

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

QUEVIN DE ABREU MARQUES

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE UM
SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DO TIPO PIVÔ CENTRAL**

**Alegrete, RS, Brasil
2022**

QUEVIN DE ABREU MARQUES

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE UM
SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DO TIPO PIVÔ CENTRAL**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado ao Curso de Engenharia
Agrícola da Universidade Federal do Pampa
como requisito parcial para obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia Agrícola

Orientadora: Fátima Cibele Soares

**Alegrete, RS, Brasil
2022**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

M357a Marques, Quevin de Abreu
Avaliação dos parâmetros de desempenho de um sistema de
irrigação do tipo pivô central / Quevin de Abreu Marques.
71 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2022.
"Orientação: Fátima Cibele Soares".

1. Avaliação de desempenho. 2. Sistemas de irrigação. 3.
Eficiência de aplicação. I. Título.

QUEVIN DE ABREU MARQUES

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE
IRRIGAÇÃO DO TIPO PIVÔ CENTRAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Agrícola da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Agrícola.

Trabalho defendido e aprovado em: 14 de março de 2022.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Fátima Cibele Soares
Orientadora
(UNIPAMPA)

Profa. Dra. Chaiane Guerra da Conceição
(UNIPAMPA)

Profa. Dra. Ana Rita Costenaro Parizi
(IFFAR)



Assinado eletronicamente por **CHAIANE GUERRA DA CONCEICAO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/03/2022, às 17:01, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FATIMA CIBELE SOARES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/03/2022, às 18:04, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Ana Rita Costenaro Parizi, Usuário Externo**, em 22/03/2022, às 23:10, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0761949** e o código CRC **038BBA42**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Giordano e Lucimara, que sempre me apoiaram, e me incentivaram a continuar estudando para alcançar meus objetivos.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço aos meus pais que sempre estiveram me apoiando, incentivando, e que não mediram esforços para que eu pudesse continuar estudando.

Às professoras e orientadoras Fátima Cibele Soares e Ana Rita Parizi, pela orientação, incentivo, e que além disso sempre se esforçaram para passarem o máximo de conhecimento durante duas aulas.

Ao técnico do laboratório do IFF, Elton Pilar Medeiros, que se disponibilizou a me ajudar durante os ensaios de caracterização do solo.

A todos os meus professores do curso de graduação que estiveram contribuindo para meu aprendizado.

A todos meus colegas que me acompanharam durante essa caminhada, em especial o Arleston Pinheiro, à Vanessa Bassin Cogo, e à Sueli Elisa Kullmann, que considero grandes amigos.

Ao produtor rural Ivan Agostini pela ótima recepção em sua propriedade e por disponibilizar a área para o estudo.

RESUMO

A agricultura irrigada nacional tem crescido em todas as regiões do país, devido alta competitividade do setor agrícola, uma vez que a irrigação é um fator decisivo no aumento da rentabilidade das áreas de cultivo, além de assegurar a produção em período de escassez hídrica. Nesse aspecto, a irrigação por aspersão tem ganhado cada vez mais notoriedade uma vez que os equipamentos dispensam a sistematização da área para implementação do sistema. Apesar desses equipamentos terem vida útil elevada, ainda sofrem com os desgastes naturais provocados pelo uso intensivo. Diante disso, avaliações e manutenções devem ser realizadas com frequência para verificar possíveis falhas que corroborem para a perda de desempenho do equipamento. Sendo assim foi realizada uma avaliação dos parâmetros de desempenho do sistema de irrigação do tipo pivô central no município de São Francisco de Assis, na região da Fronteira Oeste do estado do Rio grande do Sul, por meio da avaliação dos coeficientes de uniformidade de distribuição e a eficiência de aplicação da lâmina de água. Dessa forma, o presente estudo pôde observar que o equipamento avaliado apresenta índices de uniformidade satisfatórios, onde todos obtiveram médias acima de 80%, embora a eficiência de irrigação em maior parte da área irrigada esteja abaixo da recomendada, com valores menores que 67,5%. Além disso, quando se compara os dados do ensaio de uniformidade, características do solo, tempo e relevo, há evidências que o relevo seja o principal responsável pelos desvios na EA, uma vez que o relevo irregular interfere diretamente na pressão de serviço dos aspersores, acarretando variações na intensidade de aplicação de determinadas áreas.

Palavras-Chave: Sistemas de irrigação, avaliação de desempenho, eficiência de aplicação

ABSTRACT

National irrigated agriculture has grown in all regions of the country, due to the high competitiveness of the agricultural sector, since irrigation is a decisive factor in increasing the profitability of cultivated areas, in addition to ensuring production in periods of water scarcity. In this aspect, sprinkler irrigation has gained more and more notoriety since the equipment does not require the systematization of the area for the implementation of the system. Although these equipment's have a long useful life, they still suffer from the natural wear and tear caused by intensive use. In view of this, evaluations and maintenance must be carried out frequently to check for possible failures that corroborate the loss of performance of the equipment. Therefore, an evaluation of the performance parameters of the central pivot irrigation system was carried out in the municipality of São Francisco de Assis, in the border Oeste region of the state of Rio Grande do Sul, through the evaluation of the coefficients of uniformity of distribution and distribution. the efficiency of application of the water slide. Thus, the present study was able to observe that the evaluated equipment presents satisfactory uniformity indices, where all obtained averages above 80%, although the irrigation efficiency in most of the irrigated area is below the recommended, with values lower than 67.5 %. In addition, when comparing the data from the uniformity test, soil characteristics, weather and relief, there is evidence that the relief is the main responsible for the deviations in the EA, since the irregular relief directly interferes with the service pressure of the sprinklers, causing variations in the intensity of application in certain areas.

Keywords: Irrigation systems, performance evaluation, application efficiency

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Imagem da área irrigada pelo pivô central no município de São Francisco de Assis, RS. Fonte: Google Earth Pro. | 29 |
| Figura 2 - Imagem da área irrigada com demarcação das curvas de nível. Fonte: Google Earth Pro e Global Mapper. | 30 |
| Figura 3 - Imagem de satélite da zona mais crítica do dimensionamento, a qual o ensaio foi realizado. Fonte: Google Earth Pro. | 31 |
| Figura 4 - Imagem do aspersor instalado, modelo I Wobbler. Fonte: MARQUES (2022). | 32 |
| Figura 5 - Imagem do canhão hidráulico instalado no final do balaço. Fonte: MARQUES (2022). | 33 |
| Figura 6 - Imagem do painel de comando do pivô central. Fonte: MARQUES (2022). | 33 |
| Figura 7 - Imagem da extensão da linha lateral do pivô. Fonte: MARQUES (2022). | 34 |
| Figura 8 - Esquema da disposição e dos parâmetros dos coletores para realização do teste de uniformidade. Fonte: SCHONS, 2006. | 35 |
| Figura 9 - Croqui da área de avaliação com as demarcações dos 4 ensaios que foram realizados. Fonte: Google Earth Pro. | 36 |
| Figura 10 - Curvas características de retenção das amostras de solo, com parâmetros ajustados com o modelo de Van Genuchten (1980). | 44 |
| Figura 11 - Zonas de representatividade de cada segmento destinado à avaliação dos parâmetros de desempenho. Fonte: Google Earth Pro. | 48 |
| Figura 12 - Gráfico de Distribuição da precipitação ao longo da linha do pivô central. | 48 |
| Figura 13 - Imagem do aspersor deslocado na 1 ^o torre que provocou desvios na uniformidade de aplicação no local. Fonte: MARQUES (2022). | 49 |
| Figura 14 - Imagem do aspersor danificado, por apresentar dificuldade de rotação e pouca pulverização de água. Fonte: MARQUES (2022). | 50 |
| Figura 15 - Imagem do aspersor deslocado devido a ação do vento da faixa de distância de 390 a 400m. Fonte: MARQUES (2022). | 51 |
| Figura 16 - Imagem dos aspersores funcionando de maneira irregular, sendo o da direita o danificado, e o da esquerda o deslocado. Fonte: MARQUES (2022). | 52 |
| Figura 17 - Imagem da mangueira fura com vazamento no segmento de balanço do pivô. Fonte: MARQUES (2022). | 52 |
| Figura 18 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 1 ^o torre. | 53 |

| | |
|--|----|
| Figura 19 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 2° torre. | 53 |
| Figura 20 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 3° torre. | 54 |
| Figura 21 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 4° torre. | 54 |
| Figura 22 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 6° torre. | 55 |
| Figura 23 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 7° torre. | 55 |
| Figura 24 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 7° torre. | 55 |
| Figura 25 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 8° torre. | 56 |
| Figura 26 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 9° torre. | 56 |
| Figura 27 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 10° torre. | 56 |
| Figura 28 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 11° torre. | 57 |
| Figura 29 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 12° torre. | 57 |
| Figura 30 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 13° torre. | 58 |
| Figura 31 - Gráfico de uniformidade de aplicação para o segmento do balanço. | 58 |
| Figura 32 - Gráfico de uniformidade de aplicação para o canhão hidráulico..... | 58 |
| Figura 33 - Perfil de elevação do local do estudo. | 62 |
| Figura 34 - Imagem do sistema de irrigação, com destaque para o relevo do local. Fonte: MARQUES (2022)..... | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Características técnicas do sistema de irrigação. Fonte: Ficha técnica do equipamento Valley. | 32 |
| Tabela 2 - Interpretação dos valores de CUC, CUD e CUE, de acordo com a classificação proposta por Mantovani (2001). | 42 |
| Tabela 3 - Interpretação dos valores de CUH de acordo com a classificação proposta por Bralts (1986). | 42 |
| Tabela 4 - Caracterização do solo amostrado durante o ensaio. | 43 |
| Tabela 5 - Dados referentes as condições climáticas no dia do ensaio. | 44 |
| Tabela 6 - Lâminas de água avaliadas durante o experimento. | 45 |
| Tabela 7 - Análise estatística para as precipitações de cada segmento do pivô. | 45 |
| Tabela 8 - Classificação dos coeficientes de uniformidade de acordo com a Mantovani (2001), e Bralts (1986). | 46 |
| Tabela 9 - Lâminas armazenadas (mm), antes e após a irrigação do local para 3 pontos de amostragem. | 60 |
| Tabela 10 - Análise estatística para as lâminas armazenadas nas diferentes camadas do solo. | 61 |
| Tabela 11 - Lâminas armazenadas (mm), antes e após a irrigação, e a EA. | 61 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas

CCRAS - curva característica de retenção de água dos solos

CUC - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen

CUD - Coeficiente de Uniformidade de Distribuição

CUE - Coeficiente de Uniformidade Estatístico

CUH - Coeficiente de Uniformidade de Hart

CV - Coeficiente de Variação

Ea - Eficiência de Aplicação

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Lp - A Lâmina Média Coletada pondera

UD - Uniformidade de Distribuição

LISTA DE ANEXOS E APÊNDICES

Apêndice A - Análise da variância das precipitações coletadas pelo teste F ao nível de 5% de significância..... 71

Apêndice B - Análise da variância das lâminas armazenadas no perfil do solo pelo teste F ao nível de 5% de significância. 71

SUMÁRIO

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | OBJETIVO | 17 |
| 1.1.1 | Geral..... | 17 |
| 1.1.2 | Específico | 17 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA..... | 18 |
| 2.1 | Irrigação no Brasil | 18 |
| 2.2 | Irrigação por aspersão | 19 |
| 2.2.1 | Componentes de um sistema de irrigação por aspersão..... | 20 |
| 2.2.2 | Método por aspersão..... | 22 |
| 2.2.2.1 | Sistema convencional..... | 22 |
| 2.2.2.2 | Sistema mecanizado..... | 23 |
| 2.3 | Importância da uniformidade de distribuição | 25 |
| 2.4 | Coeficientes de uniformidade..... | 27 |
| 2.5 | Eficiência de aplicação | 28 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 29 |
| 3.1 | Caracterização do local de estudo..... | 29 |
| 3.2 | Descrição do sistema de irrigação..... | 31 |
| 3.3 | Metodologia do ensaio..... | 34 |
| 3.4 | Método de análise | 37 |
| 3.5 | Classificação do Sistema conforme os parâmetros de desempenho | 42 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 43 |
| 4.1 | Caracterização do solo e das condições climáticas..... | 43 |
| 4.2 | Análise das lâminas aplicadas e dos coeficientes de uniformidade..... | 44 |
| 4.3 | Análise da uniformidade de distribuição de água | 47 |
| 4.4 | Análise das lâminas de água armazenadas no solo | 59 |
| 4.5 | Análise da Eficiência de Aplicação do sistema de irrigação..... | 61 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 65 |
| 6 | REFERÊNCIAS | 66 |
| 7 | APÊNDICES | 71 |

1 INTRODUÇÃO

A irrigação pode ser descrita como sendo uma forma de adicionar água artificialmente a um perfil de solo, com a finalidade de proporcionar níveis adequados de disponibilidade de água para determinada cultura, conforme sua demanda hídrica por estágio fenológico (NASCIMENTO, et al., 2017). Nesse sentido, pode-se apontar diversos métodos de irrigação, que variam conforme o relevo e tamanho da área de implementação. Tendo em vista que sistemas de aspersão convencional, de movimentação manual, são mais indicados para produtores que cultivam pequenas áreas, e que tenham disponibilidade de mão de obra para manutenção do equipamento. Enquanto para áreas maiores que demandariam um grande tempo de manutenção, indicam-se os sistemas mecanizados, como o pivô central, que reduz significativamente os custos com mão de obra devido ao seu maior nível de automação (REZENDE, 1992).

A principal finalidade da implementação de um sistema de irrigação é assegurar a produção em um período de estiagem ou apenas aumentar a produtividade da área. Nesse aspecto, o sistema de irrigação do tipo pivô central se tornou uma ferramenta de grande importância no âmbito agrícola, devido sua robustez e simplicidade de operação. Necessitando de pouca mão de obra para seu funcionamento, o pivô central se tornou ideal para irrigar grande extensões. (PARIZI et al. 2017).

Com o passar dos anos houve uma grande expansão das áreas agrícolas cultivadas com auxílio de equipamentos de irrigação, entretanto muitos desses sistemas são implementados, ainda hoje, sem o rigor dos critérios técnicos mínimos para garantir um bom funcionamento do equipamento (CAINELLI; et al. 1997). Haja vista que para um manejo adequado de um sistema irrigação do tipo pivô central, por exemplo, é necessário ter não só o conhecimento técnico sobre o equipamento utilizado, mas também conhecer os parâmetros de solo, a cultura implementada, clima típico da região e a uniformidade de distribuição de água. Ainda convém lembrar que esses parâmetros são imprescindíveis para garantir o melhor aproveitamento da água e a da energia elétrica utilizada pela máquina (SILVA, 2016).

Ao se instalar um projeto de irrigação é necessário analisar sua eficiência de operação, e verificar se o equipamento está trabalhando nas condições previstas pelo projetista. Para isso, deve-se avaliar as condições de pressão, vazão e a uniformidade de aplicação. Nesse sentido os coeficientes de uniformidade e a eficiência de aplicação são parâmetros utilizados na avaliação desses sistemas, sendo que eles auxiliam na observação de como a água está sendo distribuída no solo (PARIZI et al. 2017).

Sendo assim foi realizada uma avaliação dos parâmetros de desempenho de um sistema de irrigação do tipo pivô central no município de São Francisco de Assis, na região da Fronteira Oeste do estado do Rio grande do Sul, por meio da avaliação dos coeficientes de uniformidade de distribuição e a eficiência de aplicação da lâmina de água.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Geral

Avaliar os parâmetros de desempenho de um sistema de irrigação do tipo pivô central, no Município de São Francisco de Assis, RS, visando otimizar o desempenho do sistema.

1.1.2 Específico

- Avaliar os parâmetros de uniformidade do equipamento;
- Avaliar a eficiência de aplicação de água do equipamento estudado;
- Comparar os resultados encontrados pelos diferentes métodos propostos;
- Determinar a área irrigável do sistema;
- Verificar se houve perda de desempenho do equipamento devido ao uso.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesse contexto, serão abordados assuntos referentes a importância e desenvolvimento da irrigação por aspersão no Brasil. Nesse sentido, a seguinte revisão de literatura, descreverá detalhadamente os principais componentes de funcionamento de um sistema de irrigação do tipo Pivô central, além disso ainda será descrita a importância da uniformidade de distribuição e da eficiência de aplicação de água no solo.

2.1 Irrigação no Brasil

A irrigação, no Brasil, teve seu início no começo do século XX, nas lavouras de Arroz no Rio Grande do Sul (RS), tendo em vista que o estado se firmou como um grande polo de irrigação desde então. Tendo em vista que só houve uma maior descentralização dos polos de irrigação em 1960, quando o RS ainda concentrava 57,2% de toda a área irrigada nacional, que totalizava um montante de 462 mil ha irrigados, enquanto os estados de São Paulo, Minas Gerais, Bahia e Santa Catarina, detinham respectivamente 12,3%, 10,3%, 4,9% e 4,5% da área irrigada. Além disso a irrigação se intensificou no país a partir das décadas de 70 e 80, quando se percebeu a possibilidade de produzir em zonas de clima menos favorável a determinadas culturas devido ao baixo índice pluviométrico. Associado a isso, também houve um aumento das iniciativas governamentais que visavam impulsionar a irrigação no âmbito nacional por meio de execução de obras coletivas para o uso comum, infraestrutura básica, além do suporte técnico e financeiro (ANA, 2017).

