

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE DESEMPENHO
DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL
VISANDO SUA OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Ricardo Luis Schons

**Santa Maria, RS, Brasil
2006**

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE
SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL VISANDO
SUA OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL**

por

Ricardo Luis Schons

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Água e Solos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Prof. Osvaldo König

**Santa Maria, RS, Brasil
2006**

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE SISTEMAS
DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL VISANDO SUA OTIMIZAÇÃO
OPERACIONAL**

elaborada por
Ricardo Luis Schons

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:

Oswaldo König, Dr. Ing.
(Presidente/Orientador)

Márcia Peiter, Dr. (URI)

Toshio, Nishijima Dr. (UFSM)

Santa Maria, 23 de fevereiro de 2006.

AGRADECIMENTO

A Universidade Federal de Santa Maria e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola que possibilitaram a realização do presente trabalho.

Ao professor orientador Osvaldo König e aos demais integrantes da comissão de orientação, pela dedicação e esforço.

A empresa Fockink Industrias Elétricas Ltda, pela oportunidade, incentivo e colaboração na retomada da minha vida acadêmica.

Aos técnicos, amigos e colaboradores que auxiliaram no levantamento e discussão das situações do trabalho a campo.

Aos colegas do programa de pós-graduação, em especial aos colegas André Anibal Brandt e Henrique Cunha Corrêa, que auxiliaram em todo período do curso.

A minha família, que com o apoio dado tornou mais fácil o transcurso da jornada, principalmente à minha esposa, Elisângela, e minhas filhas Larissa, Carolina e Andressa, que com carinho, paciência e incentivo ajudaram no crescimento pessoal.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL VISANDO SUA OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL

AUTOR: RICARDO LUIS SCHONS

ORIENTADOR: OSVALDO KÖNIG

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 23 de fevereiro de 2006.

Com a competitividade no setor agrícola crescente, principalmente em termos de globalização da economia, a inclusão de novas tecnologias no setor agrícola, especialmente a irrigação, é fundamental para tornar o setor cada vez mais sustentável. Os sistemas de irrigação são projetados para terem uma longa vida útil, assim sendo, não podem-se desconsiderar os custos operacionais com a energia e o desgaste dos itens que compõe os mesmos, que estão diretamente relacionados ao seu dimensionamento hidráulico, às demandas hídricas das culturas e ao seu manejo. O consumo de energia tende a aumentar com o desgaste ocorrido no equipamento, ou mesmo ser excessivo, devido a um dimensionamento deficiente. É de fundamental importância que se tenham meios de constatar estes acontecimentos em cada instalação de irrigação e também ter o acompanhamento das atividades executadas com o equipamento e que interferem em seu desempenho. A possível utilização de água de forma ineficaz, com sistemas de irrigação dimensionados deficitariamente ou com necessidade de manutenção, reflete a necessidade da avaliação constante nos equipamentos. Este trabalho avaliou alguns parâmetros que podem modificar o desempenho de sistemas de irrigação por pivô central. Por meio dessa avaliação procurou-se trazer ao usuário do equipamento de irrigação informações sobre as modificações no desempenho dos equipamentos, ao longo de sua vida útil, relacionadas aos três parâmetros estudados: a) tempo de funcionamento do equipamento de irrigação, b) velocidade da água na parte aérea do equipamento e c) aplicação ou não de produtos químicos com a água de irrigação. Concluiu-se que: a) a avaliação do desempenho operacional de sistemas de irrigação tipo "pivô central" deve ser efetuada ao longo da vida útil dos equipamentos, visando orientar ajustes e correções periódicas nas condições operacionais que permitam otimizar a alocação da água e da energia. b) É recomendável analisar o desempenho dos equipamentos, adotando os três parâmetros empregados neste trabalho: o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e a Eficiência de Aplicação (EA).

Palavras-chaves: Irrigação, Uniformidade, Eficiência.

ABSTRACT

Master Science Dissertation
Graduate Program in Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

EVALUATION OF PERFORMANCE PARAMETERS OF IRRIGATION SYSTEMS FOR CENTER PIVOT AIMING AT ITS OPERATIONAL IMPROVEMENT

AUTHOR: RICARDO LUIS SCHONS

ADVISOR: OSVALDO KÖNIG

Santa Maria, February 23, 2006.

With the competitiveness in the increasing agricultural sector, mainly in terms of globalization of the economy, the inclusion of new technologies in the agricultural sector, especially the irrigation, is basic to become the sector each more sustainable time. The irrigation systems are projected to have a long useful life, thus being, cannot be disrespected the operational costs with the energy and the consuming of accessories that it composes the same ones, that directly they are related to its hydraulical sizing, the watershed of the cultures and to its water management. This consumption of energy has trend of increase with the consuming occurred in the equipment, or same to be extreme, which had to a deficient sizing. It is of basic importance that can have ways to evidence these events in each installation of irrigation and also to have a accompaniment of the activities executed with the equipment and that they intervene with its performance. The possible water use of inefficient form, with projected systems of irrigation with problems or necessity of maintenance, reflects the necessity of the constant evaluation in the equipment. This work evaluated some parameters that can modify the performance of systems of irrigation for center pivot. For way of this evaluation it was looked to bring to the user of the equipment of irrigation information on the modifications in the performance of the equipment, throughout its useful life, related to the three studied parameters: the time of functioning of the irrigation equipment, b) speed of the water in the aerial part of equipment and c) application or not of chemical products with the irrigation water. One concluded that: the evaluation of the operational performance of irrigation systems type "center pivot" must be effected to the long one of the useful life of the equipment, aiming at to guide adjustments and periodic corrections in the operational conditions that allow to optimize the allocation of the water and the energy. b) Is recommendable to analyze the performance of the equipment, adopting the three parameters used in this work: the Christiansen Uniformity Coefficient (CUC), the Distribution Uniformity Coefficient (CUD) and the Efficiency of Application (EA).

Keywords: Irrigation, Uniformity, Efficiency

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios do CUC, CUD e EA em função do fator horas de funcionamento dos equipamentos.....	64
Tabela 2 - Tabela do teste t para as médias do CUC, CUD e EA em função do fator uso de produto químico junto a água de irrigação.....	65
Tabela 3 - Valores médios do CUC, CUD e EA em função do fator velocidade da água na parte aérea do equipamento.....	65
Tabela 4 - Valores médios dos coeficientes dos equipamentos com tempo de uso abaixo de 3500 horas de uso e com velocidade dentro da tubulação aérea abaixo de 3 m.s^{-1}	66
Tabela 5 - Valores médios percentuais dos fatores quantidades de horas de funcionamento, fator uso de produto químico junto a água de irrigação e fator velocidade da água na parte aérea do equipamento.....	67
Tabela 6 - Exemplo de dados e parâmetros para utilização da rotina “Solver”	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Disposição dos coletores de água em área irrigada por pivô central, na realização do teste de uniformidade	29
Figura 2 – Conjunto motoredutor e cardans de um sistema de irrigação por pivô central	30
Figura 3 – Conjunto motobomba de um sistema de irrigação por pivô central	30
Figura 4 – Conjunto mangote de união de lance do equipamento de irrigação por pivô central	31
Figura 5 – Esquema da disposição e parâmetros dos coletores para a determinação da uniformidade de distribuição de água para pivôs centrais	32
Figura 6 – Horímetro do equipamento de irrigação por pivô central.	33
Figura 7 – Procedimento de leitura dos dados dos coletores instalados para o teste de lâmina	34
Figura 8 - Função de distribuição cumulativa de probabilidade, associada às lâminas de água aplicada por um sistema de irrigação do tipo pivô central, correspondente ao modelo utilizado.	40
Figura 9 - Função de densidade de probabilidade da distribuição, associada às lâminas de água aplicada por um sistema de irrigação do tipo pivô central, correspondente ao modelo de ajuste utilizado.	42
Figura 10 – Distribuição longitudinal das lâminas coletadas em sistema de irrigação tipo “pivô central” e representação do modelo	

ajustado segundo Silva et al. do equipamento 12 do estado de São Paulo.

