do vento na uniformidade da irrigação por aspersão: Aspersores de tamanho médio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 2, p.133–141, 2012.

FARIA, L. C.; NORENBURG, B. G.; COLOMBO, A.; DUKES, M.; TIMM, L. C.; BESKOW, S.; CALDEIRA, T. L. Irrigation distribution uniformity analysis on a lateral-move irrigation system. **Irrigation Science**, v. 37, p 195–206, 2019.

FLORES, J. H. N.; RETTORE NETO, O.; FARIA, L. C.; TIMM, L. C. Estimation of the kinect head coefficient (k) based on the geometric characteristics of emitter pipes. **Engenharia Agrícola**, v. 37, p 1091-1102, 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **AquaStat Database**. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en>>. Acesso em: 06 abr. 2021.

HART, W. E. Overhead Irrigation Pattern Parameters, **Agricultural Engineering**, v. 24, n. 7, p.354-355, 1961.

HART, W. E.; REYNOLDS, W. N. Analytical Design of sprinkler systems. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 8, n. 1, p. 83-85, 1965.

HEERMANN, D. F.; DUKE, H. R.; SERAFIM, A. M.; DAWSON, L. J. Distribution functions to represent center-pivot water distribution. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**, v. 32, n. 5, p. 1465-1472, 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **15885: Agricultural irrigation equipment — Sprinklers — Part 1: Definition of terms and classifications**, 18 p. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **15885: Agricultural irrigation equipment — Sprinklers — Part 2: Design and operation requirements**, 11 p. 2021a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **15885: Agricultural irrigation equipment — Sprinklers — Part 3: Characterization of distribution and test methods**, v. 3, 21p. 2021b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **7749-2. Irrigation equipment - Rotating sprinklers - part 2: Uniformity of distribution and test methods**, 6 p. 1990.

ROBERT KISSELL, JIM POSERINA, Chapter 4 - Advanced Math and Statistics. In Robert Kissell, Jim Poserina. **Optimal Sports Math, Statistics, and Fantasy**. Academic Press, p. 103-135, 2017.

KARMELI, D. Estimating sprinkler distribution patterns using linear regression. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 21, n. 4, p.682-686, 1978.

LIMA, Gustavo Borges **Simulação hidráulica de linhas laterais de irrigação localizada**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Hídrica) – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

MANKE, E. B.; NORENBURG, B. G.; FARIA, L. C.; TARJUELO, J. M.; COLOMBO, A.; CHAGAS NETA, M. C. C.; PARFITT, J. M. B. Wind drift and evaporation losses of a mechanical lateral-move irrigation system: Oscillating plate versus fixed plate sprinklers. **Agricultural Water Management**, v. 225. p. 1-11, 2019.

MOLDEN, D.; OWEIS, T. Y.; STEDUTO, P.; KIJNE, J. W.; HANJRA M. A., BINDRABAN, P. S. Pathways for increasing agricultural water productivity. In: MOLDEN,

D. (editor) **Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture**, 2007, p. 279-310. Earthscan, Londres.

NÖRENBERG, B. G. **Modelagem probabilística das lâminas de água aplicadas na cultura do arroz por um equipamento mecanizado de irrigação tipo lateral móvel**. Dissertação. (Mestrado em Recursos Hídricos) – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

SMESRUD J. K. E SELKER J. K. Analytical solution for normal irrigation distribution parameters. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 127, n.1, p.45-48, 2001.

WALKER, W. R. Explicit Sprinkler Irrigation Uniformity: Efficiency Model. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, v. 105. n. IR2, p.129-136, 1979.

WARRICK, A. W. Interrelationships of irrigation uniformity terms. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 109, n. 3, p. 332-337, 1983.

WARRICK, A. W.; HART, W. E.; YATAYEW, M. Calculation of distribution and efficiency for nonuniform irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v.115, n.4, p.674-686, 1989.

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.

YACOUBI, S.; ZAYANI, K.; SLATNI, A.; PLAYÁN, E. Assessing sprinkler irrigation performance using field evaluations at the Medjerda lower valley of Tunisia. **Engineering**, v. 4, n. 10, p. 682-691, 2012.