Com o passar dos anos e a popularização dos sistemas de irrigação, a agricultura irrigada tem crescido cada vez no âmbito nacional. Nesse sentido, o setor agrícola está em constante desenvolvimento, tendo em vista que o Brasil ainda apresenta uma grande capacidade de expansão de suas áreas irrigadas, devido ao fato de serem irrigadas apenas uma fração do total das áreas cultivadas. Sendo que de acordo com o IBGE que realizou o censo agropecuário de 1995 - 1996, mesmo sendo evidente a participação positiva da irrigação ao setor agroindustrial brasileiro, fazendo parte de aproximadamente 16% do total da produção, percebe-se que o Brasil ainda apresenta uma área irrigada pequena quando comparada à área total irrigável nacional. Segundo a Agência Nacional de Águas, a área irrigada tem crescido em média 4% ao ano desde 1960, sendo que nesse período a área irrigada nacional era de 462 mil há, chegando em 2015 a um total de 6,95 milhões de há irrigados.

De acordo com os dados do censo agropecuário de 2017 elaborado pelo IBGE, o número de propriedade de começaram a utilizar sistemas de irrigação aumentou 52,6% desde 2006, tendo em vista que no total foram mais de 500 mil propriedades que passaram a cultivar

com o auxílio da irrigação. Nesse mesmo período área irrigada também cresceu proporcionalmente com um aumento de 47,6% que equivale a 6,7 milhões de hectares que passaram a ser irrigados. Ainda convém lembrar que dentre os sistemas que foram implementados durante esse período 21% realizam aspersão convencional e 19% são de micro aspersão.

2.2 Irrigação por aspersão

Segundo Pereira (2010) os sistemas de irrigação mais antigos são datados no início do século XX, onde eram utilizados para irrigar gramados ornamentais, sendo que logo passaram a irrigar árvores frutíferas, e hortaliças cultivadas em sistemas intensivos. Mas somente na década de 1930 a irrigação por aspersão começou a ser usada em uma ampla gama de culturas, impulsionado pela elaboração de aspersores de impacto e por tubulações mais leves. Tendo em vista que para o autor a irrigação começou a ganhar grande destaque na agricultura na década de 1950, com a atualização de novos aspersores, tubos de alumínio que admitiam maiores pressões, e sistemas de bombeamento mais eficientes, reduzindo os custos de operação dos sistemas de irrigação. Entretanto para Frizzone (2017) a irrigação se desenvolveu de maneira mais acentuada após o término da segunda Guerra Mundial, com as tubulações mais leves, e os acoplamento de engate rápido que facilitaram o transporte e montagem dos sistemas de irrigação. Desse modo foi em 1960 que os sistemas do tipo pivô central foram inseridos no mercado, propondo custo relativamente baixo devido à alta automação do sistema, e redução de mão de obra necessária.

A irrigação por Aspersão se adapta bem em terrenos onde o relevo não é uniforme, uma vez que esses equipamentos dispensam o nivelamento da superfície do solo, por conseguirem trabalhar com declividades mais acentuadas. Outra grande vantagem da aspersão é a economia de água, que quando é comparada a outros métodos de irrigação, como por inundação, a economia é de 15 a 30%, em consequência disso, a eficiência de irrigação por aspersão variada na ordem de 80 a 90% (FRIZZONE, 2017). Aliado a isso Saleme (2010) também comenta sobre a uniformidade de distribuição dos sistemas de aspersão que pode variar entre 75 a 90%.

Pereira (2010) ainda descreve que a flexibilidade dos sistemas de irrigação por aspersão, inclusive para controle de volume água durante a aplicação, faz com que a utilização desses equipamentos seja praticamente universal para grande parte das condições de relevo e clima. Embora, alguns fatores ambientais possam influenciar no resultado da irrigação, como é descrito por Bernardo et al. (2008), a velocidade do vento reduz a uniformidade da distribuição

de água dos aspersores, devido ao ar gerar uma turbulência, a qual a movimenta as gotas, as retirando de sua trajetória. Enquanto as altas temperaturas, associadas a uma baixa umidade relativa do ar podem aumentar a incidência da evaporação das gotas finas de água.

2.2.1 Componentes de um sistema de irrigação por aspersão

Segundo Bernardo et al. (2008) os principais componentes de um sistema de irrigação por aspersão são: o aspersor, o conjunto motobomba, e as tubulações adutora, de sucção e seus acessórios. Tendo em vista que o componente mais importante é o aspersor, por ser o principal responsável pela pulverização da água em gotas. Seguido do conjunto motobomba que gera uma diferença de pressão entre uma ponta e outra da tubulação de condução, fazendo com que água seja recalcada até o local de destino. E as tubulações de sucção e adutora são responsáveis por realizarem o transporte de fluídos pressurizados do poço de coleta até o aspersor no local de irrigação, desse modo são necessários diversos acessórios que irão proteger ou auxiliar no funcionamento do sistema, onde os mais comuns são: As curvas (30°, 45°, 60° e 90°), reduções, braçadeira, manômetros, válvula de retenção, válvula de derivação, válvula de pé.

O aspersor é elemento mecânico de maior importância no sistema de irrigação por aspersão, uma vez que ele é o principal responsável pelo processo de pulverização de água. Os aspersores irrigam uma área circular que varia conforme o tamanho dos bocais utilizados, tendo em vista que para haver uma melhor distribuição e uniformidade da água é necessário que haja uma sobreposição dos jatos de vários aspersores, garantindo assim uma boa aplicação de água. Para se realizar a escolha do aspersor adequado, deve-se levar em consideração: a intensidade de aplicação (IA) do aspersor que é fornecido pelo fabricante, o espaçamento entre os aspersores para gerar determinada intensidade de aplicação, e velocidade de infiltração básica (VIB) do solo que é determinada em ensaios de infiltração. Dessa forma, deve-se escolher um espaçamento entre aspersores que gere uma intensidade de aplicação ligeiramente menor que a VIB do solo. Haja vista que isso evitará que seja aplicado ao solo um volume de água maior que sua capacidade de absorção, reduzindo assim as chances de ocorrer escoamento superficial e por consequência um maior desgaste da superfície do solo (BISCARO, 2009).

As tubulações têm como principal finalidade conduzir a água desde a fonte de captação até os aspersores onde é realizada a distribuição. As peças podem ser adquiridas comercialmente em unidades de 6 ou 10 m, podendo ser de aço zincado, PVC ou alumínio. Ainda convém lembrar que as tubulações destinadas a irrigação fazem o transporte de fluídos pressurizados, então deve-se atentar a pressão de serviço a que o material está sendo exposto (BERNARDO, et al. 2008)

Para Schons (2006) a seleção econômica de tubulações no dimensionamento dos sistemas de irrigação, ainda é pouca usual, uma vez que os custos de implementação do sistema ganham mais destaque que os custos variáveis de utilização. O autor ainda comenta que a seleção econômica teve receber tanta atenção quanto a solução hidráulica do problema. Nesse sentido o dimensionamento baseado na análise econômica deve determinar para cada condição um diâmetro específico de tubulação visando minimizar não só os custos fixos anuais, mas também os custos variáveis.

Segundo Schons (2010) a tubulação de sucção deve ser mais curta possível, com uma leve declividade da bomba para o local de sucção, e com o mínimo de acessórios especiais, com a finalidade de reduzir a perda de carga na entrada do conjunto motobomba. Além disso, a tubulação deve ser dimensionada de forma que a velocidade na entrada da bomba não seja excessiva para evitar turbulências no fluido no interior do equipamento. Ainda convém lembrar na parte de sucção do sistema devem-se utilizar alguns acessórios para auxiliar proteção do sistema de bombeamento, por exemplo, deve-se utilizar, uma redução excêntrica na tubulação de entrada da bomba, para reduzir o acúmulo de pequenas bolhas, minimizando o efeito da cavitação no sistema; e uma válvula de pé com crivo extremidade da tubulão para evitar a entrada de corpos estranhos junto à água durante o bombeamento.

O conjunto Motobomba é composto de pôr uma bomba d'água que gera uma diferença de pressão entre a entrada e saída da tubulação fazendo com que a água contida em algum reservatório seja recalçada até a outra saída da bomba. Para a escolha da bomba deve-se verificar qual a vazão demandada pelo projeto, e a potência que é necessária para acionar esse sistema, conforme rotação da turbina na bomba. Esses parâmetros devem ser avaliados para adquirir um conjunto Motobomba mais adequado para o projeto, visando uma maior eficiência do sistema. (BISCARO, 2009).

Os sistemas de irrigação normalmente apresentam uma bomba de sucção que pode ser utilizada de forma individual, ou até mesmo de forma associada com uma unidade ou até mais de uma unidade, dependendo da solicitação do projeto, configurando uma associação de bombas, o qual pode ser descrita como associação em paralelo ou em série. Sendo que a primeira associação consiste em 2 ou mais bomba que trabalham de forma conjunta para que suas vazões fluam pela mesma tubulação ao mesmo tempo. Enquanto a associação em série é utilizada para se somar as alturas manométricas projetadas por cada sistema de bombeamento, quando se há a necessidade de uma altura manométrica muito elevada (SCHONS, 2006).

Segundo Schons (2006), a maior preocupação com os sistemas de bombeamento é o fenômeno de cavitação que consiste em uma rápida vaporização e condensação de um líquido.

Tendo em vista que esse fenômeno ocorre quando o líquido é mantido sob uma temperatura constante, e é submetido a pressão de vapor. O autor ainda descreve que a cavitação é um dos principais fatores que geram a queda de rendimento do sistema de bombeamento, trepidação e vibração do equipamento, além da corrosão internas das paredes da bomba.

2.2.2 Método por aspersão

Os sistemas de irrigação podem ser divididos em dois grandes grupos, sendo eles: os sistemas convencionais, os quais são utilizados em pequenas áreas, as quais apresentam uma maior disponibilidade de mão de obra e menor custo de aquisição; e os sistemas mecanizados que são mais utilizados devido a maior automação do sistema, possibilitando a irrigação em maiores extensões, com pouca necessidade de mão de obra.

2.2.2.1 Sistema convencional

Os sistemas de irrigação convencional são classificados segundo Biscaro (2009) como portátil, semiportáteis e fixos. Haja vista que no Brasil esses sistemas são muito utilizados devido ao menor custo de implementação quando comparado aos métodos mecanizados; contudo a irrigação convencional exige uma maior mão de obra no manejo e operação, devido a movimentação e operação do sistema ser realizada de forma manual.

Os sistemas portáteis são constituídos por tubulações que permitem a movimentação tanto das linhas laterais quanto da linha principal, com características que tornam o sistema de fácil transporte, instalação e manutenção, possibilitando que o sistema seja operado de forma manual. Nesses sistemas as tubulações são mais leves, e apresentam juntas e conexões de acoplamento que facilitam a montagem do equipamento. Os aspersores são dispostos nas linhas laterais que são movimentadas diariamente de forma com que toda área seja irrigada uniformemente. (BERNARDO, et al. 2008).

Enquanto os sistemas portáteis permitem a movimentação de todo o equipamento de irrigação de uma área para outra, o sistema semiportátil operam em uma única área. Desse modo a tubulação da linha principal permanece fixa, por ser constituída de ferro fundido, aço zincado ou alumínio, que são materiais mais pesados e de maior durabilidade, normalmente a tubulação principal fica enterrada. Sendo assim somente as linhas laterais são movimentadas na área para permitir que toda área seja irrigada (BERNARDO, et al. 2008).

Os sistemas de irrigação fixos possuem as linhas principais, secundárias e laterais enterradas na área em quantidade suficiente para irrigar toda a área. Esse método de irrigação apresenta um maior valor inicial de implementação por unidade de área, mas ainda se torna

viável em regiões onde a mão de obra é escassa. Apesar de todo o sistema ser disposto na área, irrigar toda área ao mesmo tempo necessitaria de uma grande vazão e conseqüentemente de tubulações de maior diâmetro, o que aumentaria ainda mais o custo do equipamento. Desse modo, a área é dividida em parcelas onde apenas uma parte dos aspersores funciona simultaneamente, sendo que todas as parcelas são irrigadas individualmente (BISCARO, 2009).

2.2.2.2 Sistema mecanizado

Um sistema de irrigação mecanizado tem como objetivo realizar a irrigação em grandes áreas, as quais não seria viável realizar um manejo convencional devido ao maior custo de manutenção e de mão de obra, e para aumentar a eficiência de aplicação de água, uma vez que há uma grande redução dos custos com mão de obra, pois o conjunto de aspersores é montado sobre um sistema mecânico com rodados. Sendo assim, esses sistemas são compostos por uma linha lateral móvel que se desloca lateralmente ou perpendicularmente à fonte fornecedora de água, por meio de motores elétricos que realizam o deslocamento de maneira sincronizada de cada torre. Desse modo, os sistemas de irrigação podem ser divididos em lateral móvel, pivô central e autopropelido. (BISCARO, 2009).

O sistema mecanizado com deslocamento lateral é composto por uma única linha que se desloca perpendicularmente a fonte fornecedora de água (BISCARO, 2009). As torres normalmente apresentam-se em formato de A, que são apoiadas em rodados que são responsáveis por executar a movimentação do equipamento. Enquanto os sistemas autopropelidos funcionam por meio de um canhão hidráulico que é montado em uma carreta que se desloca pela área realizando a irrigação. De acordo Bernardo, et al. (2008), o sistema é composto por um motor que é responsável pela propulsão do equipamento, de um aspersor do tipo canhão, uma mangueira de alta pressão que é acoplada a linha principal que fica enterrada no local, e de um cabo de aço que é preso a carreta. O autor ainda descreve que a movimentação é realizada por meio do acionamento de um pistão hidráulico que traciona o cabo, o qual anteriormente foi ancorado na carreta com o canhão hidráulico.

O sistema de irrigação do tipo pivô central chegou no Brasil na década de 1970, impulsionado por programas governamentais, fazendo com que o novo método de distribuir água no solo se consagrasse. Além disso o pivô central logo conquistou a preferência do produtor irrigante, uma vez que o sistema apresentava uma alta eficiência no uso da água, cerca de 70 a 90%, e por ser de fácil operação (SCHMIDT, 2004).

O deslocamento da linha lateral de um pivô é realizado por um sistema de movimentação circular autopropelido que movimenta o equipamento entorno do próprio eixo

por meio de um acionamento eletro hidráulico. O equipamento é basicamente constituído por uma linha lateral de 100 a 800 m de comprimento, feita de tubos de aço com um acoplamento especial, que são suportadas por torres de sustentação que apresentam rodados, nos quais é imprimida a força de propulsão necessário para realizar a movimentação do sistema. Haja vista que a trajetória é circular em torno do Pivô Central, que tem como objetivo ancorar o sistema e servir como fonte de potência e fornecimento de água, a qual é levada ao Pivô por meio de uma tubulação adutora, normalmente enterrada (BERNARDO, et al., 2008).

Pereira (2001) descreve que a trajetória de toda linha lateral do pivô é descrita pela movimentação da torre mais externa. Sendo que se todas as torres estiverem alinhadas, a movimentação do sistema terá início na última torre, em seguida ocorrerá o movimento nas torres subsequentes. Sendo que esse processo ocorre de forma intermitente até que todas as torres adjacentes sejam movimentadas, por meio do acionamento dos motores redutores dos rodados, conforme há um aumento da deflexão entre as torres. Apesar da velocidade angular do equipamento ser constante, a velocidade média de deslocamento individual de cada torre deve ser crescente a partir do ponto inicial, para que seja induzida na linha lateral o movimento circular do equipamento.

Além disso, a área que é irrigada por cada torre também é progressivamente maior, havendo a necessidade de se utilizar emissores com maior vazão ao longo da linha lateral, de modo que toda área receba a mesmo volume de água de maneira uniforme. Então pode-se perceber que nas torres próximas ao pivô a intensidade de aplicação de água é menor quando comparada as torres mais externas. Outro fator importante citado pelo autor é que a área irrigada pelas torres iniciais é menor que a área irrigadas pelas torres mais externas, embora o custo de irrigação de cada vão seja praticamente o mesmo.

Bernardo et al. (2008) também destacam que comparado a outros sistemas a irrigação, o Pivô central apresenta diversas vantagens como: a grande redução da mão de obra necessária para sua operação, uma vez que o sistema é autopropelido, e movimenta-se de forma automática pelo acionamento dos rodados das torres; após o término da irrigação o equipamento já estará na posição inicial novamente, pronto para a próxima irrigação; há uma economia com tubulações, devido ao sistema necessitar apenas de uma adutora que normalmente é enterrada. E como principal desvantagem desse sistema pode-se citar: a perda de aproximadamente 20% da área, sendo que com um raio de ação de 400 m irriga-se 50 a 54 ha de um total de 64 ha; e a alta intensidade de aplicação nas extremidades do equipamento, dessa forma deve-se tomar cuidado com a maior incidência de escoamento superficial, devido ao alto volume aplicado naquela região em um curto período.

O pivô central é um dos sistemas de irrigação com maior automação disponíveis no mercado. Tendo em vista que os equipamentos apresentam desde acessórios mais simples, e componentes que permitem o acionamento do pivô a distância por meio de ondas de rádio e até mesmo por um comando no celular. Ainda convém lembrar que também existem sistemas automatizados que fazem o acompanhamento em tempo real da umidade contida no solo, e a partir disso realizam a irrigação no volume necessário para determinada situação. (VILELLA, 1999).

Com o passar dos anos houve uma maior preocupação com a redução do consumo de energia e de recursos naturais, durante a irrigação, mantendo a uniformidade de aplicação. Nesse sentido, a modernização dos Pivôs Centrais tem ocorrido principalmente nos sistemas de propulsão, alinhamento e nos distribuidores de água. Tendo em vista que diversas tecnologias foram adicionadas a esses sistemas como: articulações flexíveis entre torres, tubulações aéreas de maior diâmetro, e maiores vãos livres entre torres, emissores de baixa pressão, motores elétricos de propulsão mais eficientes (SCHONS, 2006).