62

Figura 11 – Distribuição longitudinal das lâminas coletadas em sistema de irrigação tipo “pivô central” e representação do modelo ajustado segundo Silva et al. do equipamento 23 do estado de São Paulo

63

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 – Média percentual do coeficiente de Christiansen dos equipamentos, resultante da interação dos fatores quantidade de horas de funcionamento, velocidade da água na tubulação aérea e uso de produto químico com a água de irrigação.....67
- Gráfico 2 – Média percentual do coeficiente de uniformidade de Distribuição dos equipamentos, resultante da interação dos fatores quantidade de horas de funcionamento, velocidade da água na tubulação aérea e uso de produto químico com a água de irrigação.68
- Gráfico 3 – Média percentual da Eficiência de Aplicação dos equipamentos, resultante da interação dos fatores quantidade de horas de funcionamento, velocidade da água na tubulação aérea e uso de produto químico com a água de irrigação.68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	HIPÓTESE DO TRABALHO.....	13
2.1	OBJETIVO.....	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1	A IRRIGAÇÃO	15
3.2	O CONSUMO DE ÁGUA	15
3.3	O SISTEMA DE IRRIGAÇÃO PIVÔ CENTRAL	16
3.4	SISTEMAS DE RECALQUE	20
3.4.1	Bombeamentos	20
3.4.2	Adução.....	21
3.4.3	Sucção	21
3.5	AValiação DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO.....	22
3.6	TRANSFORMAÇÃO DE DADOS	26
4	MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1	PROCEDIMENTO DO LEVANTAMENTO DE CAMPO	28
4.2	PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DOS DADOS	34
4.2.1	Definição do modelo utilizado.....	34
4.2.2	Ajuste dos parâmetros do modelo	35
4.2.3	Função de distribuição de probabilidade da água aplicada.....	38
4.2.4	Distribuição cumulativa de probabilidade	39
4.2.5	Densidade de probabilidade da distribuição.....	40
4.2.6	Média da função densidade de probabilidade da distribuição	43
4.2.7	Variância da função densidade de probabilidade da distribuição.....	44
4.2.8	Aplicação do modelo utilizado na análise de desempenho da irrigação..	46
4.2.9	Coefficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).....	46
4.2.10	Lâmina média aplicada.....	47
4.2.11	Média dos desvios absolutos	49
4.2.12	Coefficiente de uniformidade de distribuição (CUD).....	53
4.2.13	Lâmina média do quartil inferior	53
4.2.14	Eficiência de aplicação de água da irrigação	55
4.2.15	Volume total aplicado	56

4.2.16	Volume excedente.....	56
4.2.17	Volume deficiente.....	58
4.2.18	Volume útil.....	60
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA APLICADA AOS ÍNDICES.....	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
5.1	ANÁLISE DA VARIÂNCIA NOS FATORES:.....	63
5.1.1	Fatores isolados.....	63
5.1.2	Fatores agrupados.....	64
5.1.3	Níveis dos fatores.....	64
5.2	AJUSTE DOS DADOS AO MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA APLICADA:.....	69
6	CONCLUSÃO.....	70
7	RECOMENDAÇÕES.....	71
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
9	ANEXOS.....	77

1 INTRODUÇÃO

A competitividade do setor agrícola é crescente, principalmente em tempos de globalização da economia. A busca por produtos de qualidade com preços competitivos é incessante. Nesse aspecto, a inserção de novas tecnologias no setor agrícola, especialmente a irrigação, é fundamental para tornar o setor cada vez mais sustentável. A ampliação de áreas utilizando os sistemas de irrigação é prova da necessidade dos empresários em obter tecnologias que garantam seus lucros.

Mesmo em regiões de clima tropical, podem ocorrer períodos em que, a água, em sua ocorrência natural, principalmente sob a forma de precipitação, ofereça risco à produção das culturas devido a sua baixa intensidade ou má distribuição durante o ciclo da cultura.

Os sistemas de irrigação por aspersão do tipo pivô central são projetados e fabricados para terem uma longa vida útil (aproximadamente de 15 a 25 anos), assim sendo, não pode-se desconsiderar os custos operacionais com energia e o desgaste que ocorrem nos itens que compõe o sistema, que estão diretamente relacionados ao seu dimensionamento hidráulico, as demandas hídricas e ao manejo dos equipamentos. Este consumo de energia aumenta de acordo com o desgaste do equipamento, ou mesmo pode ser excessivo, devido a um errôneo dimensionamento inicial; é de fundamental importância que possamos ter meios de constatar estes acontecimentos em cada instalação de irrigação e a cada período de utilização do mesmo.

Ao usuário do equipamento de irrigação, muitas vezes é difícil detectar o tempo certo de realizar a manutenção ou troca de algum componente do sistema. O desempenho insatisfatório do sistema muitas vezes não é percebido, quando ao longo do ciclo da cultura ocorrem precipitações que acabam minimizando o problema, ou quando o preço do produto admite uma aplicação maior de lâmina d'água para resolver problemas de uniformidade de aplicação. O consumo excessivo de energia e água com a aplicação de uma lâmina maior pode prejudicar ou inviabilizar a produção no decorrer do tempo.

Os recursos hídricos desempenham papel fundamental no desenvolvimento de qualquer sociedade. A possível aplicação de água de forma

ineficiente, com os sistemas de irrigação mal dimensionados ou com necessidade de manutenção mostra a necessidade da avaliação constante nestes equipamentos.

Existem vários parâmetros para avaliação de pivôs centrais, e muitas vezes estes são tratados e analisados isoladamente, por este motivo a tomada de decisão é prejudicada. Analisar os diversos parâmetros e avaliar a resposta de cada um deles aos dados do equipamento não é uma tarefa fácil. Para tal são criadas metodologias de análise e modelos de desempenho, com os quais possam ser identificados os problemas e subsidiar a tomada de decisão, visando a melhoria dos equipamentos.

É de grande importância o conhecimento dos fatores que interferem nas características de eficiência dos equipamentos de irrigação ao longo do uso do equipamento. O produtor deve saber o quanto as características de projeto, ou as práticas de uso do equipamento de irrigação modificam a aplicação de água.

2 Hipótese do trabalho

1. O número de horas de funcionamento dos equipamentos de irrigação por pivô central influencia nos coeficientes de uniformidade e eficiência de aplicação dos mesmos.
2. O tipo de uso, aplicação ou não de produto químico com a água de irrigação, dos equipamentos de irrigação por pivô central influencia nos coeficientes de uniformidade e eficiência de aplicação dos mesmos.
3. A velocidade da água dentro da tubulação aérea dos equipamentos de irrigação por pivô central influencia nos coeficientes de uniformidade e eficiência de aplicação dos mesmos.

2.1 Objetivo

O presente trabalho objetivou avaliar sistemas de irrigação por pivô central, através da obtenção de parâmetros para subsidiar a otimização operacional dos mesmos, com a avaliação de dois coeficientes de uniformidade e um de eficiência.

O objetivo específico foi estabelecer as relações entre os parâmetros de avaliação do desempenho de sistemas de irrigação por pivô central em função do tempo de uso, tipo de utilização e velocidade da água na tubulação aérea do equipamento.

Para alcançar os objetivos deste trabalho foram realizadas análises quantitativas dos componentes dos sistemas selecionados, foram realizados testes de uniformidade nos equipamentos; foram estimados dados de vazão, medidos dados de pressão dos equipamentos e comparados com os dados de projeto, visando otimizar o seu desempenho técnico e econômico dos sistemas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A irrigação

Segundo Gomes (1997), a irrigação é uma prática agrícola de fornecimento de água às culturas, onde e quando as dotações pluviométricas, ou qualquer outra forma natural de abastecimento, não são suficientes para suprir as necessidades hídricas das plantas. Constitui-se uma atividade imprescindível para qualquer agricultura rentável, em quase todas as regiões e climas de nosso planeta.

A irrigação constitui uma alternativa para a melhoria do rendimento de grande parte das culturas, proporcionando um incremento médio de produtividade da ordem de 200%, segundo Gonzaga Neto (2000), e com isso propicia uma redução dos custos unitários de produção.

Dentre os fatores de produção, a água e os nutrientes são os que limitam os rendimentos com maior frequência; assim, o controle da irrigação e da fertilidade do solo constituem critério essencial para o êxito da agricultura (FRIZZONE, 1987).

Um relatório da FAO (Food and Agriculture Organization) sugeriu que : "... o gerenciamento eficiente da água (incluindo práticas de irrigação e drenagem) pode, provavelmente, fazer mais pelo aumento do suprimento de comida nas áreas irrigáveis do mundo do que qualquer outra prática agrícola".

3.2 O consumo de água

Segundo Carlesso e Zimmermann (2000) de todos os recursos que as plantas necessitam para crescer, a água é o mais abundante e, ao mesmo tempo, o mais limitante à produtividade agrícola.

Heinemann et al. (1998) mencionam que a aplicação de uma lâmina menor que a requerida para a máxima produção pode ser economicamente viável dependendo da resposta das culturas a água, da variabilidade climática e das flutuações das condições econômicas.

Pereira Neto (1998) lembra que o uso eficiente da água nada mais é do que a sua otimização para que, juntamente com os demais fatores de produção, resulte o melhor nível de produtividade e renda por unidade de área.

Mantovani et al. (1995) mostram que a relação ótima entre lâmina de irrigação e lâmina de água necessária à cultura do milho (Hg/Hr) depende da uniformidade de distribuição de água e da relação entre o preço do produto e o custo da água. Com alto custo da água, o valor ótimo de Hg/Hr aumentou em relação ao aumento do CUC, enquanto uma tendência oposta foi observada a baixo custo da água. Os resultados revelam que o aumento da lâmina de irrigação, para compensar a redução da produção pela baixa uniformidade de distribuição da água, é uma estratégia aceitável quando o custo da água é baixo em relação ao preço do produto. A importância do custo da água diminui com o aumento da uniformidade.