Com a necessidade de se reduzir os custos com energia, e mesmo assim manter os parâmetros de uniformidade e de eficiência de aplicação, foram desenvolvidos os emissores de baixa, que logo foram inseridos no mercado com a premissa de substituir os tradicionais aspersores de impacto, aplicando volumes de água semelhantes e mantendo uma boa condição de uniformidade de aplicação, com uma redução no consumo de energia para sua operação. Dessa forma os pivôs passaram a ser projetados e redimensionados para operarem em baixas pressões, embora as pressões reduzidas gerem aumentos na taxa de aplicação, que podem gerar problemas de manejo e conservação do solo e maiores perdas por evaporação ou deriva (SCHONS, 2010).

2.3 Importância da uniformidade de distribuição

Com a passar dos anos a uniformidade de aplicação nos sistemas de irrigação tem ganhado cada vez mais notoriedade, em decorrência da crescente preocupação com o manejo e conservação dos recursos naturais, aliado ao fato do crescente custo de produção, devido ao acréscimo na tarifa de energia e do no preço dos insumos. Dessa forma, a o manejo adequado de água que é aplicada no solo propicia não só uma melhor rentabilidade da área, mas também o melhor manejo dos recursos hídricos, que estão cada vez mais escassos (SANDRI et al. 2009). Além disso, ainda é citado pelo autor que na maioria das vezes os produtores reconhecem a necessidade de controlar a quantidade de insumos, sementes e defensivos que são utilizados nas lavouras. Todavia, os produtores ainda não percebem a necessidade de também controlar o

volume de água que utilizado de maneira artificial na produção, devido a legislação brasileira, diferente das demais, ainda não tarifar o uso indiscriminado dos recursos hídricos

Sandri et al. (2009) destaca em sua pesquisa que quanto menor for a variação da uniformidade de um sistema de irrigação, maior será o controle sobre a lâmina que realmente é aplicada sobre a superfície do solo. Desse modo, há uma redução das perdas de volume de água, fazendo com as plantas tenham acesso a quantidade de água que necessitam, aumentando assim sua produtividade.

A uniformidade de distribuição, Segundo Schons et al. (2014), também pode ser utilizada como parâmetros de comparação entre diferentes sistemas de aplicação. Haja vista que um sistema de irrigação que aplica uma lâmina média adequada, porém com uma baixa uniformidade, há o aumento da probabilidade da formação de áreas sub irrigadas, enquanto outras áreas recebem água em excesso.

É comentado por Castiblanco (2009) que um dos parâmetros de desempenho de um sistema de irrigação é a uniformidade de aplicação, que é citada pelo autor como um dos parâmetros mais importantes para avaliar a qualidade da irrigação. Devido ao termo uniformidade estar associado a variabilidade da lâmina de água que é aplicada no solo. Além disso, Brennan e Calder (2006) citado por Castiblanco (2009), afirmam que lâmina de irrigação considerada ótima é aquela que maximiza o lucro esperado, conforme a uniformidade de aplicação, e curva característica de necessidade de água da cultura. Eles ainda reforçam o pressuposto de que a uniformidade de irrigação tem influência direta no rendimento das culturas, uma vez que a uniformidade de aplicação é o parâmetro mais importante a ser avaliado durante a irrigação.

Heinemann et al. (1998) classificam os fatores que podem alterar uniformidade de distribuição de um equipamento em climáticos, e não climáticos. Sendo que no primeiro caso o autor cita a evaporação da água, temperatura do ar, umidade relativa do ar, e o vento. Enquanto nos fatores não climáticos são relacionados a aferição do equipamento e possíveis erros de ensaio, desse modo são citados a pressão de operação do emissor, velocidade, alinhamento da linha lateral, e altura do emissor.

Para se obter um controle eficiente da lâmina de irrigação que é aplicada pelo equipamento, devem ser realizados ensaios periódicos com a finalidade de avaliar a lâmina média e a uniformidade de distribuição de água. Após a análise dos dados coletados, se o equipamento apresentar resultados não satisfatórios, deve-se realizar uma revisão na máquina para identificar e substituir componentes que estejam operando de forma inadequada.

Schons et al. (2014) realizaram um estudo o qual avaliaram sistemas de irrigação no Rio Grande do Sul, nas regiões de Cruz Alta e região de Santo Augusto, onde puderam evidenciar a redução da uniformidade de distribuição, devido ao mal funcionamento de aspersores e por vazamentos nas tubulações.

Sendo que Cainelli et al. (1997) afirmam que ao realizar a substituição de componentes avariados, aumenta-se a aproximação entre lâmina que se deseja aplicar e a lâmina que realmente é aplicada no solo. Além disso, ainda há uma redução do consumo de energia pelo sistema de bombeamento para a realização da mesma tarefa.

2.4 Coeficientes de uniformidade

De acordo com Rezende (1992) os parâmetros de uniformidade de distribuição expressam a variabilidade da lâmina de água que é aplicada ao longo de uma linha radial de um pivô central, além disso ainda mostram a dispersão dos valores encontrados com a lâmina média que proposta para irrigação.

Para os sistemas de aspersão se destacam, segundo Bernardo et al. (2008), os seguintes parâmetros de avaliação de desempenho: Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), o Coeficiente de Uniformidade Estática (CUE) e o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD).

Onde o primeiro parâmetro foi proposto por Christiansen (1942), ficando conhecido como Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) que posteriormente foi modificado por Heermann e Hein (1968). Tendo em vista que o primeiro modelo considerava que cada coletor representava uma área igual, diferentemente da situação de um pivô central, dessa forma Heermann e Hein que buscaram uma maior representatividade da equação para coletores que abrangessem áreas de diferentes tamanhos. Além disso, Wilcox e Swailes (1947) trabalharam em uma equação a qual utilizaria como parâmetro o desvio padrão como medida de dispersão, elaborando assim o Coeficiente de Uniformidade Estática (CUE). Posteriormente, Kruse (1998) elaborou um parâmetro que ficou conhecida como Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), que apresentam como base de cálculo a razão entre a média de 25% dos menores valores das lâminas coletadas, e a média total das lâminas que são aplicadas.

Segundo Merriam e Keller (1978), para culturas de alto valor econômico, as quais apresentam sistemas radiculares rasos, o sistema de irrigação mais viável e econômico, é aquele que apresenta maior uniformidade de distribuição de água, sendo o recomendado de 80 a 88%

Quando se fala em manejo adequado dos recursos hídricos em um sistema de irrigação, a melhor escolha de investimento é na melhora da uniformidade de distribuição. Nesse sentido,

Heinemann & Frizzone (1995) concluíram que o aumento do coeficiente de uniformidade de Christiansen, em um sistema pivô central, de 81,21% para 94%, em relação aos graus de adequação de 75%, 80% e 85%, resultou, respectivamente, em uma economia no volume de água aplicada de 11,86%, 14,24% e 16,68%.

2.5 Eficiência de aplicação

De acordo com o que é citado por Rezende (1992) a quantidade total de água que deve ser aplicada ao solo depende da quantidade real de água necessária e da eficiência de aplicação (EA). Nesse sentido a quantidade real de água requerida pelo solo é definida através do déficit hídrico da camada onde se encontra o sistema radicular efetivo das plantas. Enquanto a eficiência de aplicação é a estimativa da porcentagem de água que aplicada e que chega à superfície do solo. Tendo em vista que essa eficiência expressa as perdas por evaporação e por arrastamento do vento. Desse modo, deve-se atentar a esse parâmetro para que ele seja relacionado a quantidade necessária de água das plantas, evitando assim irrigações subdimensionadas.

Há sistemas de irrigação que naturalmente apresentam baixa eficiência de aplicação, por serem mal projetados. Nesse sentido, os ensaios são utilizados como forma de avaliar possíveis falhas dos sistemas, assim como auxiliam na tomada de decisão sobre qual iniciativas devem ser executadas para melhorar a eficiência do equipamento (SCHONS, 2010).

Em trabalhos realizados a respeito da eficiência de irrigação, segundo Bernardo et al. (2008) para os sistemas de pivô central as eficiências têm variado entre 70% e 90%, tendo em vista que normalmente o valor mais próximo do real é de 80% de eficiência.

Pinto et al. (2006) Avaliaram a influência das condições climáticas na EA, através de regressões lineares os autores puderam quantificar a influência da temperatura, umidade relativa do ar e do vento na eficiência de aplicação. Desse modo, a temperatura e umidade relativa do ar se mostraram pouco significantes, uma vez que a para o período de análise houve poucas variações climáticas. Todavia, o vento se mostrou grande maior significância nas perdas de eficiência de aplicação do pivô estudado, sendo que análise da regressão mostrou que há uma possibilidade de 96,6% dos desvios provocados pelas ações climáticas na Ea estarem relacionado com a influência direta do vento.

As regiões de Cruz Alta e região de Santo Augusto, no estado do Rio grande do Sul, foram alvo do estudo de Schons et al. (2014) que avaliaram a uniformidade e eficiência de aplicação de sistemas de irrigação do tipo pivô central. Onde os autores descreveram que maior parte dos defeitos dos equipamentos de irrigação estavam relacionados com as tubulações

aéreas e aos aspersores, que influenciaram diretamente na eficiência de aplicação de água daqueles sistemas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local de estudo

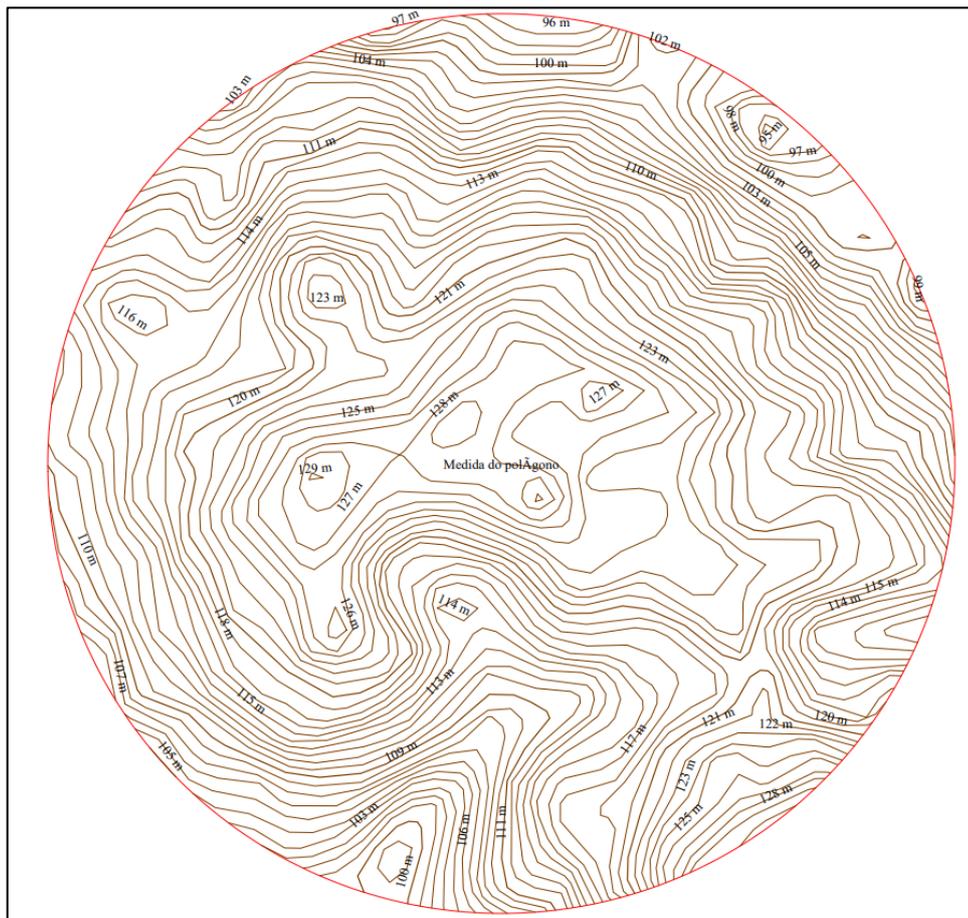
O estudo foi conduzido no dia 3 de dezembro de 2021, na propriedade do produtor rural Ivan Agostini Antoniazzi, tendo em vista que sua fazenda está localizada a 14 km do perímetro urbano do município de Manoel Viana, na região da Fronteira Oeste do Estado do Rio Grande do Sul, Latitude: -29.603607° e longitude: -55.324960° . Segundo Köppen a classificação do clima da região é subtropical úmido (Cfa), caracterizado por estações bem definidas, com invernos mais secos e verões chuvosos, com bom índice pluviométrico anual. A área destinada ao experimento, conforme a Figura 1, é de aproximadamente de 162 ha que foi cultivada com soja em meados de novembro.

Figura 1 - Imagem da área irrigada pelo pivô central no município de São Francisco de Assis, RS. Fonte: Google Earth Pro.



Um levantamento planialtimétrico foi realizado na área de estudo por meio de imagens de satélite que foram processadas no software Global Mapper para a obtenção das curvas de nível do local, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Imagem da área irrigada com demarcação das curvas de nível. Fonte: Google Earth Pro e Global Mapper.



Sendo assim pode-se determinar que a altitude do pivô central é de 126m, e a região mais crítica do dimensionamento é faixa sudoeste da área (Figura 3) que apresenta um vale de 14 m de profundidade, com declividade média de 7% seguida de um active que chega à altitude de 128m.

Figura 3 - Imagem de satélite da zona mais crítica do dimensionamento, a qual o ensaio foi realizado. Fonte: Google Earth Pro.



3.2 Descrição do sistema de irrigação

O sistema de irrigação por pivô central é da empresa Valley Irrigation, modelo AF 3000-10, instalado em 15/11/2011. O sistema opera em baixa pressão, possuindo 13 torres, 1 vão em balaço de 25m, e um canhão hidráulico modelo Twin101 com inclinação de 18°. O equipamento possui 302 aspersores I-Wobbler, que trabalham a pressão de 10 psi, conectados por mangueiras, irrigando uma área de 162,18 ha. Além disso, o sistema de bombeamento é composto por 2 bombas centrífugas em série da marca KSB com vazão prevista de 564,53 m³/h, com 2 motores elétricos de 150 cv que alimentam o pivô por uma tubulação adutora de 815m de 300mm de diâmetro. A fonte de alimentação do sistema de bombeamento apresenta potência de 300 kva e tensão de 380 v. As demais características técnicas do sistema podem ser encontradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características técnicas do sistema de irrigação. Fonte: Ficha técnica do equipamento Valley.

| Composição do Sistema | | Características técnicas | |
|-------------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|
| Altura livre entre as torres(m) | 3 | Raio efetivo da área irrigada (m) | 718,48 |
| 7 Lances M 8.5/8 | 48,04 | Área circular irrigada (ha) | 162,18 |
| 6 Lances L 6.5/8 | 54,88 | Lâmina Bruta (mm/dia) | 7,5 |
| Compr. até última torre (m) | 665,56 | Tempo de operação diário (h) | 21 |
| Compr. dos tubos (m) | 691 | Vazão total (m ³ /h) | 564,5 |
| Alcance efetivo do canhão (m) | 27,42 | V. da última torre (m/h) | 254,5 |
| Lâmina Bruta do canhão (mm) | 4,96 | T. mínimo por volta (h) | 16,43 |
| vazão do canhão (m ³ /h) | 28,7 | Lâmina Bruta mínima (mm/dia) | 5,87 |

No dia do ensaio foram capturadas imagens do sistema de irrigação para identificação da real condição de seus componentes, dessa forma pode-se visualizar os aspersores do sistema na Figura 4, o canhão hidráulico na Figura 5, o painel de comando na Figura 6 e a extensão da linha lateral na Figura 7.

Figura 4 - Imagem do aspersor instalado, modelo I Wobbler. Fonte: MARQUES (2022).



Figura 5 - Imagem do canhão hidráulico instalado no final do braço. Fonte: MARQUES (2022).

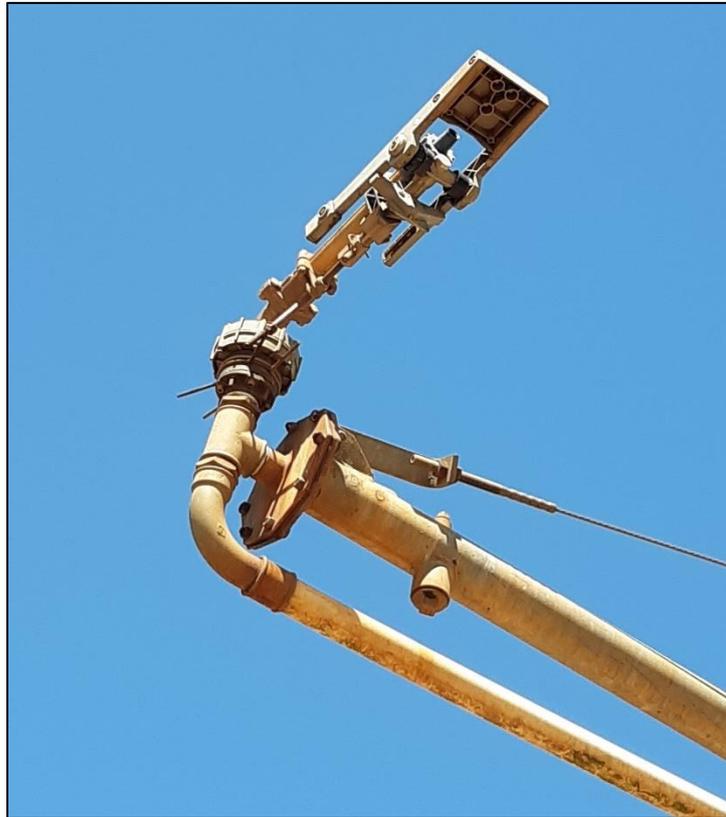


Figura 6 - Imagem do painel de comando do pivô central. Fonte: MARQUES (2022).



Figura 7 - Imagem da extensão da linha lateral do pivô. Fonte: MARQUES (2022).

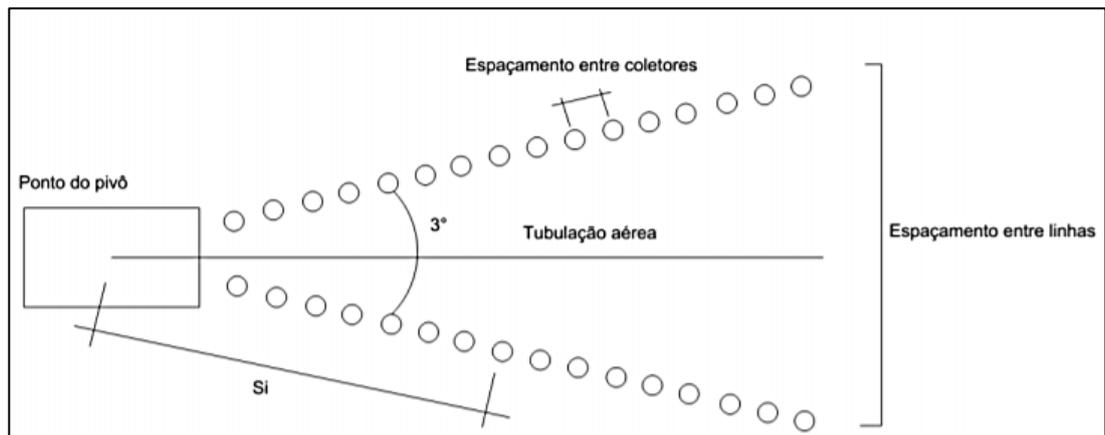


3.3 Metodologia do ensaio

A metodologia abordada para a obtenção dos parâmetros de cálculo da distribuição de água foi a de Merriam et al. (1973) que consiste basicamente em realizar a coleta dos volumes de água por meio de pluviômetros numerados, os quais estavam separados por distâncias equidistantes em ordem crescente, em duas linhas radiais. Nesse sentido, foram identificadas as linhas radiais, na zona de maior aclave da área, sendo que as linhas foram utilizadas para o posicionamento dos coletores do ensaio.

O alinhamento dos coletores foi realizado de forma que as duas linhas formem entre si um ângulo de 3° , conforme a figura 8. O alinhamento dos coletores, inicialmente, foi realizado com o deslocamento da própria linha lateral do pivô, onde todos os coletores do primeiro alinhamento foram instalados na posição inicial, em seguida o equipamento foi configurado para se deslocar em 3° , onde foi posicionada a segunda linha de coletores.

Figura 8 - Esquema da disposição e dos parâmetros dos coletores para realização do teste de uniformidade. Fonte: SCHONS, 2006.



Como a linha lateral do pivô avaliado é bem extensa, e o kit Fabrimar de avaliação utilizado apresentava somente 70 coletores com varetas de fixação, foi necessário particionar o ensaio, sendo que para cada um dos ensaios os coletores foram distribuídos com espaçamentos de 6 m entre si, a 50 cm de altura do solo, em duas linhas radiais. Tendo em vista que o raio efetivo de irrigação é de aproximadamente de 720 m, fracionou-se o experimento em 4 partes, onde os primeiros 3 ensaios utilizaram 68 coletores, que foram organizados conforme a literatura citada, totalizando de 204m de extensão avaliada por ensaio, e para última parte do experimento foram utilizados 36 coletores para cobrir os 108m restantes. Ainda convém lembrar que para fracionar o ensaio é necessário respeitar o ângulo de abertura das linhas radiais de cada ensaio, e foi necessário deslocar horizontalmente os ensaios subsequentes, conforme a figura 9, a fim de o equipamento não irrigar duas vezes a mesma parcela, evitando, portanto, desvios nas lâminas armazenadas no solo

Além disso, ainda foi necessário analisar as perdas por evaporação do local, desse modo 2 dos pluviômetros, que apresentam área de coleta de 50,27 cm², foram selecionado em cada ensaio para serem distribuídos de forma aleatória no campo de estudo, com um volume de água conhecido, uma vez que todo volume evaporado foi adicionado ao volume coletado em cada pluviômetro no processamento dos dados.

Figura 9 - Croqui da área de avaliação com as demarcações dos 4 ensaios que foram realizados. Fonte: Google Earth Pro



Com os coletores devidamente posicionados para cada ensaio iniciou-se o movimento do equipamento de forma que ele passe por todos os coletores realizando a distribuição da lâmina de água proposta. Após cada ensaio o sistema de irrigação foi desligado, para a aferição do volume coletado em cada pluviômetro por meio de uma proveta graduada a cada de 0,1ml.

É importante ressaltar que os pluviômetros foram numerados e ficaram dispostos em ordem crescente, onde a os coletores da esquerda do pivô apresentavam números ímpares e os coletores a direita apresentavam números pares, para facilitar a organização dos dados coletados para a realização da média ponderada, que leva em consideração o volume coletado em cada ponto e distância observada até o pivô central. Aliado a isso pode-se dizer que a ponderação é o método que melhor representa a lâmina coleta , uma vez que o volume coletado por um pluviômetro de ordem i , representa uma área menor quando comparado ao volume coletado por um pluviômetro de ordem $i + 1$.

Ainda convém lembrar que foram verificadas as estações meteorológicas próximas ao local do estudo, para caracterizar as condições climáticas no dia do ensaio, como umidade relativa do ar, temperatura, e velocidade do vento. Tendo em vista que esses são parâmetros que podem influenciar os resultados de ensaio.

Com auxílio de anéis volumétricos, foram coletadas amostras indeformadas do solo antes e após a irrigação para verificar a quantidade de água que foi armazenada no solo. Desse modo 3 amostragens foram realizadas, sendo a primeira a 200m, a segunda 400m e a terceira a

600m de distância do pivô. As profundidades amostradas foram de 0-10cm, 10-20cm e 20-30cm, com 2 repetições para cada camada, antes e depois da irrigação, dessa forma o ensaio conta com 36 amostras indeformadas de solo que foram levadas ao Laboratório de Solos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha, em Alegrete – RS.

O Manual de Métodos de Análise de Solo de Teixeira et al. (2017) descreve que a umidade no solo no potencial de 1500 Kpa é denominada ponto de murcha permanente (PMP), e a umidade potencial de 33 Kpa pode ser descrita como capacidade de campo (CC). Dessa forma a CC e o PMP foram obtidos por meio da plotagem da curva característica de retenção de água dos solos (CCRAS) proposta na metodologia da câmara de Richards (1965) com pontos de 0, 33, 60, 100, 300, 500 e 1500 Kpa, tendo seus parâmetros de cálculo ajustados, utilizando-se os procedimentos sugeridos por Van Genuchten (1980).

As amostras de solo tiveram sua granulometria analisada pelo método da pipeta proposto pela Embrapa (1997), e suas texturas foram classificadas pelo método do Triângulo Textural elaborado por Lemos & Santos (1984), que ainda hoje é utilizado pela associação brasileira de ciência do solo.

3.4 Método de análise

A determinação da uniformidade de aplicação de água pode ser utilizada para avaliar a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada ao longo de uma linha lateral de amostragem, evidenciando a variância dos valores reais coletados com os parâmetros da lâmina média aplicada. Dessa forma, pode-se determinar a uniformidade de uma aplicação a partir do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE) e o Coeficiente de Uniformidade de Hart (CUH).

Durante muitos anos vários pesquisadores propuseram parâmetros de avaliação de uniformidade de distribuição de lâminas de irrigação. Nesse sentido Christiansen (1942), em seu estudo sobre irrigação por aspersão, foi o primeiro a quantificar a uniformidade de aplicação de água por meio de um coeficiente, conforme a equação 1.

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

Em que:

CUC = Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, em %;

X_i = lâmina coletada no ponto “i”, mm;

\bar{X} = lâmina média de todas as observações, mm;

N = número de coletores observados.

Castiblanco (2009) comenta que em um sistema de aspersão convencional cada coletor representa uma área similar, diferentemente de um sistema de irrigação do tipo pivô central, onde os coletores que são separados de forma equidistante, estando distribuídos em uma linha radial que vai do centro do pivô até sua extremidade. Desse modo, conforme maior a distância do coletor ao centro do pivô, maior será sua área de representatividade. Sendo assim, não é possível aplicar diretamente a equação de Christiansen (1942), que considera os coletores representando a mesma área. Para o caso do pivô central Heermann e Hein (1968) modificaram a equação original de Christiansen (1942), fazendo uma ponderação da entre as lâminas coletadas e a área representativa de cada coletor, ou pela distância do coletor até o pivô central, conforme a equação 2.

$$CUC_H = \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n S_i * |X_i - X_p|}{\sum_{i=1}^n S_i * X_i} \right\} * 100 \quad (2)$$

Em que:

CUC_H - Coeficiente de uniformidade de Christiansen, modificado por Heermann & Hein, (%);

X_i = lâmina coletada no ponto “i”, mm;

S_i = Distância do centro do pivô até o coletor “i”, m;

X_p = Lâmina média ponderada, calculada pela equação 3.

$$X_p = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n X_i * S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \right\} \quad (3)$$

Kruse (1978) elaborou um parâmetro de uniformidade, que hoje é recomendado pelo serviço de conservação do solo dos Estado Unidos. Tendo em vista que esse parâmetro ficou conhecido como Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), que é basicamente uma razão entre a média de 25% dos menores valores das lâminas coletadas, e a média total das lâminas que são aplicadas. Ainda convém lembrar que o CUD também foi modificado para

atender a situação de pivôs centrais, onde cada coletor representa uma área distinta. Desse modo pode-se chegar à equação 4.

$$CUD = \left[\frac{\left(\frac{\sum_{i=p}^q X_i \cdot S_i}{\sum_{i=p}^q S_i} \right)}{\left(\frac{\sum_{i=p}^n X_i \cdot S_i}{\sum_{i=p}^n S_i} \right)} \right] * 100 \quad (4)$$

Em que:

CUD: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição, %;

p = Primeiro elemento da série crescente da lâmina coletada;

q = Elemento da série crescente correspondente à soma de ¼ da área total.

O Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE), foi proposto por Wilcox e Swailes (1947) quando utilizaram como medida de dispersão o desvio-padrão, para o qual foi aceito valores de acima de 75%, conforme a equação 5.

$$CUE = 100 * \left(1 - \frac{Sd}{\bar{X}} \right) \quad (5)$$

Em que:

CUE: Coeficiente de Uniformidade Estatístico, %;

Sd = Desvio padrão dos volumes coletados, mm;

\bar{X} = Lâmina média de todas as observações, mm.

O pesquisador Hart (1961) assim como Wilcox e Swailes (1947), propôs o Coeficiente de Uniformidade de Hart (CUH), que utiliza o desvio padrão, embora considere que todas as lâminas apresentem distribuição normal, conforme equação 6.

$$CUH = 100 * \left(1 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} * \frac{Sd}{\bar{X}} \right) \quad (6)$$

Em que:

CUH = Coeficiente de Uniformidade de Hart, %;

Sd = Desvio padrão dos volumes coletados, mm;

\bar{X} = Lâmina média de todas as observações, mm.

A Lâmina Média Coletada pondera (L_p) foi calculada pela equação 7.

$$L_p = \frac{\sum_{i=1}^n (L_i \cdot S_i)}{\sum_{i=1}^n (S_i)} \quad (7)$$

Em que:

L_p = lâmina média coletada ponderada, em mm;

L_i = lâmina coletada nos coletores, em mm;

S_i = distância do centro de rotação do pivô ao coletor, em m.

Merriam et al. (1973) propuseram uma equação a qual determina a eficiência de aplicação, conforme a equação 8.

$$E_a = \frac{L_{arm}}{L_{apl}} * 100 \quad (8)$$

Em que:

E_a = Eficiência de aplicação, em %;

L_{arm} = Lâmina de água armazenada na zona radicular, em mm;

L_{apl} = Lâmina aplicada, em mm.

Como fonte de dado para determinação da eficiência de aplicação, foi necessário encontrar a lâmina aplicada (L_{apl}) que pode ser calculada pela equação 9.

$$L_{apl} = \frac{1000 * Q * n_t * T}{A} \quad (9)$$

Em que:

L_{apl} = Lâmina aplicada, em mm;

Q = Vazão do sistema, em $m^3 h^{-1}$;

n_t = Número de revoluções;

T = Tempo de cada revolução, em h;

A = Área irrigada, em m^2

Enquanto a lâmina que é armazenada em uma fração do solo, que também complementa a equação de E_a , pode ser determinada por meio da equação 10.

$$L_{arm} = Z * U_v \quad (10)$$

Em que:

L_{arm} = Lâmina armazenada, em cm;

Z = Profundidade do sistema, em cm;

U_v = Umidade à base de volume

Para se determinar a lâmina que é armazenada no solo também foi necessário determinar a umidade a base de volume que foi calculada através da equação 11.

$$U_v = U_g * D_g \quad (11)$$

Em que:

U_v = Umidade à base de volume;

U_g = Umidade à base de massa seca, em g de água.g⁻¹ de sólido;

D_g = Massa específica global do solo, em g.cm⁻³.

Como requisito para a determinação da umidade à base de volume, deve-se determinar a umidade a base seca, que pode ser encontrada pela equação 12, e massa específica global do solo que pode ser determinado pela equação 13.

$$U_g = \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \quad (12)$$

Em que:

U_g = Umidade à base de solo seco;

M_{su} = Massa de solo úmido, em g;

M_{ss} = Massa de solo seco, em g.

$$D_g = \frac{M_s}{V_t} \quad (13)$$

Em que:

D_g = Massa específica global do solo, em g.cm⁻³ ;

M_s = Massa dos sólidos, em g;

V_t = Volume total do solo, em cm^3 .

3.5 Classificação do Sistema conforme os parâmetros de desempenho

Após a análise estatística dos dados coletados, o pivô central foi classificado conforme a classificação proposta por Mantovani (2001) e por de Bralts (1986), conforme as Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 - Interpretação dos valores de CUC, CUD e CUE, de acordo com a classificação proposta por Mantovani (2001).

| Classificação | CUC (%) | CUD (%) | CUE (%) |
|---------------|---------|---------|----------|
| Excelente | > 90 | > 84 | 90 – 100 |
| Bom | 80 – 90 | 68 – 84 | 80 – 90 |
| Razoável | 70 – 80 | 52 – 68 | 70 – 80 |
| Ruim | 60 – 70 | 36 – 52 | 60 - 70 |
| Inaceitável | < 60 | < 36 | < 60 |

Fonte: Adaptado de Mantovani (2001).

Tabela 3 - Interpretação dos valores de CUH de acordo com a classificação proposta por Bralts (1986).

| Classificação | CUH (%) |
|---------------|---------|
| Excelente | > 90 |
| Bom | 80 – 90 |
| Regular | 70 – 80 |
| Ruim | < 70 |

Fonte: Adaptado de Bralts (1986).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do solo e das condições climáticas

Após a análise dos parâmetros físicos do solo, cada amostra foi classificada segundo a literatura proposta, onde as amostras dos pontos 1 e 2 foram identificadas como “Franco Arenosa”, enquanto a amostra do ponto 3 é classificada como “Areia Franca”, conforme a Tabela 4.

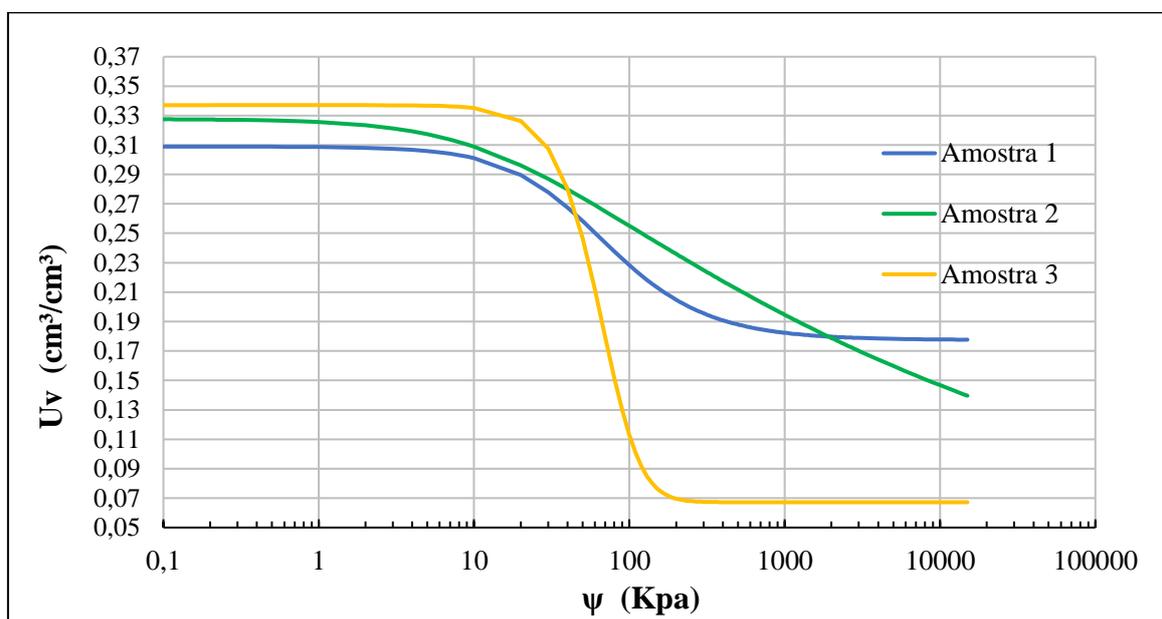
Tabela 4 - Caracterização do solo amostrado durante o ensaio.

| Amostragem | 1 | 2 | 3 |
|------------|----------------|----------------|--------------|
| Areia | 56,94% | 54,72% | 74,87% |
| Argila | 15,78% | 13,11% | 11,38% |
| Silte | 27,28% | 32,18% | 13,75% |
| Textura | Franco arenoso | Franco arenoso | Areia Franca |
| Por. Total | 30,89% | 32,77% | 33,71% |
| Micro | 26,18% | 27,92% | 21,24% |
| Macro | 4,71% | 4,85% | 12,47% |
| CC | 27,80% | 28,70% | 30,76% |
| PMP | 18,06% | 18,52% | 6,72% |

Essa diferença Expressiva de textura ocorre devido ao solo da amostragem 3 possuir maior teor de areia e menor teor de silte, que as demais amostras. Fator que também influencia na porosidade do solo, uma vez que a Amostra 3 possui agregados de maior diâmetro aumentando assim o volume de macro poros reduzindo o volume de micro poros na solução do solo.