3.3 O sistema de irrigação pivô central

O pivô central é um sistema de irrigação por aspersão que opera em círculos, constituído de uma linha lateral com emissores, ancorada em uma das extremidades e suportada por torres dotadas de rodas equipadas com unidades propulsoras (FARIA & VIEIRA, 1986). Segundo os autores, a velocidade de rotação das torres em torno do ponto central é regulada por meio de um relé percentual situado no painel do equipamento, que comanda a velocidade de deslocamento da última torre.

O sistema de irrigação tipo pivô central pertence ao grupo de sistemas mecanizados de aspersão que foi idealizado pelo norte americano Frank Zybach na década de 40. Foi introduzido no Brasil no final dos anos 70, impulsionado sobretudo por programas governamentais como o PROINE, PROFIR e o PRONI.

De fácil operação, alta eficiência na aplicação da água (70 a 90%) e, graças à grande versatilidade desse equipamento e baixo custo operacional, os pivôs rapidamente conquistaram a preferência do agricultor irrigante. Está atualmente entre os equipamentos de irrigação mais comercializados e é o que mais tem contribuído para o incremento da área irrigada no País.

No início eram máquinas simples acionadas por turbinas hidráulicas. A uniformidade de aplicação de água sobre a superfície do solo dependia do relevo e da extensão do pivô. Atualmente, o desenvolvimento e a incorporação de diversos acessórios e dispositivos permitem a utilização desses equipamentos nas mais diversas situações.

Pereira (2001) informa que o deslocamento de toda linha lateral do pivô central no campo é comandado pelo andamento da torre mais externa. Segundo o autor, supondo-se inicialmente que todas as torres encontram-se alinhadas e apenas a última se movimenta, o acionamento do motoredutor da torre subsequente processa-se quando o vão em movimento deflete-se em relação aos demais. Continuando o processo entre todos os vãos adjacentes, promove-se a movimentação de toda a linha de irrigação pelo funcionamento intermitente dos motoredutores das torres. O autor comenta ainda que embora a velocidade angular de deslocamento do pivô central seja constante, a velocidade média de deslocamento de cada torre deve ser progressivamente maior a partir do ponto central do pivô, de maneira a induzir o movimento circular do equipamento na área. Como a área irrigada é progressivamente maior, aumenta-se também a vazão dos emissores ao longo da linha lateral do equipamento, de modo que toda a área irrigada receba a mesma lâmina de água de maneira uniforme. Dessa forma, têm-se elevadas intensidades de aplicação de água na extremidade final do pivô e menores intensidades de aplicação nas proximidades do centro do equipamento.

O pivô central é um dos sistemas de irrigação por aspersão mais automatizados que existe no mercado. Essa automação pode variar desde simples acessórios a componentes que permitem coloca-lo em funcionamento a distância, por meio de ondas de rádio ou telefone celular. Existem também pivôs que são totalmente controlados por estações computadorizadas capazes de coletar dados (umidade do solo, evapotranspiração, pluviometria, por exemplo), analisá-los e avaliar o momento ideal e a exata quantidade de água que deverá ser aplicada para suprir a demanda da cultura (VILELA, 1999).

Dentre os métodos de irrigação, o de aspersão por pivô central tem-se expandido de forma mais significativa, pelas seguintes razões: boa uniformidade de distribuição de água, quando bem dimensionado; fácil controle da lâmina d'água aplicada; grande versatilidade para as diversas condições de topografia e tipos de solo; menor dispêndio de mão-de-obra e maior divulgação por parte de fabricantes e vendedores (BERNARDO, 1989).

A modernização do sistema pivô central tem ocorrido, principalmente no sistema de propulsão e alinhamento e nos dispositivos de distribuição de água. Novas tecnologias foram incorporadas, como sistema de propulsão elétrica, vãos de grande comprimento, tubulação aérea de maior diâmetro e comprimento,

articulações flexíveis entre torres. Com o aumento dos custos da energia, foram introduzidos os emissores de baixa pressão fixos, posteriormente o sistema LEPA, um modelo de aspersor que aplica água com consumo baixo de energia para aplicação de água, e mais recentemente foram introduzidos os sprays rotativos.

A necessidade de reduzir o consumo de energia e ao mesmo tempo, manter a uniformidade e a eficiência da aplicação de água passou a ser uma grande preocupação. Segundo Gilley & Watts (1977) e Gilley et al. (1990), a redução de pressão de operação pela utilização de emissores de baixa pressão é a maneira mais fácil de reduzir o consumo de energia dos sistemas pivô central. Os emissores de baixa pressão foram desenvolvidos para substituir os tradicionais aspersores de impacto, aplicando a mesma lâmina de água, com uniformidade comparável e menor utilização de energia. Os sistemas pivô central passaram então a serem projetados ou redimensionados para trabalhar em pressão reduzida. Entretanto, estes sistemas tendem a apresentar problemas de manejo de água e solo, como aumento da taxa de aplicação (predisposição para escoamento superficial), perdas por deriva pela ação do vento e evaporação, além de redução na uniformidade devido à menor superposição, em razão da diminuição do raio molhado dos aspersores.

Rolland (1982) afirma que o aumento do comprimento da tubulação lateral, ou seja, o raio do equipamento, aumenta a viabilidade econômica do equipamento, reduzindo o custo por área irrigada. Entretanto, pivôs de grande porte normalmente apresentam como características a ocorrência de altas taxas de aplicação de água, grande perda de carga na tubulação aérea, e elevado número de horas por revolução, dificultando o manejo do equipamento. Tecnologias incorporadas ao equipamento permitem minimizar ou eliminar estes problemas.

O movimento descontínuo da lateral afeta a uniformidade de aplicação de água dos sistemas móveis de irrigação (Hanson & Wallender, 1986, apud FRIZZONE & NETO, 2003). A redução no coeficiente de uniformidade é maior para sistemas equipados com emissores fixos de baixa pressão e pequeno raio de alcance. Por ter um movimento mais uniforme, o último vão terá maior uniformidade de distribuição de água no sentido circular.

Podem ser encontrados pivôs centrais com diferentes velocidades de deslocamento da última torre, sua velocidade é dependente da relação de redução do motoredutor e da relação dos redutores de roda, da rotação do motor do motoredutor e do tipo de pneu utilizado. Além da velocidade de deslocamento da

última torre, os pivôs centrais podem se diferenciar em relação ao ciclo do relé percentual, comumente encontrado de 60 segundos, onde quando o mesmo é regulado para 50%, permanece ligado 30 segundos e desligado outros 30 segundos, podem ser encontrados relés com ciclos de tempo diferentes. Segundo Folegatti et al. (1998) o sistema de propulsão, em pivôs centrais, com relé percentual de ciclo reduzido e alta velocidade de deslocamento das torres minimiza os efeitos de redução da uniformidade, reduz o tempo de giro e a lâmina por volta, adequando o equipamento à práticas de quimigação.

No dimensionamento de sistemas de irrigação, deve ser considerada a variabilidade existente entre os emissores, decorrentes do processo de fabricação. A fabricação deverá ser exata, uniforme e constantemente monitorada, pois pequenas variações poderão causar grandes diferenças de vazão (VIEIRA, 1996).

Keller e Karmeli (1974) comentam sobre a uniformidade dos sistemas de irrigação, e citam que esta uniformidade depende também da precisão com que os emissores são fabricados.

Keller e Bliesner (1990) assumem que a espessura do anel efetivamente irrigado pelo canhão final é cerca de 75% do raio de alcance do canhão final. Como parte da vazão do canhão final aplicada além do raio efetivamente irrigado é perdida, assumem que as perdas superficiais na área do canhão é da ordem de 7 a 8% da vazão do canhão, mesmo quando a evaporação é desprezada.

Uma melhor uniformidade de distribuição da água aplicada pelo canhão final é obtida quando a sua seleção é feita com base no seu perfil radial estacionário (a relação entre intensidade de aplicação de água e distância ao aspersor, que é determinada em ensaios de distribuição de água). Exemplos de seleção do canhão final com base no perfil estacionário de distribuição de água são encontrados em Solomon & Keller (1978).

3.4 Sistemas de recalque

3.4.1 Bombeamentos

O conjunto motobomba é um componente fundamental no sistema de irrigação por aspersão. A motobomba pode ser do tipo centrífuga, de eixo horizontal, ou do tipo turbina de poços profundos, sendo o primeiro o mais usado. Porém, em regiões onde se usa água subterrânea para irrigação, o tipo turbina de poços profundos é o mais utilizado. (BERNARDO et al., 2005)

Os conjuntos motobomba, que compõe o sistema de irrigação, podem ser montados, de acordo com o projeto, com uma única unidade ou com mais de uma unidade, configurando uma associação de bombas. Esta associação poderá ser com duas ou mais bombas em série ou paralelo.

A associação em paralelo consiste no uso de duas ou mais bombas de forma que as vazões de cada uma das unidades afluam por uma mesma tubulação simultaneamente. A associação em série é utilizada em situação que requer altura manométrica muito elevada.