Para a melhor visualização do comportamento solo estudado para as diferentes taxas de umidade, foi elaborada a curva característica de retenção de água de cada um dos pontos amostrados durante o experimento, conforme a figura 10, que apresenta o gráfico de umidade volumétrica (cm^3/cm^3) por potencial de tensão (Kpa).

Figura 10 - Curvas características de retenção das amostras de solo, com parâmetros ajustados com o modelo de Van Genuchten (1980)



O ensaio de uniformidade de distribuição de lâmina aplicada foi realizado no dia 3 de dezembro de 2021, para avaliar o desempenho do sistema de irrigação por pivô central, através dos coeficientes de uniformidade e eficiência de irrigação. Desse modo, foi necessário caracterizar as condições climáticas no momento do experimento, para isso foram obtidos os dados de estações meteorológicas automáticas do INMET. Embora São Francisco de Assis - RS não apresente uma estação para análise, 3 locais próximos foram consultados para realizar a triangulação da região, onde pode-se realizar as médias de temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento, que estão apresentadas na Tabela 5. Além disso, a evaporação média do local durante o ensaio foi de 5,65ml de água que é equivalente ao volume de 1,12mm.

Tabela 5 - Dados referentes as condições climáticas no dia do ensaio.

| Data: 03/12/2021 | Temp. (°C) | UR (%) | vento (m/s) |
|-------------------------|---------------|---------------|--------------|
| São Vicente do sul - RS | 21,979 | 61,708 | 5,433 |
| Alegrete - RS | 22,442 | 59,125 | 2,646 |
| Santiago - RS | 22,234 | 60,254 | 4,558 |
| Média | 22,218 | 60,362 | 4,212 |

4.2 Análise das lâminas aplicadas e dos coeficientes de uniformidade

É importante ressaltar que os dados referentes a lâmina que foi aplicado durante o experimento são imprescindíveis para uma avaliação rigorosa do sistema de irrigação, uma vez

que essa lâmina foi utilizada para determinar a eficiência aplicação. Diante disso, a tabela 6 detêm os dados referentes as lâminas média e média ponderada, que foram corrigidas com o volume equivalente a evaporação no local do ensaio.

Tabela 6 - Lâminas de água avaliadas durante o experimento.

| Lâmina | Coletada (mm) | Corrigida (mm) |
|---------------|----------------------|-----------------------|
| Média | 6,35 | 7,47 |
| Ponderada | 6,13 | 7,25 |
| Aplicada | 8,00 mm | |

A fim de quantificar o coeficiente de variação entre as lâminas que foram coletadas durante o experimento, foi realizada análise estatística da lâmina coletada de cada um dos segmentos do pivô central, que está representada no Apêndice A, onde obteve-se um total de 120 observações, com média geral das lâminas é 7,472mm e coeficiente de variação de 16,49%.

Como há evidências das médias apresentarem diferença estatística foi necessário realizar o teste de Tukey, a nível de 5% de significância, para identificar as diferenças entre volumes coletados de cada segmento do pivô central. O resultado do teste, portanto, pode ser visualizado na tabela 7, a qual apresenta todos os segmentos do pivô central organizados de forma ordenada por segmento do pivô.

Tabela 7 - Análise estatística para as precipitações de cada segmento do pivô.

| Segmento | Média |
|-----------------|--------------|
| 1 | 5,712 a |
| 2 | 6,497 ab |
| 3 | 6,308 ab |
| 4 | 6,310 ab |
| 5 | 8,340 bc |
| 6 | 8,710 c |
| 7 | 8,153 bc |
| 8 | 7,810 abc |
| 9 | 8,925 c |
| 10 | 7,534 abc |
| 11 | 7,524 abc |
| 12 | 7,998 bc |
| 13 | 7,645 abc |
| 14 | 7,670 abc |
| 15 | 5,727 a |

O teste de Tukey para significância de 5%, na tabela 7, evidenciou diferenças significativas entre os segmentos do pivô central, uma vez que as torres 1 e 15 obtiveram as menores observações, seguido das torres 2, 3 e 4 que tiveram médias maiores com pouca diferença significava quando comparadas as primeiras. Embora os segmentos 8, 10, 11, 13 e 14 não tenham diferido entre si, obtiveram médias ligeiramente superiores as demais já mencionadas. Já as torres 5, 7 e 12 apresentam médias maiores quando comparadas as demais, ficando atrás, somente, das torres 6 e 9 que diferiram superiormente das outras médias do ensaio.

A partir dos volumes de água coletados em cada um dos pluviômetros e sua respectiva distância até o ponto pivô do sistema, pode-se mensurar os coeficientes de uniformidade de distribuição. Nesse sentido, o CUC, elaborado por Christiansen (1942), chegou a 91,71%, que é o valor mais elevado dos coeficientes avaliados, podendo ser classificado como “Excelente”, devido a sua distribuição considerar que todos os coletores possuem a mesma representatividade, desprezando a zona de influência distinta de cada aspersor. Enquanto o CUCH proposto por Heermann e Hein (1968) obteve o valor 86,09%, que foi classificado como “Bom”. Embora O CUCH se assemelhe com Coeficiente proposto por Christiansen, aquele utiliza como base de cálculo a distância ponderada de volume coletado de cada aspersor, proporcionando uma avaliação com dados mais próximos da realidade no sistema de irrigação por pivô central. Além disso, o CUD modificado por Kruse (1978), para atender as condições de pivôs centrais, chegou a 82,34% e foi classificado com o índice “Bom”. Dessa forma, os dados tabelados referentes aos coeficientes analisados no experimento podem ser visualizados em ordem decrescente na tabela 08.

Tabela 8 - Classificação dos coeficientes de uniformidade de acordo com a Mantovani (2001), e Bralts (1986).

| Coeficiente de Uniformidade | Valor obtido (%) | Classificação |
|------------------------------------|-------------------------|----------------------|
| CUC | 91,71 | EXCELENTE |
| CUCH | 86,09 | BOM |
| CUD | 82,34 | BOM |
| CUH | 80,93 | BOM |
| CUE | 80,11 | BOM |

Na literatura, diversos trabalhos evidenciam que o CUC apresenta maior valor de uniformidade quando comparado com o CUD, nesse sentido Costa, 2006 e Rezende et al., 1998

também reafirmam esse argumento. O fato do CUD, normalmente, ser menor que o CUC deve-se as variáveis utilizadas na equação de determinação do CUD que realiza uma razão entre 25% das menores lâminas e a média total das lâminas coletadas (REZENDE et al., 1998).

Os parâmetros de uniformidade aceitáveis do CUC e CUD para culturas de alto valor econômico, que apresentam sistemas radiculares rasos, respectivamente, devem ser de superiores a 85% e 80%, segundo Merriam & Keller (1978). Dessa forma, os valores encontrados no ensaio estão dentro do padrão proposto pelos autores, que indicam uma boa uniformidade de irrigação na área de estudo.

Embora a irrigação por aspersão seja o método mais eficiente para distribuição de água em superfície, tem como principal desvantagem a influência das condições climáticas na uniformidade de aplicação, tendo em vista que a velocidade do vento é responsável 96,6% dos desvios na EA provocados por ações climáticas, como já citado por Pinto et al. (2006). Além disso, Azevedo et al. (2000) ao avaliarem a variação do CUC com a velocidade do vento puderam verificar que as médias de CUC igual ou superior a 70% só ocorreram para velocidade de vento inferior a 3,3 m/s. Dessa forma, como os índices de uniformidade alcançados são satisfatórios, estima-se que a velocidade do vento no local do experimento estava abaixo o valor mencionado pelo autor.

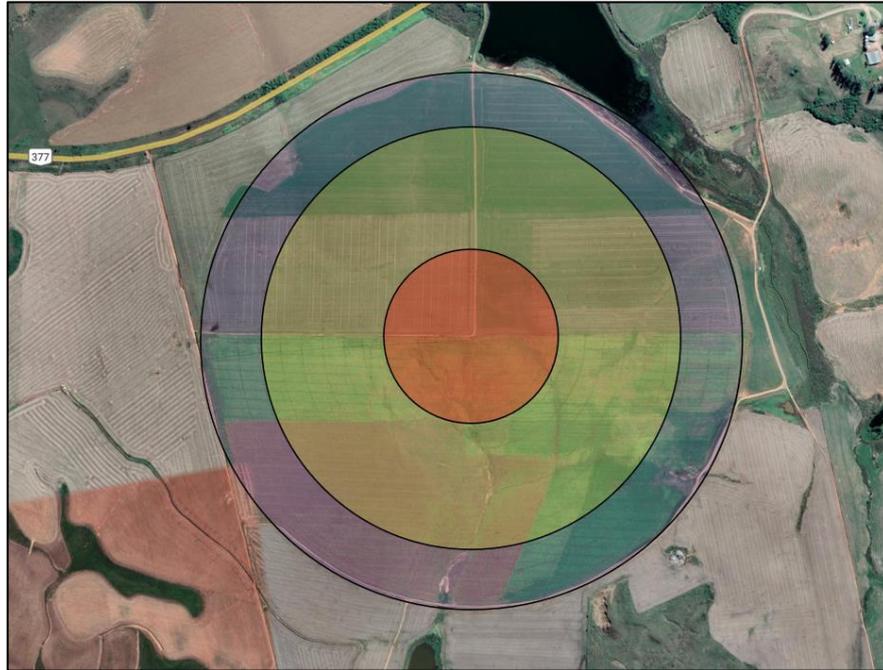
O CUH e o CUE obtiveram médias semelhantes com valores respectivos de 80,93% e 80,11%, sendo classificados segunda a literatura como “Bom”, tendo em vista que ambos utilizam como medida de dispersão o desvio padrão, diferindo-se entre si apenas pelo fato de o CUE desprezar 25% das menores observações. Outro fator relevante é que o CUC apresentou média superior de aproximadamente 5,9% quando comparado as equações que utilizam o desvio padrão. Nesse sentido, Cunha et al., (2013) ao analisarem coeficientes de uniformidade em pivôs centrais em Goiás também verificaram que o CUH e CUE ficaram com valores consideravelmente baixos, quando comparados com o CUC, indicando a lâmina aplicada ao longo da linha lateral do pivô não apresenta distribuição normal.

4.3 Análise da uniformidade de distribuição de água

Como o pivô estudado apresenta uma grade extensão, sua linha lateral foi dividida em 3 segmentos, que facilitam a observação de maneira individualizada dos parâmetros avaliados. Dessa maneira o primeiro segmento é composto pelos 4 primeiros lances que totalizam um comprimento de 192m; o segundo segmento é composto do 5º lance até o 11º lance, medindo 360m, por fim o terceiro segmento, que mede 168m, é formado pelos lances, 12, 13, balanço (14) e o canhão (15). Aliado a isso, a área de representatividade de cada faixa de observação

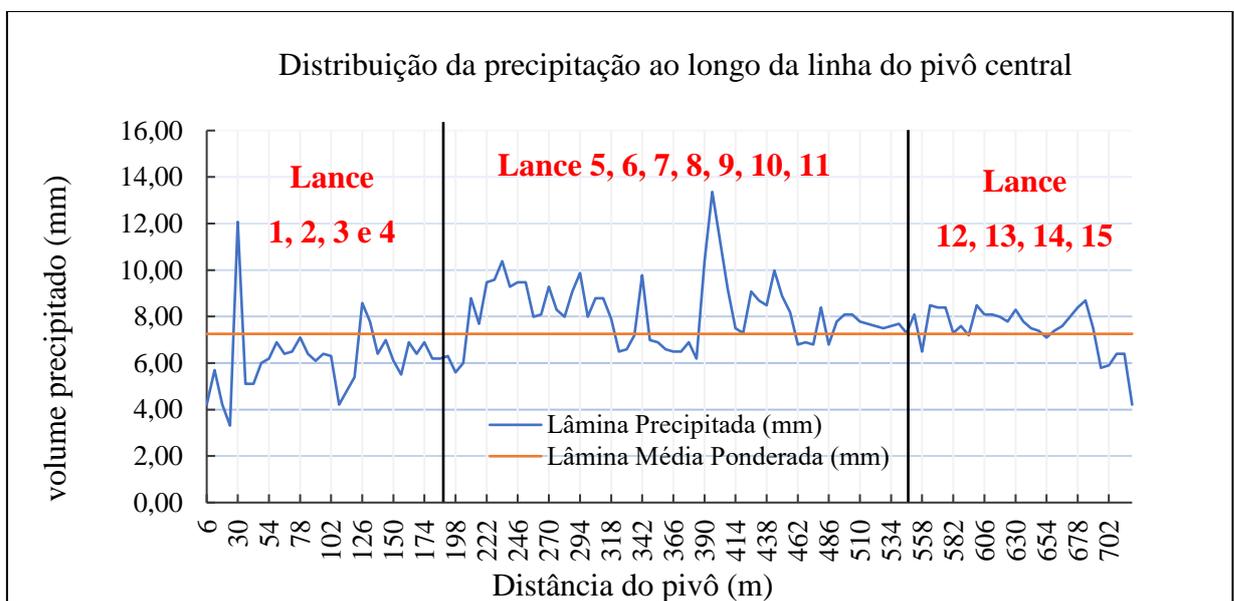
está disposta na Figura 11, onde as zonas coloridas em vermelho, amarelo e roxo, representam respectivamente os segmentos 1, 2 e 3.

Figura 11 - Zonas de representatividade de cada segmento destinado à avaliação dos parâmetros de desempenho. Fonte: Google Earth Pro.



A comparação entre a distribuição da precipitação ao longo da linha lateral do pivô para a lâmina de água coletada e lâmina média ponderada está representada na Figura 12. Ainda convém lembrar que o gráfico da figura 12 também é dividido entre 3 segmentos, os quais foram determinados anteriormente na Figura 11

Figura 12 - Gráfico de Distribuição da precipitação ao longo da linha do pivô central



No primeiro segmento encontram-se as médias mais baixa do ensaio, com apenas um ponto de coleta com precipitação de 12mm. No momento da realização do ensaio foi verificado que na primeira torre havia um aspersor preso a estrutura de sustentação pivô (Figura 13), provavelmente por influência do vento, acarretando um mal funcionamento do aspersor, que é o principal elemento do sistema de irrigação, segundo Biscaro (2009), o autor ainda reforça que a sobreposição dos jatos do aspersor é fundamental para uma boa uniformidade da lâmina.

Aliado a isso, Bernardo et al. (2008) descreve que os aspersores irrigam uma área circular que varia conforme o diâmetro do bocal, e a sobreposição de jato é necessária para que haja uma boa eficiência de aplicação. Dessa maneira, quando o aspersor ficou posicionado de maneira inclinada, ocorreu um desvio na área circular de aplicação, reduzindo a sobreposição das lâminas vizinhas, e causando uma maior intensidade de aplicação em uma faixa menor de área, indicada pelo volume excessivo em um único ponto de coleta.

Figura 13 - Imagem do aspersor deslocado na 1ª torre que provocou desvios na uniformidade de aplicação no local. Fonte: MARQUES (2022).



Ainda convém lembrar que entre a distância de 100 e 110m há uma região com deficiência de aplicação quando comparada as demais áreas do primeiro segmento. Esse déficit ocorreu devido ao mal funcionamento de um aspersor, ao qual se encontrava com a saída de água obstruída (Figura 14), uma vez que não realizava a rotação necessária para distribuição de água.

Figura 14 - Imagem do aspersor danificado, por apresentar dificuldade de rotação e pouca pulverização de água. Fonte: MARQUES (2022).



O segundo segmento do gráfico foi o que apresentou maiores médias de aplicação quando comparado aos demais, sendo que também é importante ressaltar que houve pontos de coleta que sofreram desvios por deslocamento do aspersor, caso semelhante ao do primeiro setor. Nesse sentido entre as torres 7 e 8, mais especificamente na faixa de 390 a 400m, não só há uma grande variação na lâmina coleta chegando a aproximadamente 13mm, mas também há uma deficiência de aplicação das lâminas vizinhas evidenciando um excesso de sobreposição naquele ponto, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Imagem do aspersor deslocado devido a ação do vento da faixa de distância de 390 a 400m. Fonte: MARQUES (2022).



Além disso, no trecho de distância de 355 a 375m, havia dois aspersores irregulares (Figura 16) ocasionando um vale na curva do gráfico naquele local. onde o primeiro encontrava sem o contrapeso na extremidade do componente, acarretando a movimentação excessiva do aspersor durante a movimentação do equipamento, e o segundo estava deslocado de sua posição inicial, sendo que nesse caso não houve desvio aparente no ângulo de ação do bico difusor, ficando apenas em uma posição mais elevada que os demais, favorecendo a influência por ação do vento. Os dois aspersores, portanto, ficaram mais suscetíveis à deriva das partículas de água, acarretando um menor índice pluviométrico na respectiva faixa de ação.

Figura 16 - Imagem dos aspersores funcionando de maneira irregular, sendo o da direita o danificado, e o da esquerda o deslocado. Fonte: MARQUES (2022).