Um dos grandes problemas encontrados nos sistemas de captação e bombeamento é a cavitação, em que consiste da rápida vaporização e condensação de um líquido. É um processo análogo ao da ebulição. Na ebulição, cavidades de vapor são formadas a partir de bolhas menores (núcleos) existentes no meio líquido, com o aumento da temperatura e a pressão mantida constante. A cavitação normalmente ocorre quando o líquido, a uma temperatura constante, é submetido a pressão de vapor, seja por meio estático ou dinâmico.

Os principais efeitos da cavitação são:

- corrosão, com remoção e destruição de pedaços da parede de rotores e carcaça;
- queda de rendimento;
- aumento da potência no eixo (potência requerida);
- trepidação, vibração, desbalanceamento;
- ruído, martelamento (implosão das bolhas).

Os efeitos poderão ser mais destrutivos dependendo do acabamento interno da bomba. A presença de cavidades, trincas e ranhuras, facilita e reforça o ataque e a corrosão.

3.4.2 Adutora

No dimensionamento de sistemas de irrigação privados no Brasil a seleção econômica é pouco usual, sendo o custo de implantação o fator decisivo na escolha do diâmetro das tubulações, ignorando-se a avaliação dos custos variáveis do sistema de irrigação e o tempo na análise dos custos fixos (ZOCOLER,1999). Segundo Bernardo (1989), a seleção econômica das tubulações de um sistema de irrigação deve receber tanta consideração quanto a solução hidráulica do problema, sendo que o dimensionamento baseado na análise econômica consiste em determinar, para cada condição, o(s) diâmetro(s) com os quais a somatória do custo anual fixo com o custo anual variável seja mínima. Favetta (1998, apud ZOCOLER et al., 2001) realizou um estudo em 89 sistemas elevatórios de água para suprimento de equipamentos de irrigação do tipo pivô central no Brasil, tendo concluído que o custo anual total seria menor se fosse utilizado o primeiro diâmetro superior ao diâmetro original em 55,1% dos sistemas e o segundo diâmetro superior em 20,2% dos sistemas. O diâmetro original foi o que proporcionou o menor custo anual total em 22,5% e, por outro lado, em apenas 2,2% o primeiro diâmetro inferior ao original é que proporcionaria uma redução do custo anual total.

3.4.3 Sucção

Segundo Carvalho (2001), a tubulação de sucção deve ser o mais curta possível e com uma ligeira declividade da bomba para o poço de sucção. Deve-se utilizar o mínimo possível de peças de especiais. O diâmetro deve ser tal que a velocidade em seu interior não alcance valores excessivos (normalmente, a velocidade deve ser menor que 2 m.s⁻¹). À entrada da bomba, na ligação com a tubulação, deve-se utilizar redução excêntrica afim de evitar o acúmulo de bolsas de ar. Deve-se instalar uma válvula de pé com crivo na extremidade da tubulação de sucção para mantê-la escorvada e também, para impedir a entrada de corpos estranhos. A tubulação de sucção, no caso de sucção positiva (instalação acima do nível d'água), deve ficar imersa de forma a evitar a entrada de ar. Recomenda-se que a altura mínima de submersão seja 4 vezes o seu diâmetro, no caso de tubulações de grandes diâmetros, e de 0,5 metros para tubos de pequenos diâmetros.

3.5 Avaliação de sistemas de irrigação

Frizzone & Neto (2003) afirmam que os parâmetros de eficiência mais comumente utilizados são eficiência de aplicação, eficiência de distribuição, eficiência em potencial de aplicação e eficiência de armazenagem. A eficiência de aplicação é a relação entre a quantidade de água armazenada na zona radicular e a quantidade de água aplicada à parcela, não provê informações relativas ao grau de adequação e a uniformidade de distribuição.

Silva et al. (1997) afirmam que freqüentemente é necessário avaliar o desempenho de um sistema de irrigação, a fim de determinar sua aplicabilidade em certas condições.

Segundo Frizzone & Neto (2003) há sistemas que, por terem sido mal projetados, apresentam baixa eficácia. Nesses casos e também naqueles sistemas cuja eficácia nunca foi avaliada, o ensaio constitui a via para o levantamento dos dados necessários à tomada de decisão sobre melhorias a introduzir para elevar a eficiência do sistema de irrigação.

Segundo Hart et al. (1979, apud SILVA et al., 2002), ao se considerar as perdas por escoamento superficial na área irrigada e as perdas por condução no trajeto entre o ponto de captação e a área de cultivo, é possível, então, no que se refere à parcela irrigada, estabelecer o nível de desempenho da irrigação, usando apenas dois índices de eficiência e um de uniformidade. O índice de uniformidade indica o desempenho da irrigação na tarefa de distribuição da água na área cultivada. Os dois índices de eficiência indicam o grau de desempenho da irrigação em relação ao cumprimento das metas de manejo previamente estabelecidas no que diz respeito ao percentual da área adequadamente irrigada e a eficiência de aplicação desejada.

A eficiência de aplicação global de um sistema de irrigação por aspersão é um termo usado por Keller e Bliesner (1990) para incluir o efeito das perdas devido a desuniformidade de aplicação, percolação, evaporação, deriva e vazamento da tubulação.

Nenhum sistema de irrigação é capaz de aplicar água com perfeita uniformidade. Em geral, o aumento da uniformidade de distribuição da água requer investimentos na melhoria do sistema, em manutenção e em mão-de-obra para o manejo racional da irrigação (DUKE et al., 1992; HEERMANN et al., 1992).

Letey et al. (1984) citam que a importância da uniformidade de distribuição de água, geralmente expressa pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), (CHRISTIANSEN, 1942), na determinação da lâmina ótima de irrigação, tem sido amplamente reconhecida, mas nenhuma análise quantitativa universal foi desenvolvida.

Para um método de irrigação, em particular, a elevada uniformidade pode ser alcançada, ocorrendo, no entanto, um aumento dos custos de operação. É comum expressar-se a uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação por meio de um coeficiente de uniformidade que expressa a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada sobre o solo (SOLOMON, 1983).

Um aspecto a ser considerado é a uniformidade da umidade abaixo da superfície do solo. Paiva (1980) e Rezende et al. (1993) analisaram o efeito da uniformidade de distribuição da água na superfície do solo sobre a redistribuição desta no perfil, e verificaram aumento dos coeficientes de uniformidade ao longo do tempo, em todas as profundidades estudadas.

Segundo Rocha et al. (1998) a avaliação desses parâmetros apenas por medidas na superfície do solo, desconsiderando-se a redistribuição da água no seu perfil, que é tridimensional e de grande importância nas relações água-solo-planta, pode subestimar a sua eficiência de funcionamento.

Rocha et al. (1998) e Rezende et al. (1998) pesquisando a distribuição sub e superficial da água em irrigação por aspersão convencional, constataram que o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) subsuperficial foi maior que na superfície.

A relação entre o grau de adequação e a eficiência de distribuição é discutida por Frizzone & Neto (2003), onde os elevados valores de uniformidade de distribuição de água e grau de adequação devem estar associados a elevados investimentos e custos operacionais, embora nem sempre se obtém os maiores retornos econômicos. Há um consenso de que, quando a água não é escassa e a cultura é de alto valor econômico, deve-se compensar a baixa uniformidade de distribuição de água pela aplicação de uma lâmina de irrigação maior que a necessária a cultura para reduzir a área de déficit. Entretanto, deve-se considerar que o aumento da lâmina de irrigação eleva os custos operacionais do sistema e aumenta as perdas de nutrientes por lixiviação. Esta representa não só uma perda econômica direta como também reduz a produção e pode contaminar o lençol

freático. Como os gastos com recursos aumentam com a quantidade de água aplicada e a responsabilidade ambiental justifica um manejo racional da irrigação, pode não ser prudente irrigar com elevado grau de adequação.

Paz et al. (2002) estudaram a redução da receita líquida decorrente do déficit e do excesso de água aplicada, considerando o custo da água, o preço do produto e a uniformidade de distribuição do sistema de irrigação, a partir das metodologias apresentadas por Frizzone (1987, apud PAZ et al., 2002), Hart et al. (1980, apud PAZ et al., 2002) e English (1990, apud PAZ et al., 2002). Os autores concluíram, ainda, que a uniformidade de distribuição de um sistema deve ser melhorada se a cultura tem elevado valor econômico, mesmo para baixo custo da água; o que se traduz em economia de água, visto que ocorrerá equilíbrio entre o volume aplicado em excesso e o déficit que ocorre na outra fração da área. A qualidade da irrigação, avaliada pelos parâmetros de eficiência, reduz-se à medida que a uniformidade de distribuição diminui para qualquer cenário ótimo econômico de exploração da cultura.

A eficiência é um parâmetro muito usado no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação. Segundo Keller (1984), ela pode ser dividida em dois componentes: uniformidade de distribuição e perdas de água. A uniformidade de distribuição de água é um importante parâmetro a ser determinado para obtenção de melhor eficiência de irrigação. A uniformidade é uma característica que pode ser usada para comparar diferentes sistemas. Um sistema de irrigação que aplica uma lâmina média adequada, porém com pequena uniformidade, certamente propiciará a formação de subáreas irrigadas com excesso de água aplicada e outras com déficit.

Coelho et al. (2002) considera a uniformidade de distribuição um parâmetro de comparação entre sistemas. Dentre dois que distribuíam a mesma lâmina, o mais uniforme será mais eficiente.

Silva et al. (1997), também mencionam que os sistemas com baixa uniformidade exigem maiores lâminas d'água, para assegurar que a quantidade de água necessária seja distribuída por toda a área, ressaltam que muitos sistemas do tipo pivô central são usados para aplicação de produtos químicos no solo, via água de irrigação; nestes casos a pequena uniformidade de distribuição poderia resultar em danos para as culturas, em função da aplicação excessiva ou deficiente do produto químico.

A determinação do coeficiente de uniformidade é o processo estatístico mais comum para avaliação de sistemas de irrigação por aspersão, sendo que, por convenção, 80% é o valor mínimo aceitável para o desempenho normal do aspersor (GOMIDE et al., 1980).

Ainda segundo os autores, vários fatores influem na distribuição de água nos sistemas de irrigação por aspersão, podendo ser agrupados em fatores climáticos, fatores aerodinâmicos e fatores ligados ao aspersor, ao sistema de distribuição e ao manejo do sistema.

Devido a importância da escolha de um coeficiente que seja sensível às variações operacionais, tão comuns nos sistemas de irrigação, é que Rodrigues et al. (1997, apud SOUZA, 2001) realizaram uma pesquisa visando avaliar a sensibilidade de alguns coeficientes de uniformidade a mudanças nos fatores operacionais. Os coeficientes utilizados foram:

- A) Benami e Hore (1962)
- B) Wilcox & Swailes (1947)
- C) Karmeli (1978)
- D) Christiansen (1942)
- E) Hart (1965)
- F) Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (KRUSE, 1978)

Com os resultados obtidos, Rodrigues et al. (1997, apud SOUZA, 2001) concluíram que o coeficiente A, proposto por Bernami e Hore (1962, apud SOUZA, 2001), foi o coeficiente mais sensível às mudanças dos fatores operacionais. O CUC, proposto por Christiansen, o UCH, proposto por Hart, e o UCL, proposto por Karmeli (1978, apud SOUZA, 2001), foram os coeficientes menos sensíveis a estas mudanças.

Segundo Coelho (1990), caso os valores coletados sigam uma distribuição normal, então o valor do CUC é igual ao valor do UH (Coeficiente de Hart).

Keller & Bliesner (1990, apud MUNDIM, 1996), apresentam uma compreensão prática das implicações da uniformidade de distribuição de água. Citam uma combinação de uniformidade de distribuição com área adequadamente irrigada para fornecer a eficiência de distribuição, apresentando as relações em

forma de uma tabela, válida para valores de CUC quando a distribuição de água segue um padrão normal. Por exemplo: para um CUC de 80%, supondo que se deseje irrigar adequadamente 75% da área, tem-se que a eficiência de distribuição seria 83%, ou seja, para cada 1 mm de lâmina que se deseja aplicar ao solo, deve-se aspergir $1/0,83=1,2$ mm de água. Já em um sistema que forneça CUC de 70%, para irrigar adequadamente o mesmo percentual da área, ter-se-ia uma eficiência de aplicação de 75%, ou seja, seriam necessários $1/0,75=1,33$ mm de água, ou aproximadamente 11% a mais.

Zocoler et al (1999), em um trabalho sobre eficiência e adequabilidade da irrigação de um pivô central concluíram que apesar da adequabilidade da irrigação ser um índice importante, seu valor analisado isoladamente não permite fazer inferências precisas sobre a mesma, devendo sempre ser acompanhado dos índices de eficiência de aplicação e eficiência de armazenamento.

Segundo Melo (1993) os custos com energia nos sistemas de irrigação representam a maior parte dos custos variáveis, podendo chegar até 70% dependendo do método utilizado. O aspecto energético na irrigação é de grande importância, principalmente em épocas de crise. Em algumas regiões e em determinadas épocas do ano pode até ocorrer sobrecarga do sistema com conseqüências, tais como falhas operacionais decorrentes de corte no fornecimento, entre outras. O principal fator de consumo de energia é o dimensionamento hidráulico dos sistemas de irrigação.

3.6 Transformação de dados

Segundo Campos (1983), quando algum dos requisitos para o emprego da estatística paramétrica — normalidade da distribuição dos erros, homogeneidade das variâncias, e aditividade dos efeitos dos fatores de variação — não puder ser preenchido pelos dados da sua amostra experimental, o pesquisador pode ainda tentar o recurso da transformação dos dados, antes de optar pela aplicação da estatística não-paramétrica. A transformação mais indicada geralmente coincide com aquela que apresentar a probabilidade mais elevada de a distribuição ser normal.

Segundo Silva et al. (2002), é sabido que os indicadores de desempenho da irrigação podem ser obtidos diretamente dos dados coletados, entretanto, a análise é mais robusta e completa quando são utilizados modelos ajustados aos

valores pontuais observados. Nesse sentido, vários modelos de distribuição estatística (uniforme, normal, lognormal, potencial, beta e gama) têm sido propostos para representar a distribuição da água aplicada por vários tipos de sistemas de irrigação. Hart & Reynolds (1965, apud SILVA et al. 2002) empregaram a distribuição normal na avaliação de desempenho da irrigação por aspersão, enquanto que Karmeli (1978, apud Silva et al. 2002) desenvolveu um modelo potencial para representar a distribuição da água infiltrada na irrigação por superfície. O modelo de distribuição estatística Beta foi reconhecido por Elliot et al. (1980, apud SILVA et al. 2002) como sendo bastante flexível para representar uma grande variedade de perfis de distribuição de água da irrigação; já Chaudry (1978, apud SILVA et al. 2002) utilizou a função Gama para representar uma variedade de perfis assimétricos de distribuição de água em sistemas de irrigação. Na irrigação por sulcos Silva & Hart (1992, apud Silva et al. 2002) propuseram um modelo potencial alternativo ao de Karmeli (1978, apud SILVA et al. 2002) para ser aplicado aos casos em que parte da área entre sulcos permanece, efetivamente, sem receber água da irrigação.

Segundo Steel & Torrie (1981 apud ZIMMERMANN, 2004, p.47.) a heterogeneidade dos erros do tipo irregular está associada ao fato de alguns tratamentos possuírem maior variabilidade que outros, sem qualquer aparente associação entre média e variância, e esta diferença pode ou não ser esperada, já que muitas vezes elas fazem parte da resposta do tratamento. Como alternativa de solução, pode-se eliminar da análise os dados ou tratamentos com variância muito discrepante.

De uma maneira geral, as diversas transformações de dados disponíveis estão associadas às distribuições de probabilidade e procuram tornar média e variância independentes.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado com sistemas de irrigação do tipo pivô central, em operação nos estados do Rio Grande do Sul e São Paulo, sendo destes 14 no primeiro estado e 19 no segundo. Os sistemas foram avaliados por suas características de dimensionamento e de instalação; por dois índices de uniformidade de distribuição de água, um índice de eficiência e, também, pelo tempo e forma de uso.

Este trabalho fundamentou-se em duas etapas básicas. A primeira foi a avaliação de desempenho do equipamento com levantamento de campo das características e a realização do ensaio de aspersão dos equipamentos, onde foram levantados todos os dados de instalação e funcionamento dos equipamentos, possíveis problemas no equipamento. Em um segundo momento foi realizado a aplicação do Modelo de Distribuição da Água Aplicada, desenvolvido por Silva et al. (2002), análise e discussão dos dados, onde foram confrontados dados de instalação e funcionamento com os dados de projeto.

4.1 Procedimento do levantamento de campo

Nos 33 equipamentos foi utilizada a mesma metodologia, atendendo os requisitos descritos na norma ABNT NBR 14244, sobre a Determinação da Uniformidade de Distribuição de Água para Pivôs Centrais, que segue:

O equipamento foi deslocado para a parte mais alta da área, para realizar as medidas das pressões, já que este é o ponto crítico do dimensionamento hidráulico do pivô central, e também com intuito de realizar o ensaio de precipitação neste mesmo local, para salientar ainda mais qualquer deficiência de pressão do equipamento (Figura 1).



Figura 1 – Disposição dos coletores de água em área irrigada por pivô central, na realização do teste de uniformidade

Fonte: Schons, R. L., Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, 2005

Foi aferido o relé percentual, que controla o tempo de funcionamento da última torre, através da medição do seu ciclo de abertura e fechamento, com o auxílio de um aparelho multímetro (multiteste), para o perfeito ajuste da velocidade do equipamento durante o ensaio.

Após, foi medida a velocidade de deslocamento da última torre, onde o equipamento foi regulado com o relé percentual em 100% (maior velocidade de deslocamento), sendo medido o tempo de deslocamento em 20 metros.

Foi instalada uma estação meteorológica da marca Micro Metos, para coleta dos dados climáticos durante o ensaio (velocidade do vento, temperatura, umidade).