Embora o terceiro segmento corresponda a área mais afastado do pivô central apenas um desvio significativo foi encontrado no gráfico de uniformidade, onde pode-se perceber um pico de elevada precipitação na faixa de 675 a 685m, onde há uma mangueira, que conecta o aspersor a tubulação, furada (Figura 17).

Figura 17 - Imagem da mangueira fura com vazamento no segmento de balanço do pivô. Fonte: MARQUES (2022).



A seguir estão representados os gráficos de uniformidade de distribuição de precipitação para cada torre do primeiro segmento do sistema de irrigação, de modo que as torres 1, 2, 3 e 4 são respectivamente representadas pelas Figuras 18, 19, 20 e 21.

Figura 18 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 1ª torre.

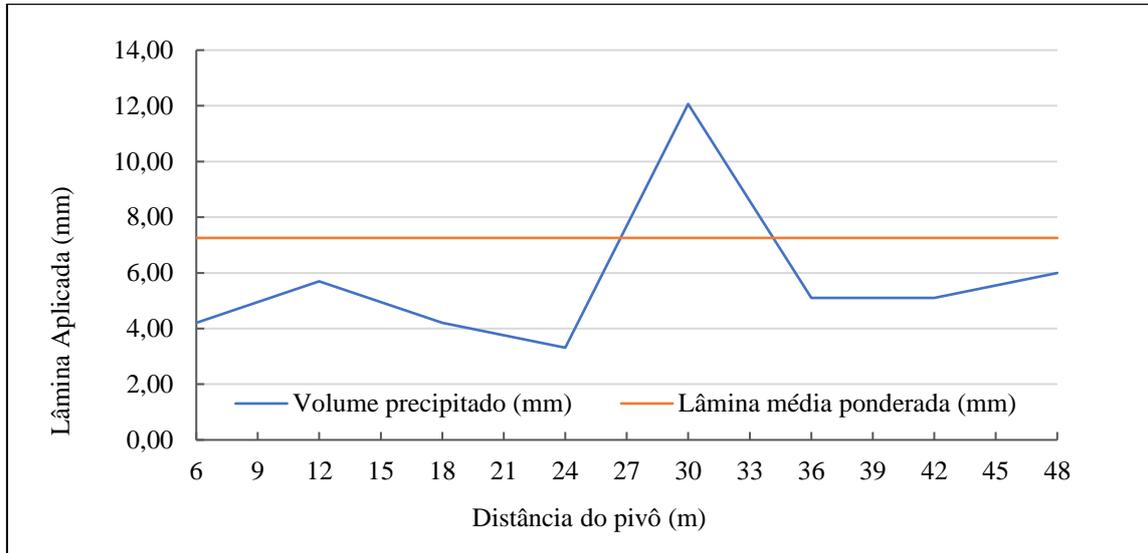


Figura 19 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 2ª torre.

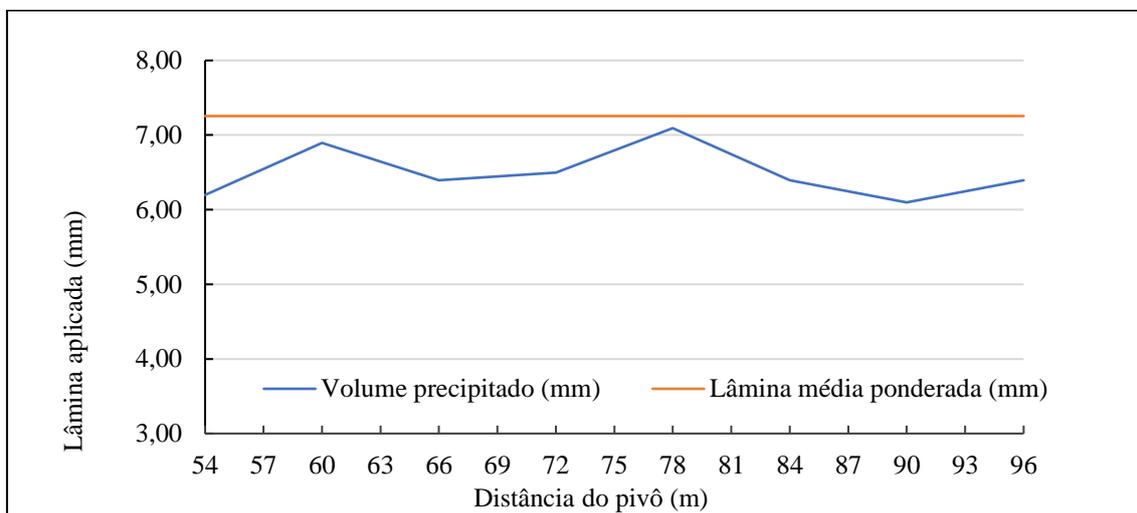


Figura 20 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 3ª torre.

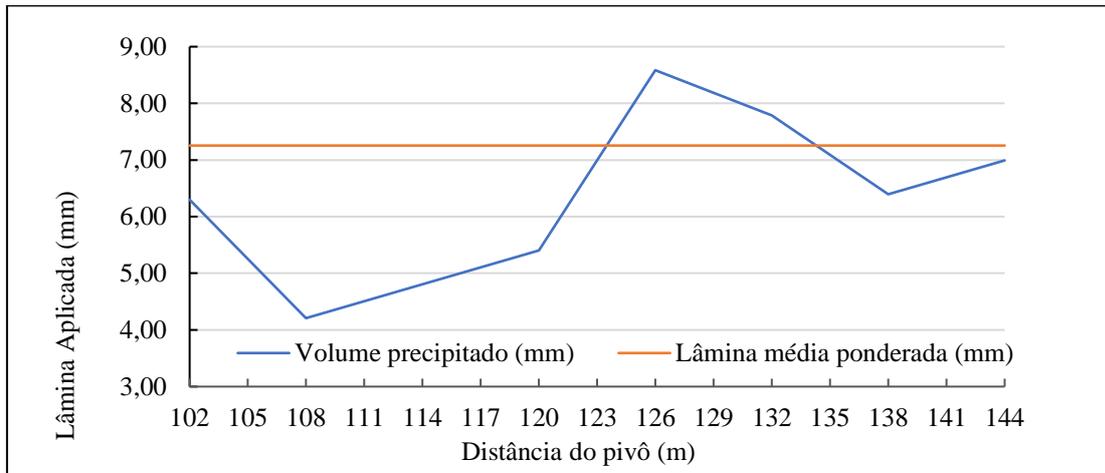
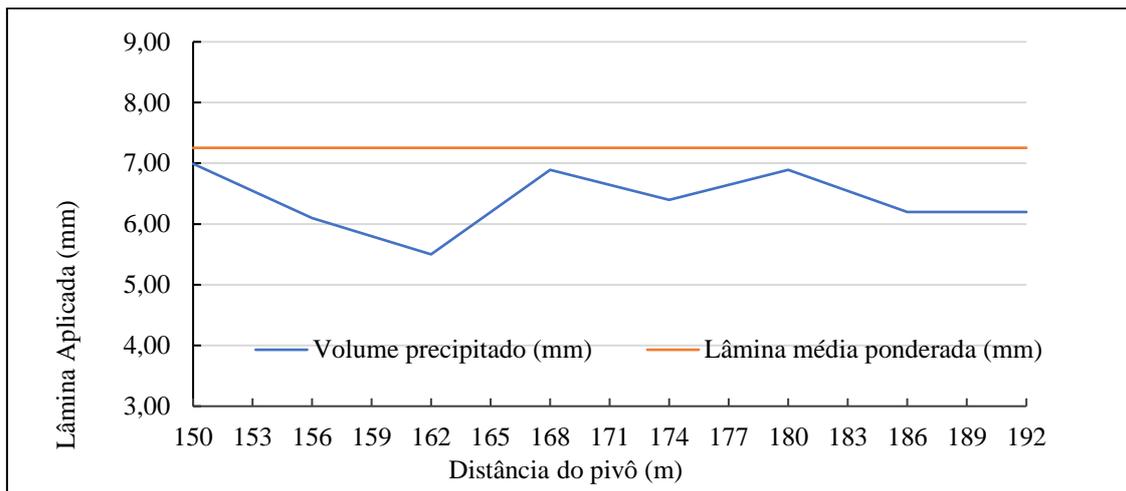


Figura 21 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 4ª torre.



A seguir estão representados os gráficos de uniformidade de distribuição de precipitação para cada torre do segundo segmento do sistema de irrigação, de modo que as torres 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 são respectivamente representadas pelas figuras 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28.

Figura 22 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 6° torre.

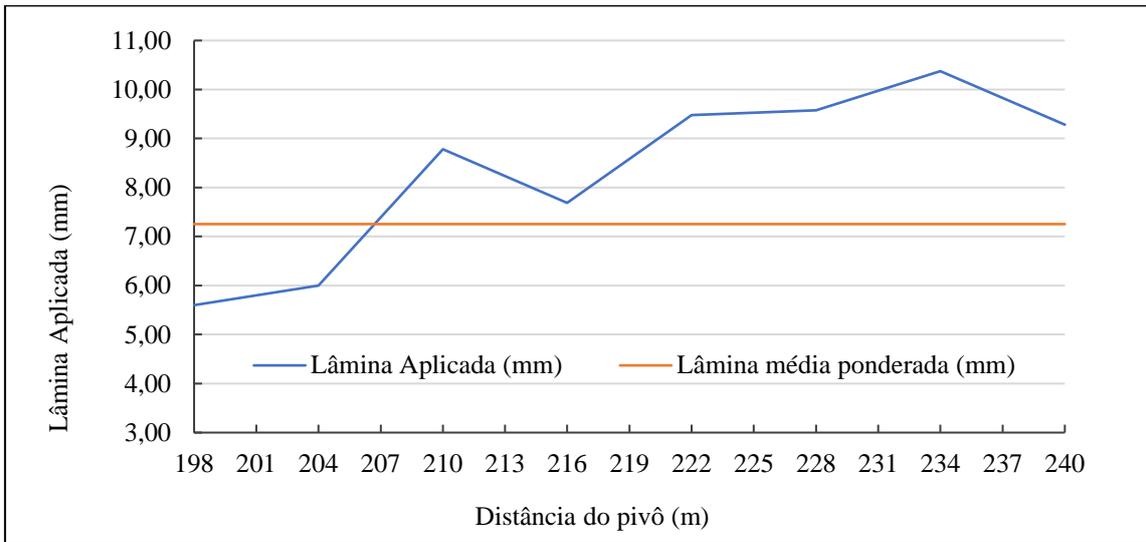


Figura 23 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 7ª torre.

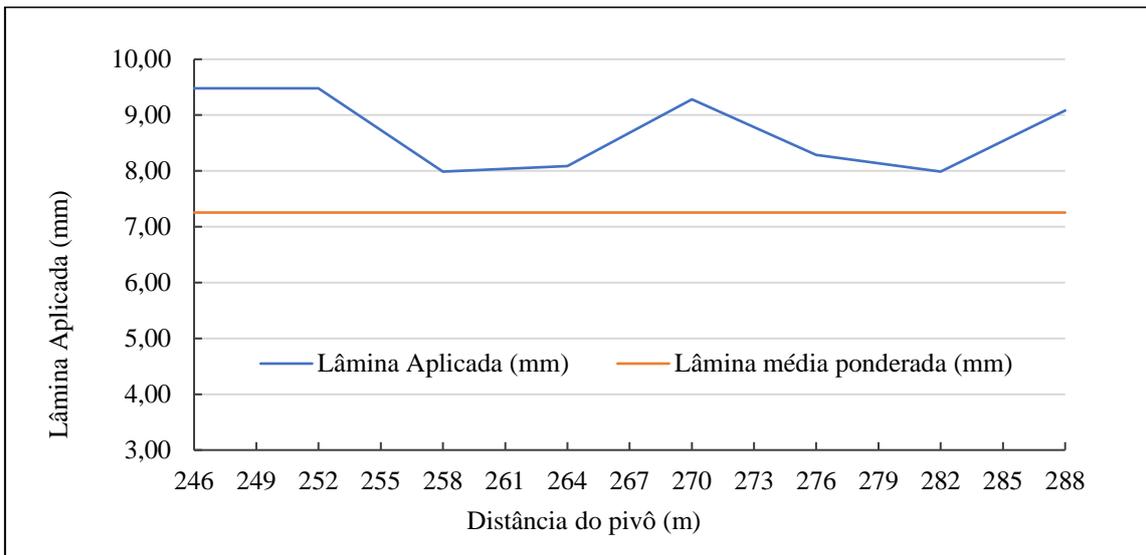


Figura 24 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 7ª torre.