Foram verificados visualmente os motoredutores, redutores de roda e pneus em toda a extensão do equipamento (Figura 2).



Figura 2 – Conjunto motoredutor e cardans de um sistema de irrigação por pivô central

Fonte: Schons, R. L., 2005

Foi ligado o bombeamento, onde foi medida a amperagem do motor, a tensão da rede de alimentação, nas três fases, a pressão de shutt-off, com o registro de saída da bomba totalmente fechado e a pressão de funcionamento contínuo da bomba (Figura 3).



Figura 3 – Conjunto motobomba de um sistema de irrigação por pivô central

Fonte: Schons, R. L., 2005

Foram medidas as diferenças de nível entre o nível da água e o centro do eixo do motor, configurando a altura de sucção, do bombeamento ao centro do equipamento e do centro ao ponto mais elevado da área irrigada.

A próxima verificação foi localizar os possíveis problemas e vazamentos na parte aérea, adutora, sucção, kit de aspersão, com o equipamento ligado em condições normais de funcionamento (Figura 4). Quando necessários foram realizados os reparos necessários, para que o ensaio pudesse retratar somente o desgaste do kit de aspersão, sendo que os reparos realizados foram anotados para o acompanhamento de cada pivô.



Figura 4 – Conjunto mangote de união de lance do equipamento de irrigação por pivô central

Fonte: Schons, R. L., 2005.

Todos os equipamentos utilizavam aspersores fixos, localizados a uma distância maior que 1,5 metros do solo e não possuíam dispositivos para irrigar os cantos.

Foram utilizados coletores de plástico, da marca Fabrimar, apoiados sobre hastes de 750mm de altura. Cada coletor tem 80mm de diâmetro e 102mm de altura, instalados com a seção de captação a aproximadamente 500mm da superfície do solo. Foram distribuídas duas linhas radiais de coletores uniformes,

com espaçamento regular e constante, do centro do pivô ao extremo da área irrigada, conforme Figura 5. A distância entre a saída do jato do emissor e a borda superior do coletor foi maior que 1,5 metros. A distância entre os dois últimos coletores das linhas não ultrapassou a 50 metros.

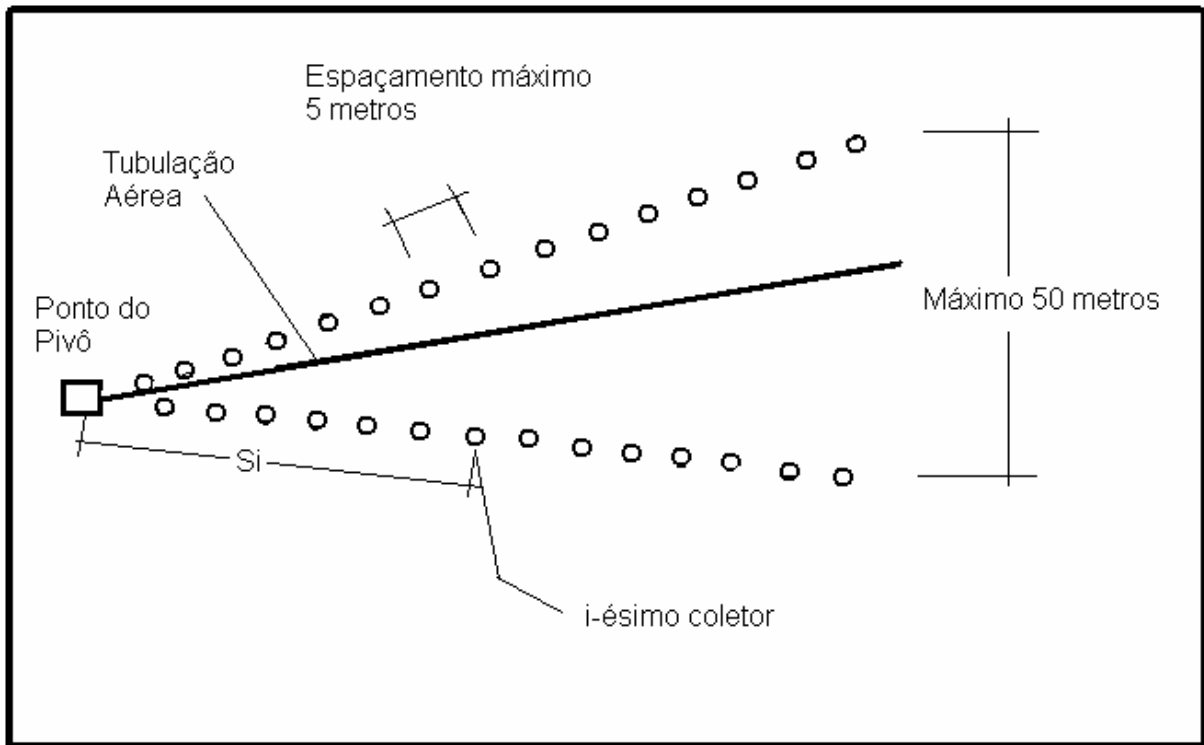


Figura 5 – Esquema da disposição e parâmetros dos coletores para a determinação da uniformidade de distribuição de água para pivôs centrais

Os dados coletados durante o ensaio foram:

- Volume de água: após a passagem completa do equipamento sobre as linhas de coletores, iniciou-se a leitura dos volumes com auxílio de uma proveta com capacidade de 250 ml.
- Climáticos: vento (velocidade) e a evaporação.
- Velocidade de giro do pivô central: os equipamentos possuem um mecanismo que possibilita diferentes regulagens de velocidade, propiciando a aplicação da irrigação com diferentes lâminas de água. Este mecanismo é um relé cíclico (temporizador) ou uma central programável no painel de comando, que controla a ação de liga/desliga do motor elétrico da última torre, de forma que pelo posicionamento do botão de regulagem ou pelo valor percentual de

entrada no painel, obtém-se diferentes tempos de funcionamento do motor.

- Medida de pressão: foram medidas as seguintes pressões no sistema:

na motobomba : medida a pressão com o sistema em funcionamento e o registro de pressão fechado (shutt-off) e, posteriormente, com o registro aberto;

no ponto do pivô: medida a pressão no tubo de subida no centro do pivô;

no último emissor : medida a pressão na saída do emissor.

Os equipamentos estavam posicionados no sentido do local mais alto da área irrigada, sendo esta a característica extrema de diferença de nível utilizada para o projeto hidráulico do equipamento.

- Consumo de energia no sistema: de acordo com a corrente elétrica, relacionado com a tensão da rede.
- Número de horas do equipamento: informação retirada do horímetro do painel de comando (caixa mestre) em cada pivô central.



Figura 6 – Horímetro do equipamento de irrigação por pivô central.

Fonte: Schons, R. L., 2005



Figura 7 – Procedimento de leitura dos dados dos coletores instalados para o teste de lâmina

Fonte: Schons, R. L., 2005

4.2 Procedimento de análise dos dados

Para cada pivô foi analisado seu nível de desempenho com dois índices de uniformidade e um de eficiência, e estes foram correlacionados com a quantidade de horas trabalhadas do equipamento, seu perfil de utilização e a velocidade da água encontrada na tubulação aérea, sendo que para cada item foram criados índices onde cada equipamento foi enquadrado.

Foi utilizada a metodologia de Modelagem da Distribuição da Água Aplicada desenvolvida por Silva et al. (2002) afim de transformar os dados, para se atingir uma análise mais robusta e completa dos dados coletados, a qual segue.

4.2.1 Definição do modelo utilizado

O modelo matemático utilizado para o ajuste das lâminas de água ordenadas de forma decrescente tem a seguinte formulação:

$$\hat{X} = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})(1 - a^n)^m \quad (1)$$

onde a : área relativa acumulada (adimensional); \hat{X} : lâmina de água ou vazão aplicada em função da área relativa acumulada; X_{\min} e X_{\max} : parâmetros ajustados

correspondentes, respectivamente, à lâmina ou às vazões mínima e máxima da água aplicada; m e n: parâmetros adimensionais de ajuste.

Para facilitar o processo de dedução das fórmulas necessárias ao cálculo dos indicadores de desempenho da irrigação, a variável \widehat{X} do modelo utilizado (Equação 1) será reduzida a uma forma adimensional, utilizando a seguinte definição:

$$x = \frac{\widehat{X} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

onde x : lâmina ou vazão reduzida, variando no intervalo de 0 a 1.

Utilizando essa definição (Equação 2), o modelo utilizado (Equação 1) fica reduzido à seguinte expressão:

$$x = (1 - a^n)^m \quad (3)$$

4.2.2 Ajuste dos parâmetros do modelo

Uma vez ordenado os valores de lâmina ou vazão de água aplicada do sistema de irrigação, em função dos seus respectivos valores de fração de área acumulada, o modelo utilizado deve ser, então ajustado aos dados observados para obtenção dos parâmetros representativos. Como o modelo utilizado (Equação 1) é não linear, o procedimento de ajuste para determinação dos seus parâmetros (X_{\min} , X_{\max} , m e n) é iterativo, ou seja, partindo-se de uma estimativa inicial, o processo de cálculo deverá, em cada iteração, melhorar essas estimativas, até encontrar um conjunto de parâmetros que resultem na menor soma de quadrados entre os valores observados e calculados do modelo. Isso significa que o procedimento adotado deve minimizar a seguinte função-objetivo:

$$SQ = \sum_{i=1}^N (X_i - \widehat{X}_i)^2 \quad (4)$$

Onde: SQ: soma de quadrados de erros entre os valores observados e calculados; i: número de ordem das lâminas de água ou das vazões observadas; N: número total de dados observados; X_i : lâmina de água ou vazão observada para

cada fração de área acumulada; \widehat{X}_i : lâmina de água ou vazão calculada para cada fração de área acumulada.

Foi utilizada a rotina “Solver” da planilha “Excel” que se encontra disponível entre as ferramentas contempladas por esse aplicativo. Foi utilizado o método de resolução de equações de Newton, do qual segue o algoritmo e parâmetros utilizados:

Na solução de sistemas de equações algébricas não-lineares pelo método de Newton, admite-se que dada uma configuração inicial, o problema consiste em se determinar uma correção para o problema localmente linear aproximando-se as parcelas não lineares através de séries de Taylor de ordem superior truncada. Para ilustrar o método, considere o seguinte sistema:

$$N(d) = F \quad (5)$$

A cada iteração, dada uma solução aproximada d_i calcula-se a correção Δd_i , tal que

$$N(d^i + \Delta d^i) \cong F \quad (6)$$

onde Δd_i pode ser obtido a partir da seguinte expansão em série de Taylor em torno de d_i

$$N(d^i + \Delta d^i) \cong N(d^i) + \left. \frac{\partial N}{\partial d} \right|_{d^i} \Delta d^i \quad (7)$$

substituindo-se a equação 7 na equação 6, e fazendo $r^i = F - N(d^i)$ o resíduo da iteração não-linear, obtém-se:

$$\left. \frac{\partial N}{\partial d} \right|_{d^i} \Delta d^i = r^i \quad (8)$$

onde a atualização da solução é feita por:

$$d^{i+1} = d^i + \Delta d^i \quad (9)$$

No procedimento descrito acima, a derivada do lado esquerdo da equação é comumente chamada de Jacobiano de N ou matriz de rigidez tangente em problemas multidimensionais, e será referida posteriormente por:

$$K_T(d^i) = \left. \frac{\partial N}{\partial d} \right|_{d^i} \quad (10)$$

O método de Newton conforme definido pelas equações (8) e (9) converge quadraticamente, desde que observados os seguintes aspectos:

- A solução inicial d_0 deve estar próxima o suficiente da solução do sistema, caso contrário, o método diverge, a não ser que sejam tomadas providências no sentido de contornar tal problema;
- A inversa de K_T existe em todas as iterações necessárias até a convergência ser atingida.

Caso os termos correspondentes às derivadas numéricas que formam a matriz de rigidez tangente não sejam avaliados, o método de Newton recai no método de iterações sucessivas (IS).

O método de Newton Convencional analisado, consiste em aplicar os procedimentos descritos pelas equações (8) e (9) recursivamente até a convergência ser atingida conforme pode ser observado no algoritmo seguinte.

Algoritmo para o método de Newton Convencional:

1. $ITER = 0$
2. Norma residual da solução inicial : $\|\Gamma^0\|$
3. Enquanto $\|\Gamma^{ITER}\|/\|\Gamma^0\| \geq T_{RES}$ e $\|\Delta d^{ITER}\|/\|d^{ITER}\| \geq T_{\Delta d}$ fazer:
4. Atualiza contador de iterações : $ITER \leftarrow ITER + 1$
5. Avaliar matriz tangente : $K_T(d^{ITER})$
6. Resolver sistema linear : $\Delta d^{ITER} = K_T^{-1}(d^{ITER}) \bullet \Gamma^{ITER}$
7. Atualizar solução : $d^{ITER} = d^{ITER-1} + \Delta d^{ITER}$
8. Avaliar resíduo : $\Gamma^{ITER} = F - N(d^{ITER})$
9. Avaliar norma residual da solução : $\|\Gamma^{ITER}\|$
10. Avaliar norma residual do incremento de solução : $\|\Delta d^{ITER}\|$
11. Avaliar norma da solução : $\|d^{ITER}\|$
12. Fim enquanto

Onde : T_{RES} = Tolerância à norma do resíduo não-linear

$T_{\Delta d}$ = Tolerância ao incremento ou direção de busca não-linear

Como parâmetros: Número máximo de iterações = 100

Precisão = 0,000001

Tolerância = 5%

Convergência = 0,0001

A fração de área, representada em cada coletor, varia em função da distância em que ele se encontra do ponto do pivô, a qual pode ser calculada da seguinte maneira:

$$fa_i = \frac{2\pi e d_i}{2\pi e (d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_N)}$$

$$fa_i = \frac{d_i}{(d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_N)} \quad (11)$$

Onde: e: constante correspondente ao espaçamento entre coletores; i: número de ordem de cada coletor; d_i: distância do coletor de ordem i, em relação ao ponto do pivô; fa_i: fração de área, associada a um coletor de ordem i, em relação à área total; N: número de ordem do coletor mais distante do ponto do pivô. Nessa definição, pode ser, facilmente, demonstrado que o termo 2πed_i é exatamente igual a área da coroa circular representada pelo coletor de ordem i, o qual se encontra posicionado na circunferência de raio d_i.

A área relativa acumulada, correspondente a cada coletor, pode ser calculada, somando-se, seqüencialmente, a partir do primeiro até o coletor desejado, cada fração de área correspondente, definida pela Equação 11, resultando na seguinte fórmula:

$$a_k = \frac{1}{(d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_N)} \sum_{i=1}^k d_i \quad (12)$$

Onde k: número de ordem de um coletor qualquer e a_k: área relativa acumulada, associada a um coletor de ordem k.

4.2.3 Função de distribuição de probabilidade da água aplicada

O modelo utilizado, em sua forma reduzida (Equação 1), pode ser representado, em termos de uma função de distribuição, nos moldes das funções de distribuição de probabilidade tradicionais (uniforme, normal, lognormal, gama, beta,

entre outras), reconhecendo que o perfil de água varia na área irrigada em torno de um valor médio, com determinado grau de dispersão.

Nessa associação, a fração de área acumulada (Equação 3) representa a variável aleatória e as lâminas ou vazões coletadas, ordenadas de forma decrescente e reduzidas na escala de 0 a 1, representam a variável de distribuição cumulativa de probabilidade.

4.2.4 Distribuição cumulativa de probabilidade

Para expressar a Equação 3 em termos de uma função de distribuição cumulativa de probabilidade (fdc), nos moldes de uma função de distribuição estatística, faz-se necessário, reescreve-la da seguinte forma:

$$F(a) = \begin{cases} 0 & \text{se...} a < 0 \\ 1 - (1 - a^n)^m & \text{se...} 0 < a < 1 \\ 1 & \text{se...} a \geq 1 \end{cases} \quad (13)$$

A reformulação da Equação 3, introduzindo a diferença em relação a equação 1, é necessária para transformar a função $F(a)$ de decrescente para forma crescente, no intervalo de 0 a 1, com a variável a no domínio $-h$ a $+h$.

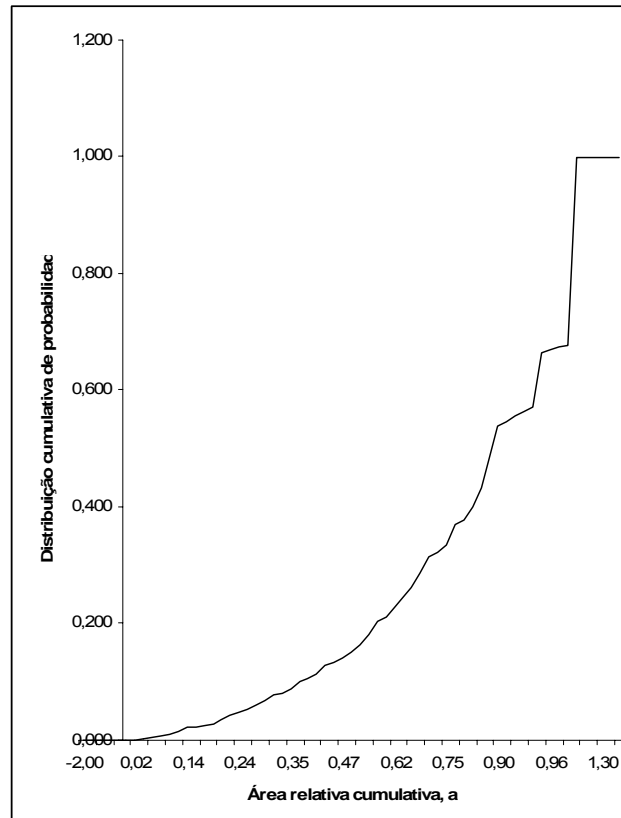


Figura 8 - Função de distribuição cumulativa de probabilidade, associada às lâminas de água aplicada por um sistema de irrigação do tipo pivô central, correspondente ao modelo utilizado.