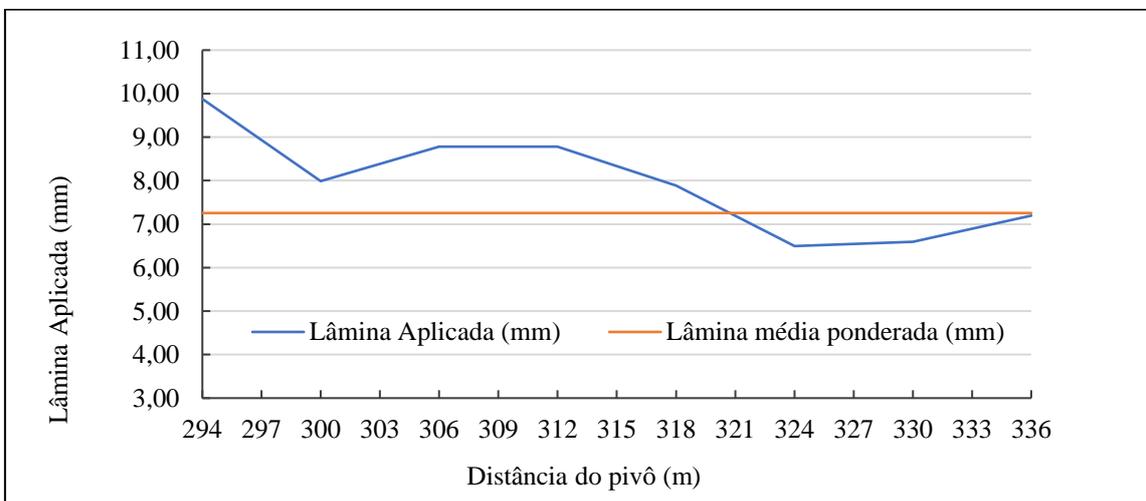


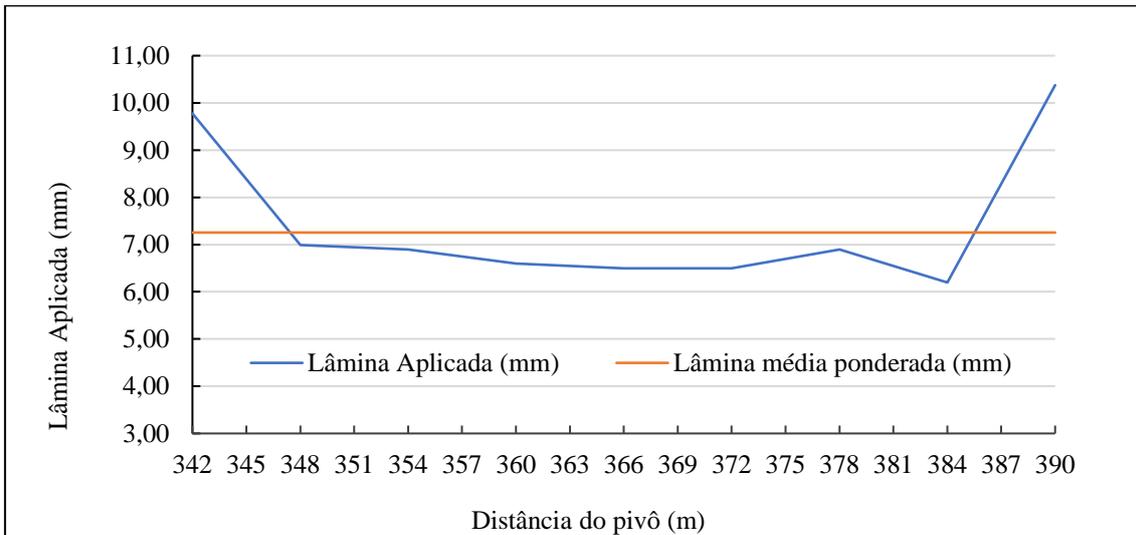
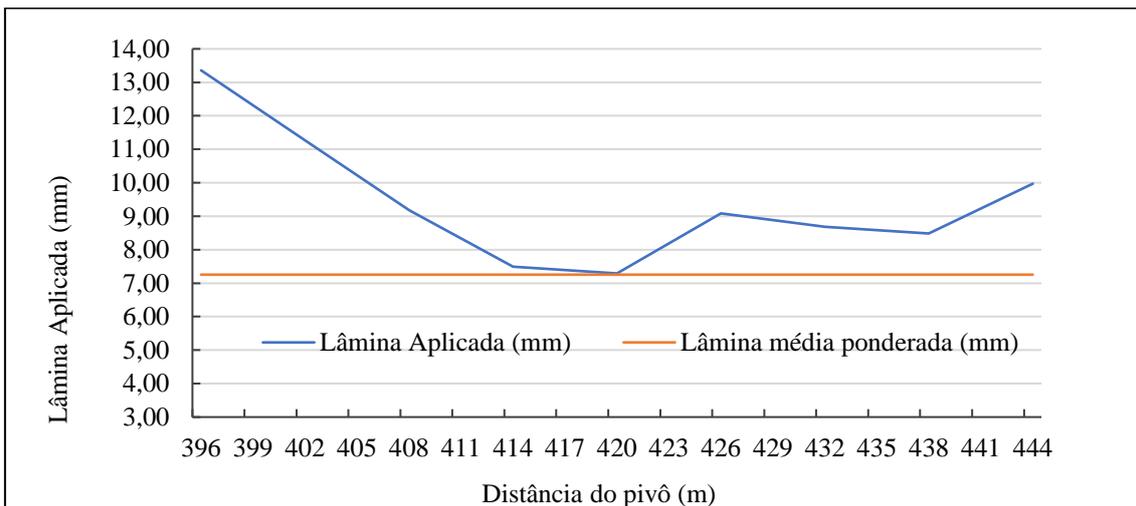
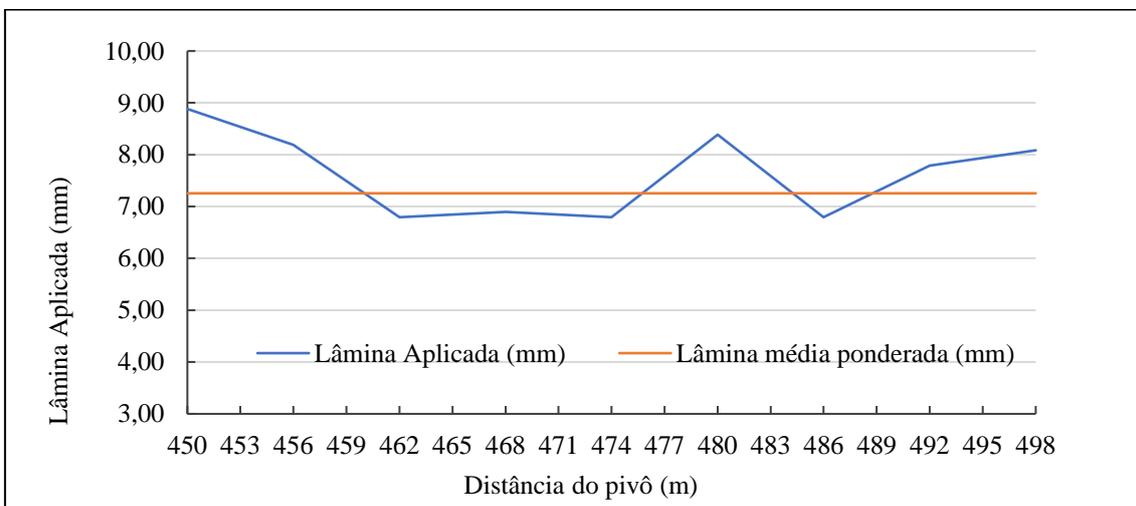
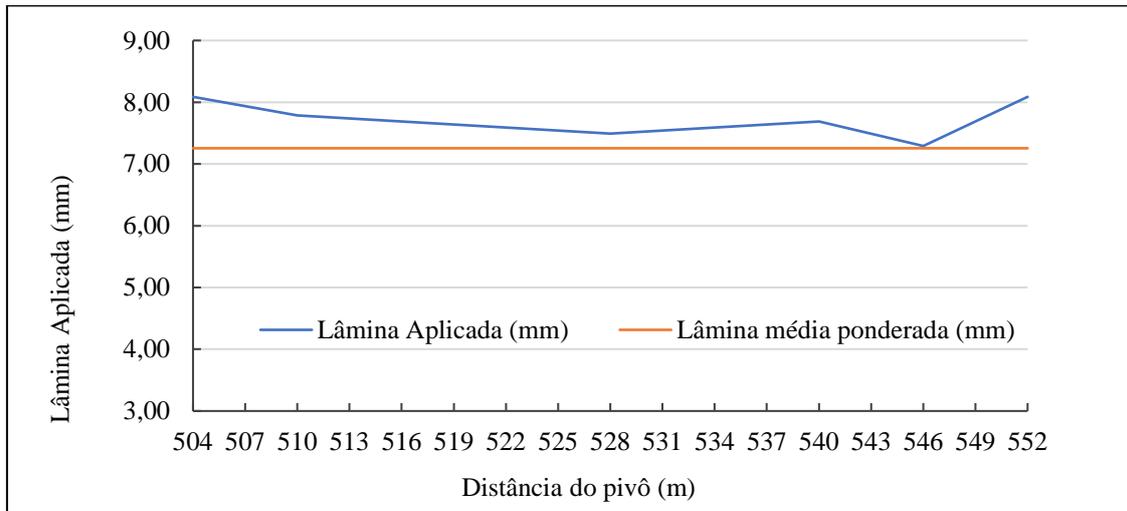
Figura 25 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 8° torre.**Figura 26** - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 9° torre.**Figura 27** - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 10° torre.

Figura 28 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 11° torre.



A seguir estão representados os gráficos de uniformidade de distribuição de precipitação para cada torre do terceiro segmento do sistema de irrigação, de modo que as torres 12, 13, balanço (14) e o canhão hidráulico (15) são respectivamente representadas pelas figuras 29, 30, 31 e 32.

Figura 29 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 12ª torre.

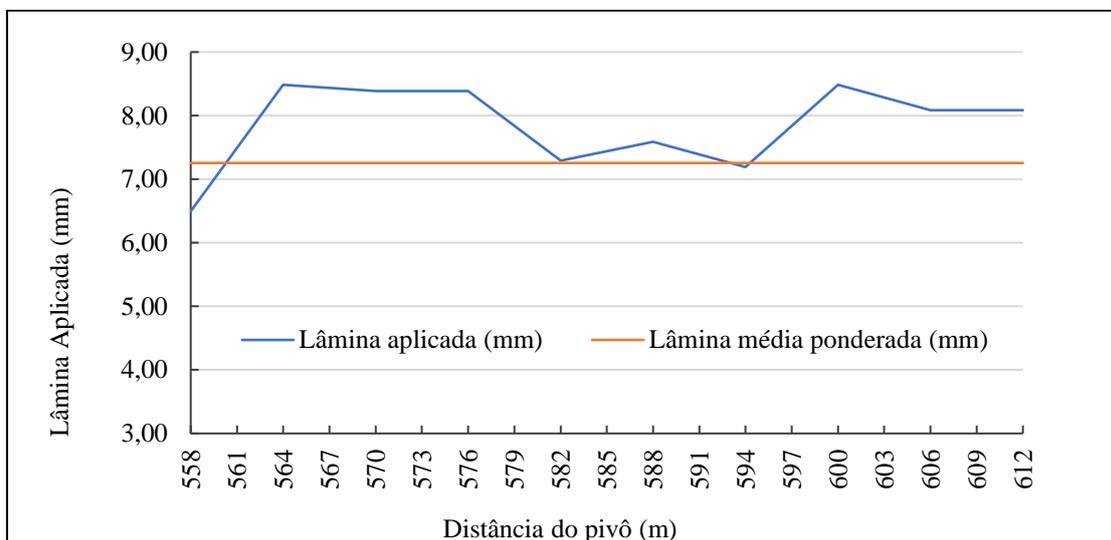


Figura 30 - Gráfico de uniformidade de aplicação para a 13° torre.

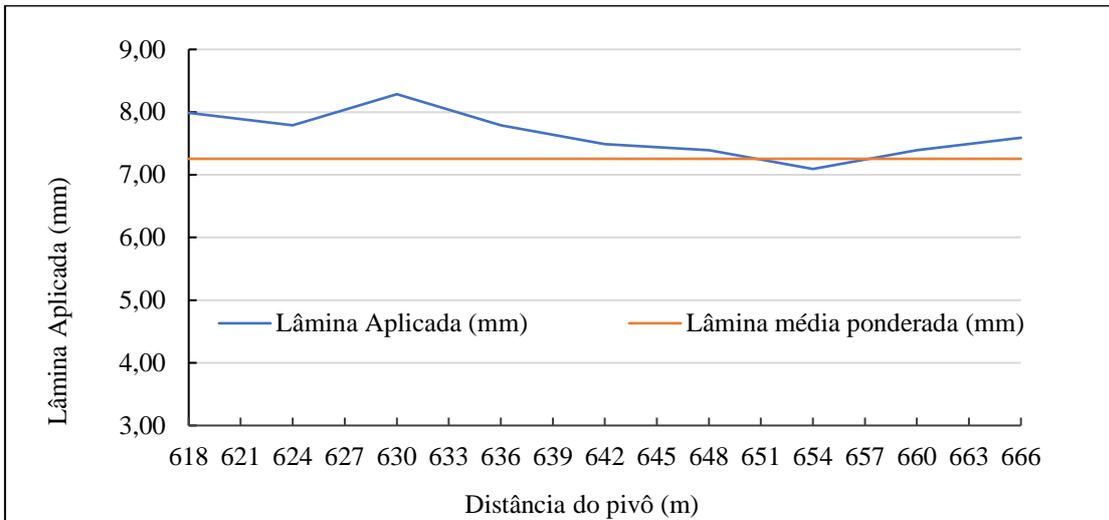


Figura 31 - Gráfico de uniformidade de aplicação para o segmento do balanço.

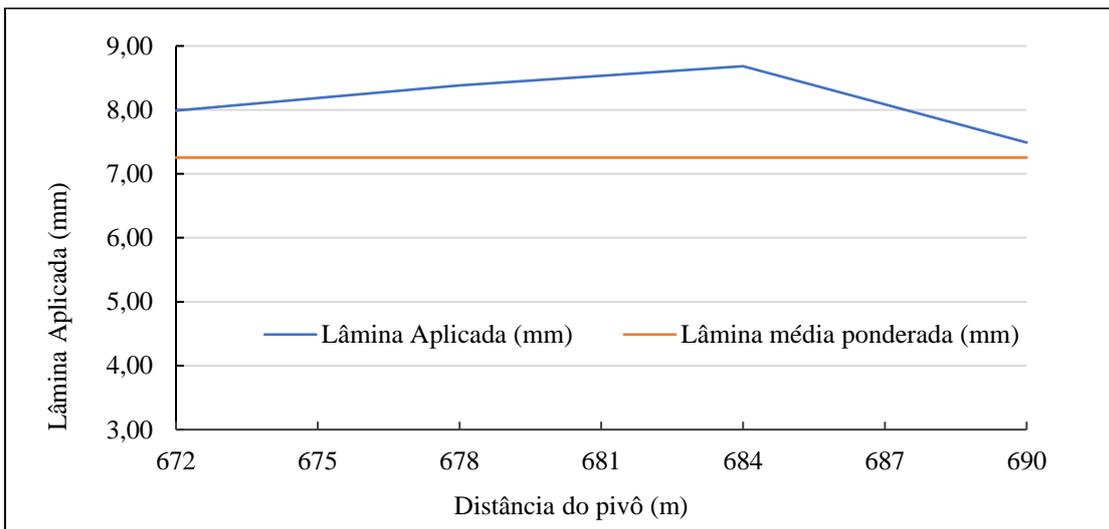
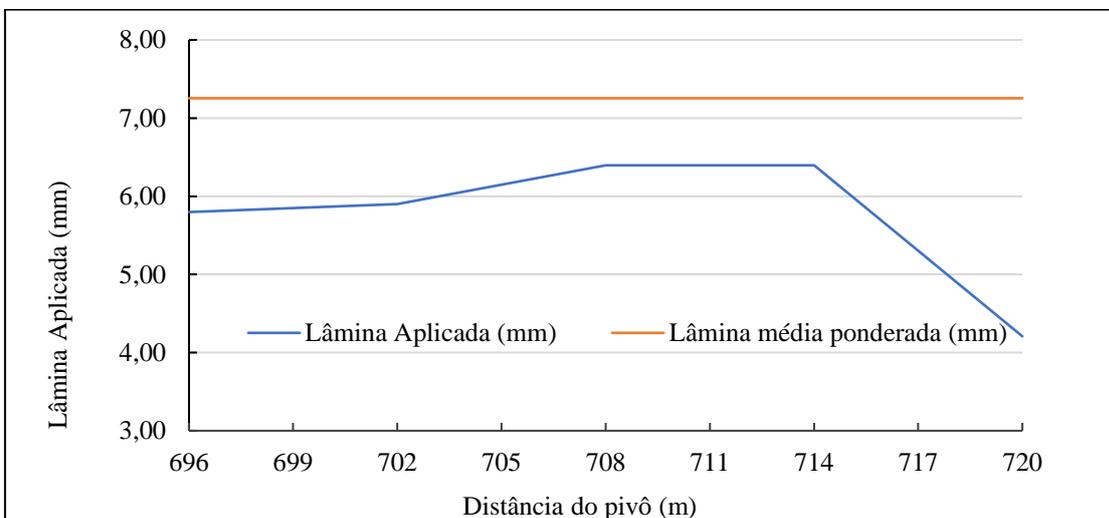


Figura 32 - Gráfico de uniformidade de aplicação para o canhão hidráulico.



4.4 Análise das lâminas de água armazenadas no solo

Schons (2006), ao avaliar o desempenho de sistemas de irrigação, menciona que índice de uniformidade analisa a o desempenho do equipamento na tarefa de distribuir água em uma área determinada, enquanto os índices de desempenho indicam o grau de comprimento da meta planejada de irrigação.

A análise dos coeficientes de uniformidade, segundo Frizzone e Neto (2003), possibilita uma melhor visualização da distribuição de água, evitando que assim que ocorram excessos em determinadas áreas e déficit hídrico em outras. Os autores ainda comentam que o ensaio é um levantamento de dados necessário quantificar a eficiência de aplicação do sistema, uma vez facilitam a tomada de decisão para correção de eventuais falhas de operação.

No sistema de cultivo intensivo, onde os equipamentos de irrigação são usados com maior frequência, durante vários anos consecutivos, há um desgaste prematuro do equipamento. Dessa forma é necessário que esses sistemas de irrigação sejam, frequentemente, avaliados, a fim de determinar as condições de usabilidade, Segundo SILVA, et. al., (1997), que também descrevem que os sistemas que apresentam baixa uniformidade de aplicação necessitam de lâminas maiores, para garantir a quantidade de água necessária para as plantas.

Nesse sentido, a variação dos coeficientes de uniformidade ao longo da linha lateral do pivô pode ter influenciado na eficiência de aplicação do sistema.

Para uma análise quantitativa foi elabora a Tabela 9, cuja finalidade é demonstrar os parâmetros de cálculo para a obtenção das lâminas que armazenadas no solo antes e depois da irrigação, sendo eles a densidade do solo (g/cm^3), umidade gravimétrica (g/g) e umidade volumétrica (g/cm^3).

Tabela 9 - Lâminas armazenadas (mm), antes e após a irrigação do local para 3 pontos de amostragem.

| Prof. (cm) | Lâmina Armazenada antes da Irrigação (mm) | | | | Lâmina Armazenada depois da Irrigação (mm) | | | |
|------------|---|-------------|-------------|-------------|--|-------------|-------------|--------|
| | Dg (g/cm ³) | Ug (g/g) | Uv (g/g) | Lâm (mm) | Ug (g/g) | Uv (g/g) | Lâm (mm) | |
| 1° Amostra | 0 - 10 | | | | | | | |
| | Média | 1,721 | 0,122 | 0,210 | 21,031 | 0,140 | 0,244 | 24,437 |
| | Des. Pad. | 0,077 | 0,001 | 0,011 | 1,094 | 0,003 | 0,003 | 0,289 |
| | 10 - 20 | | | | | | | |
| | Média | 1,731 | 0,126 | 0,218 | 21,847 | 0,125 | 0,233 | 23,269 |
| | Des. Pad. | 0,013 | 0,001 | 0,001 | 0,052 | 0,002 | 0,037 | 3,659 |
| 2° Amostra | 0 - 10 | | | | | | | |
| | Média | 1,662 | 0,138 | 0,229 | 22,881 | 0,145 | 0,254 | 25,426 |
| | Des. Pad. | 0,033 | 0,004 | 0,001 | 0,144 | 0,013 | 0,011 | 1,055 |
| | 10 - 20 | | | | | | | |
| | Média | 1,677 | 0,132 | 0,222 | 22,157 | 0,153 | 0,248 | 24,758 |
| | Des. Pad. | 0,013 | 0,005 | 0,011 | 1,094 | 0,004 | 0,003 | 0,282 |
| 3° Amostra | 0 - 10 | | | | | | | |
| | Média | 1,611 | 0,069 | 0,111 | 11,067 | 0,089 | 0,146 | 14,596 |
| | Des. Pad. | 0,049 | 0,000 | 0,003 | 0,264 | 0,003 | 0,005 | 0,463 |
| | 10 - 20 | | | | | | | |
| | Média | 1,832 | 0,066 | 0,121 | 12,116 | 0,076 | 0,129 | 12,881 |
| | Des. Pad. | 0,101 | 0,001 | 0,005 | 0,460 | 0,005 | 0,012 | 1,193 |
| 3° Amostra | 20 - 30 | | | | | | | |
| | Média | 1,655 | 0,087 | 0,144 | 14,405 | 0,091 | 0,152 | 15,177 |
| | Des. Pad. | 0,027 | 0,005 | 0,006 | 0,585 | 0,002 | 0,000 | 0,004 |

A análise da variância das lâminas armazenadas está descrita no Apêndice B que apresentou um coeficiente de variação de 65,85% que embora seja considerada elevado, é justificado devido a estarmos trabalhando com amostras de solo, que podem apresentar, naturalmente, uma grande divergência de textura. Além disso Hohenbergue (2016) também encontrou valores elevados de CV que puderam ser considerados aceitáveis devido as perdas por evaporação, deriva e até influência do relevo.

O teste de Tukey a nível de 5% de significância foi realizado para comparar as diferentes camadas dos pontos amostrados, conforme a tabela 10. Nesse sentido pode-se perceber que a primeira camada (0 – 10 cm) foi a que obteve maior média diferindo das demais; enquanto a segunda camada (10 – 20 cm) apresentou média menor que a primeira camada, embora a diferença não tenha sido significativa; já a última camada (20 – 30 cm) foi a que apresentou menor média do ensaio. Ainda convém lembrar que a amostragem foi realizada 2 horas depois do ensaio, a fim que a lâmina aplicada pudesse se distribuir no perfil de solo que estava sendo avaliado, o que justifica a redução da lâmina armazenada com aumento da profundidade.

Tabela 10 - Análise estatística para as lâminas armazenadas nas diferentes camadas do solo.

| Camada do solo | Médias |
|----------------|----------|
| 0-10 cm | 3,162 a |
| 10-20 cm | 1,850 ab |
| 20-30 cm | 0,867 b |

4.5 Análise da Eficiência de Aplicação do sistema de irrigação

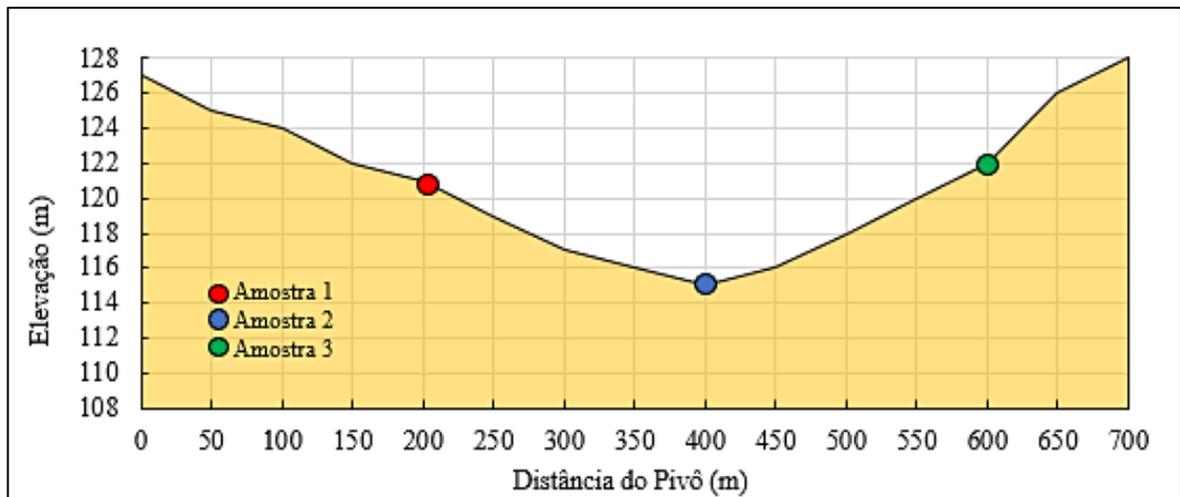
A Tabela 11 apresenta de forma resumida as lâminas armazenadas antes e depois da irrigação, para as diferentes camadas do solo, nos 3 pontos de amostragem; que possibilitam a análise da eficiência do sistema nos diferentes pontos de amostragem.

Tabela 11 - Lâminas armazenadas (mm), antes e após a irrigação, e a EA.

| Lâminas armazenadas no solo antes e depois da Irrigação | | | | |
|--|--------|---------------|---------------|---------------|
| Amostragem | | 1 | 2 | 3 |
| 0-10 cm | Antes | 21,031 | 22,881 | 11,067 |
| | Depois | 24,437 | 25,426 | 14,596 |
| | ≠ | 3,406 | 2,545 | 3,529 |
| 10-20 cm | Antes | 21,847 | 22,157 | 12,116 |
| | Depois | 23,269 | 24,758 | 12,881 |
| | ≠ | 1,422 | 2,601 | 0,764 |
| 20-30 cm | Antes | 21,706 | 23,195 | 14,405 |
| | Depois | 22,279 | 24,451 | 15,177 |
| | ≠ | 0,573 | 1,256 | 0,772 |
| Soma das ≠ | | 5,401 | 6,402 | 5,065 |
| Ea (%) para 8 mm | | 67,51% | 80,02% | 63,31% |

As amostras 1 e 3 foram as que obtiveram as menores EA, com respectivamente 67,51 e 63,31%, enquanto a mostra 2 chegou a EA de 80,02%. Embora as amostras 1 e 2 apresentem características semelhantes quanto a textura, sendo ambas classificadas como solo Franco Arenoso, podemos perceber uma diferença significativa na EA. Sendo assim o relevo do local do experimento também foi avaliado, a fim de identificar uma possível justificativa para diferença na EA de regiões com características semelhantes. Dessa maneira na Figura 33 temos os pontos de amostragem representados pelos pontos coloridos no corte transversal na região estudada.

Figura 33 - Perfil de elevação do local do estudo.



O pivô central é um dos pontos mais elevados da área, entretanto conforme avançamos sob a linha lateral pivô há uma acentuação da declividade da área, que é seguida por um aclive, formando um vale no relevo da região, que é perceptível na figura 34.

Figura 34 - Imagem do sistema de irrigação, com destaque para o relevo do local.

Fonte: MARQUES (2022).



Portanto quando comparamos os dados de uniformidade de aplicação, eficiência de aplicação, textura do solo e relevo, pode-se destacar evidências que o relevo está influenciando a EA, uma vez que as amostras 1 e 3 foram coletadas onde relevo é mais elevado, e apresentaram as menor EAs do ensaio. Aliado a isso, pode-se perceber no “Gráfico de Distribuição da precipitação ao longo da linha do pivô central” (Figura 12) que as maiores intensidades de aplicação se concentraram da faixa central da linha lateral do equipamento, enquanto as regiões periféricas do gráfico apresentaram maior defasagem da precipitação, hipótese que justificaria a influência do relevo na EA.

Segundo Bernardo et al. (2008) para que o perfil distribuição de água ao longo da linha lateral do pivô seja o mais homogêneo possível, os aspersores devem estar trabalhando dentro dos limites de serviço especificados pelo fabricante. O autor ainda comenta pressões muito elevadas causam uma pulverização excessiva do jato de água reduzindo assim o raio de alcance, favorecendo uma maior intensidade de aplicação próximo ao aspersor, caso similar a faixa central da área estudada onde o relevo é mais baixo, e se a pressão for insuficiente ocorrerá uma

inadequada pulverização e um perfil de destruição irregular ou abaixo da média geral dos demais setores.

É comentado por Guerra (2004) que é comum que os equipamentos de irrigação sejam utilizados por longos períodos sem a devida manutenção nas estações de bombeamento e dos reguladores de pressão, que possuem vida útil curta quando comparada aos demais componentes do sistema, cerca de 4 a 5 anos, dessa forma o autor recomenda que sejam feitas manutenções periódicas a fim de identificar possíveis causas de perda de eficiência, como rotores de bomba danificados, redução do diâmetro interno das paredes de condutos e da bomba, que podem ser obstruídos devido ao uso prolongado.

Segundo o proprietário da área o sistema de irrigação já está em funcionamento a mais de 10 anos de maneira ininterrupta, realizando somente as manutenções básicas para o funcionamento do equipamento. Além disso foi comentado por ele que o sistema de bombeamento aparenta estar funcionando com uma menor eficiência, sendo que o produtor já notificou o fabricante do sistema para uma possível troca das bombas. Dessa forma o presente trabalho conseguiu evidenciar uma baixa EA nas regiões de maior aclive devido a maior perda de carga para movimentação do fluido nas tubulações do pivô.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

✓ O presente trabalho é de grande relevância, uma vez que pôde conscientizar o produtor sobre a importância das manutenções regulares e sobre a real situação de funcionamento do equipamento.

✓ Apesar da grande variabilidade de solo na área, pôde-se verificar que o solo da região é predominante arenoso, variando entre textura Franco Arenosa e Areia Franca.

✓ Como há aspersores em mal funcionamento e vazamentos no equipamento, foi possível verificar o quanto influenciaram negativamente a uniformidade de aplicação em suas respectivas zonas de influência.

✓ Sugere-se ao produtor que corrija o posicionamento dos aspersores na 1^o, 8^o e 9^o torre; substitua os aspersores danificados na 3^o e 8^o torre; e corrija o vazamento na mangueira do aspersor no vão em balaço.

✓ A lâmina aplicada pelo sistema apresentou valor expressivamente menor quando comparada a lâmina que foi coletada durante a avaliação.

✓ Todos os parâmetros de uniformidade atingiram níveis satisfatórios de desempenho, que são propostos pela literatura, sendo os coeficientes que utilizam de medidas de dispersão foram os que apresentaram menores valores devido a lâmina não apresentar distribuição normal.

✓ Embora as lâminas armazenadas apresentem um coeficiente de variação elevado, podem ser consideradas aceitáveis devido ao solo e relevo estudado, naturalmente, apresentarem grande variabilidade de formação.

✓ A eficiência de aplicação de água foi considerada satisfatória em apenas um dos pontos amostrados avaliadas, enquanto as outras foram consideradas insuficientes.

✓ Há evidências que o relevo esteja impactando a uniformidade de distribuição do sistema, devido as perdas de carga das tubulações nas zonas de maior aclive da área.

✓ Para estudos futuros sugere-se que também seja avaliado o sistema de bombeamento, a fim de melhorar a pressão de serviço do sistema nas regiões de maior aclive.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Atlas Irrigação: Uso da Água na Agricultura Irrigada**. 1º Edição, Brasília – DF: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPR), 2017. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/AtlasIrrigacao-UsodaAguanaAgriculturaIrigada.pdf>

ANDRADE, C.L.T; BRITO, R. A. L. **Métodos de irrigação e quimigação**. Embrapa milho e sorgo, Circular técnica, 2 ed., p. 1-17, dez./2006.

AZEVEDO NETTO, J M. et al. **Manual de Hidráulica**. Ed. Edgard Blucher Ltda., 8. Ed., São Paulo, 1998.

AZEVEDO, H.J.; BERNARDO, S.; RAMOS, M. M.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R. **Influência de fatores climáticos e operacionais sobre a uniformidade de distribuição de água, em um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.4, n. 2, p. 152-158, 2000.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8º edição, editora: UFV, Universidade Federal de Viçosa, 2008, p. 377.

BISCARO, G.A. **Sistemas de Irrigação por Aspersão**. 1º Edição, DOURADOS-MS: Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), 2009. Disponível em: <https://livros01.livrosgratis.com.br/gd000043.pdf>.

CAINELLI, V.H.; ROBAINA, A.D.; CARLESSO, R.; DOTTO, C.R.D. **Desempenho e uniformidade da distribuição de água de um pivô central**. Ciência Rural, Santa Maria, V. 27, n.4, p. 35-40, 1997.

CASTIBLANCO, C. J. M. **Economia de energia em irrigação por pivô Central em função da melhoria na uniformidade de distribuição de água**. 2009. 70f. Dissertação de Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

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

COSTA, M.B. **Avaliação da irrigação por pivô central na cultura do café (Coffea canephora L.) e na cultura do mamoeiro (Carica papaya L.) no município de Pinheiros**. Piracicaba: ESALQ, 2006. 88p. (Dissertação de Doutorado)

CUNHA, F.N.; et al. **Análise de coeficientes de uniformidade em pivôs centrais instalados na região sudoeste de Goiás**. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada. V.3, n.2, p.48-54, 2009.

FRIZZONE, J. A. **Os métodos de irrigação**. Piracicaba: Curso de Graduação em Engenharia Agrônômica - ESALQ/USP, 2017. 32p

FRIZZONE, J. A.; DOURADO NETO, D. **Avaliação de sistemas de irrigação**. In: MIRANDA, J. H de.; PIRES, R. C. de M. Irrigação (Série Engenharia Agrícola). Piracicaba: FUNEP, 2003. p.573-651.

HART, W. E.; **Overhead irrigation pattern parameters**. Agricultural Engineering, v. 42, n. 7, p. 83-89, 1961.

HEERMANN, D. F.; HEIN, P. R. **Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system**. Transaction of the ASAE, St. Joseph, v. 11, n.1, p.11-15, 1968.

HEINEMANN, A. B.; FRIZZONE, J. A.; PINTO, J. M.; FILHO, J. C. F. **Influência da altura do emissor na uniformidade de distribuição de água de um sistema pivô central**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, V. 33, n.9, p. 1487-1493, set. 1998.

HEINEMANN, A.B.; FRIZZONE, J.A. **Custo da melhora da uniformidade de distribuição de água por um pivô central vs. economia de energia**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa. Anais... Viçosa: SBEA, 1995, p.189.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário 1995 – 1996**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/> . Acesso em: 05/06/2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estabelecimentos com uso de agricultura irrigada crescem em mais de 50% em 11 anos** .Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/26684-estabelecimentos-com-uso-de-agricultura-irrigada-crescem-em-mais-de-50-em-11-anos> . Acesso em: 05/06/2021.

KRUSE, E. G. **Describing irrigation efficiency and uniformity**. Journal Irrigation. Drainage Division. ASCE, New York, v.104, n.1R1, p.35-41, 1978.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2º ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Embrapa-SNLCS, 1984. 46p.

MERRIAM, J.L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: A guide for management**. Department of Agricultural and Irrigation Engineering. Utah State University, Logan, Utah. 1978. 221p.

MERRIAM, J.L.; KELLER, J.; ALFARO, J. **Irrigation system evaluation and improvement**. Logan: Utah State University, 1973.

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

PARIZI, A. R. C.; HOHENBERGER, L.; SOARES, F. C. **Avaliação de uniformidade de distribuição de água em sistemas de irrigação do tipo pivô central no município de Alegrete-RS**. XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2017.

PEREIRA, A. S. **Desenvolvimento de um protótipo aplicador de produtos químicos para um sistema de irrigação pivô central**. 2001. 64f. Tese de Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

PEREIRA, L. C.; VALERO, J. A. J.; BUENDÍA, M. R. P.; MARTÍN-BENITO, J. M. T. **El riego y sus tecnologías**. 1. ed. Albacete: CREA-UCLM, 2010. 296p.

PINTO, J.M.; SILVA, C.L.; OLIVEIRA, C.A.S. **Influência de variáveis climáticas e hidráulicas no desempenho da irrigação de um pivô central no oeste baiano**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.26, n.1, p.76-85, jan./abr. 2006.

REZENDE, R. **Desempenho de um sistema de irrigação pivô central quanto a uniformidade e eficiência de aplicação de água, abaixo e acima da superfície do solo**. Piracicaba – SP, 1992. 106 f. Dissertação de Mestrado - Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 1992.

RICHARDS, L.A. **Physical conditions of water in soil**. In: BLACK, C.A., EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; CLARK, F.E (1965). (ed.) *Methods of soil analysis - physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling*. Madison, ASASSSA, p.128-152.

SALEME, D. C.; **Pré-seleção de sistemas de irrigação em cana-de-açúcar, para as características da região de São Miguel dos Campos-AL**. Rio Largo – AL, 2010. 40f. Trabalho de conclusão de curso - Centro de Ciências Agrárias na Universidade Federal De Alagoas. 2010.

SANDRI, D.; CORTEZ, D. DE A. **Parâmetros de desempenho de dezesseis equipamentos de irrigação por pivô central**. Ciênc. Agrotec., Lavras, v. 33, n. 1, p. 271-278, jan./fev., 2009.

SCHMIDT, W.; COELHO, R. D.; JACOMAZZI, M. A.; ANTUNES, M. A. H.; **Distribuição espacial de pivô centrais no Brasil: I – Região Sudeste**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 8, n. 2/3, p. 330-333, 2004. Campina Grande, PB, DEAg/UFCG.

SCHONS, R. L. **Avaliação dos parâmetros de desempenho de sistemas de irrigação por pivô central visando sua otimização operacional**. 2006. 79f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

SCHONS, R. L. **Critérios para o aumento do índice de eficiência nos sistemas de irrigação tipo pivô central**. 2010. 139f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

SCHONS, R. L.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X. **Caracterização e avaliação de áreas irrigadas no Rio Grande do Sul**. *Tecnol. & Ciênc. Agropec.*, João Pessoa, v.8, n.1, p.55-59, mar. 2014.

SILVA, D.D.; RAMOS, M.M.; MARTINEZ, M.A; DENÍCULLI, W. **Uniformidade de distribuição de água em sistemas de aspersão, com utilização de aspersor fixo com placa defletora auxiliar**. *Engenharia Agrícola*, v. 5, n. 4, p. 281-292, 1997.

SILVA, F.Y. da. **Avaliação da uniformidade de três pivôs centrais em 15 anos**. Florianópolis - SC, 2016. XLV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2016. Disponível em: <https://conbea.org.br/anais/publicacoes/conbea-2016/publicacoes-2016/eas-engenharia-de-agua-e-solo-3/1733-avaliacao-da-uniformidade-de-tres-pivos-centrais-em-15-anos/file>.

TEIXEIRA, P.C.; et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3º edição, editora: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Solos, Brasília - DF, 2017, p. 35 – 45.

VAN GENUCHTEN, M. T. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils**. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 44, p. 892 - 898, 1980.

VILELA, L. A. A. **Irrigação por autopropelido e pivô central**. Lavras: FAEPE, 1999.82p.

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

7 APÊNDICES

Apêndice A - Análise da variância das precipitações coletadas pelo teste F ao nível de 5% de significância.

| Causa da variação | Gras de liberdade | Soma dos quadrados | Quadrado médio | F calculado | F (5%) |
|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------|
| Tratamentos | 14 | 111,804 | 7,986 | 5,259 | 0,000 |
| Resíduo | 97 | 147,311 | 1,519 | | |
| Total | 119 | 294,128 | | | |
| CV (%) | 16,49 | | | | |
| Média geral | 7,472 | | | | |

Apêndice B - Análise da variância das lâminas armazenadas no perfil do solo pelo teste F ao nível de 5% de significância.

| Causa da variação | Gras de liberdade | Soma dos quadrados | Quadrado médio | F calculado | F (5%) |
|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------|
| Tratamentos | 2 | 15,909 | 7,954 | 4,636 | 0,0376 |
| Resíduo | 10 | 17,157 | 1,716 | | |
| Total | 17 | 36,120 | | | |
| CV (%) | 66,85 | | | | |