4.2.5 Densidade de probabilidade da distribuição

A função densidade de probabilidade da distribuição estatística (fdp) pode ser derivada a partir de sua contraparte fdc, sabendo que:

$$f(a) = \frac{dF(a)}{da} \quad (14)$$

Derivando-se a fdc (Equação 13), obtém-se o seguinte:

$$f(a) = \frac{d}{da} [1 - (1 - a^n)^m]$$

$$f(a) = -m(1 - a^n)^{(m-1)} \frac{d}{da} (1 - a^n) \quad (15)$$

$$f(a) = m(1 - a^n)^{(m-1)} (n)a^{(n-1)}$$

Para atender aos requisitos de uma função de probabilidade de distribuição, faz-se necessário que:

$$F(a) = \begin{cases} 0 & \text{se...} a \leq 0 \\ m(1-a^n)^{(m-1)}(n)a^{(n-1)} & \text{se...} 0 < a < 1 \\ 1 & \text{se...} a \geq 1 \end{cases} \quad (16)$$

A qual deve estar sujeita à seguinte condição:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(a) da = 1 \quad (17)$$

Esse requisito pode ser facilmente verificado, integrando $f(a)$ sobre seu domínio (Equação 16), da seguinte maneira:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(a) da = \int_0^1 f(a) da$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(a) da = \int_0^1 m(1-a^n)^{(m-1)}(n)a^{(n-1)} da \quad (18)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(a) da = m \int_0^1 (1-a^n)^{(m-1)} na^{(n-1)} da$$

Aplicando a técnica de substituição de variáveis para integração da Equação 18, tem-se o seguinte:

$$\begin{aligned} u &= an & a = 0 & \Rightarrow u = 0 \\ du &= n an^{-1} da & a = 1 & \Rightarrow u = 1 \end{aligned} \quad (19)$$

Introduzindo as igualdades da Equação 19 na Equação 18, tem-se como resultado a seguinte solução:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(a) da = m \int_0^1 (1-a^n)^{(m-1)} na^{(n-1)} da$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(a) da = m \int_0^1 (1-u)^{(m-1)} du \quad (20)$$

A integração da Equação 20 pode ser alcançada, procedendo-se a mais uma substituição de variáveis, utilizando as seguintes igualdades:

$$\begin{aligned} z &= 1 - u & u = 0 & \Rightarrow z = 1 \\ dz &= - du & u = 1 & \Rightarrow z = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Aplicando essa técnica de substituição de variáveis na Equação 20, tem-se finalmente o seguinte:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(a) da = m \int_1^0 z^{(m-1)} (-dz)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(a) da = m \int_0^1 z^{(m-1)} dz$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(a) da = m \frac{z^m}{m} \Big|_0^1$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(a) da = 1$$
(22)

Na Figura 9, representa-se a referida função de distribuição de probabilidade (Equação 16), utilizando os parâmetros m e n acima determinados. Essa função possui grande variedade de formatos, dependendo dos valores dos parâmetros m e n encontrados.

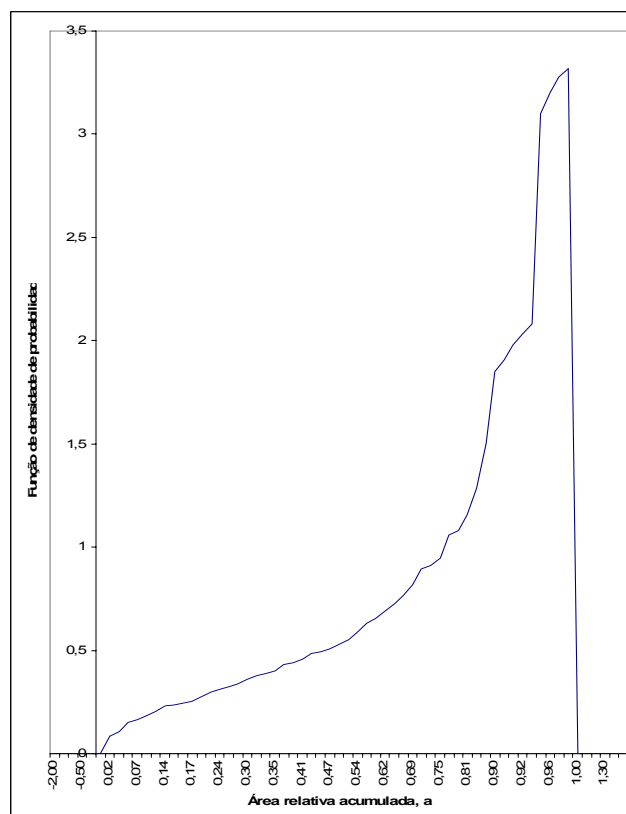


Figura 9 - Função de densidade de probabilidade da distribuição, associada às lâminas de água aplicada por um sistema de irrigação do tipo pivô central, correspondente ao modelo de ajuste utilizado.

Por causa da natureza aleatória associada a qualquer variável de probabilidade, não é possível prever, com exatidão, o valor que ela assumirá em um dado evento. Entretanto, é possível descrever seu comportamento em termos dos parâmetros característicos de cada modelo. Dois dos principais parâmetros característicos de um modelo de probabilidade são média e variância. A média de um conjunto de valores observados indica a tendência central do conjunto de dados, e a variância indica o seu grau de dispersão.

4.2.6 Média da função densidade de probabilidade da distribuição

A média de uma função densidade de distribuição $f(a)$ pode ser definida da seguinte maneira:

$$m_a = \int_{-\infty}^{\infty} af(a)da \quad (23)$$

Introduzindo a expressão que define $f(a)$ de acordo com a Equação 16 e observando que ela só possui valores significativos no intervalo de 0 a 1, tem-se o seguinte:

$$m_a = \int_0^1 am(1-a^n)^{(m-1)} na^{(n-1)} da \quad (24)$$

Para a solução da referida média, podem-se utilizar as seguintes substituições:

$$\begin{aligned} u = a^n &\Leftrightarrow a = u^{1/n} & a = 0 &\Rightarrow u = 0 \\ du = n a^{n-1} da & & a = 1 &\Rightarrow u = 1 \end{aligned} \quad (25)$$

Realizando as devidas substituições na Equação 24 dos termos da Equação 25, tem-se o seguinte:

$$m_a = m \int_0^1 u^{1/n} (1-u)^{(m-1)} du \quad (26)$$

A integral da Equação 26 pode ser resolvida em termos da função Beta completa, reconhecendo que sua definição pode ser expressa da seguinte maneira:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 u^{\alpha-1} (1-u)^{\beta-1} du \quad (27)$$

Em decorrência disso, a média da função densidade (Equação 26) pode ser dada, em termos de função Beta, pela seguinte fórmula:

$$m_a = mB\left(\frac{1}{n} + 1, m\right) \quad (28)$$

A função Beta, por sua vez, pode ser representada em termos da função Gama da seguinte maneira:

$$B(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha + \beta)} \quad (29)$$

De modo que, a média da variável aleatória m_a (Equação 28) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$m_a = m \frac{\Gamma\left(\frac{1}{n} + 1\right)\Gamma(m)}{\Gamma\left(\frac{1}{n} + m + 1\right)}$$

$$m_a = m \frac{\left(\frac{1}{n}\right)\Gamma\left(\frac{1}{n}\right)\Gamma(m)}{\left(\frac{1}{n} + m\right)\Gamma\left(\frac{1}{n} + m\right)} \quad (30)$$

$$m_a = \left(\frac{m}{1 + nm}\right) \frac{\Gamma\left(\frac{1}{n}\right)\Gamma(m)}{\Gamma\left(\frac{1}{n} + m\right)}$$

Reconhecendo que $\Gamma(\alpha+1) = \alpha \Gamma(\alpha) + 1$ (ABRAMOWITZ & STEGUN, 1972, apud SILVA et al. 2002).

Para este trabalho, os resultados da função Gama foram obtidos, utilizando a planilha “Excel”, reconhecendo, por exemplo, que $\Gamma(m) = \text{EXP}(\text{LNGAMA}(m))$, onde $\text{EXP}()$ e $\text{LNGAMA}()$ são funções do programa “Excel”.

4.2.7 Variância da função densidade de probabilidade da distribuição

A variância da função densidade de probabilidade de distribuição $f(a)$ pode ser definida da seguinte maneira (BECK & ARNOLD, 1977, apud SILVA et al. 2002)

$$\begin{aligned}
\sigma_a^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} (a - m_a)^2 f(a) da \\
\sigma_a^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} (a^2 - 2am_a + m_a^2) f(a) da \\
\sigma_a^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} a^2 f(a) da - 2m_a \int_{-\infty}^{\infty} af(a) da + m_a^2 \\
\sigma_a^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} a^2 f(a) da - 2m_a m_a + m_a^2 \\
\sigma_a^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} a^2 f(a) da - m_a^2
\end{aligned} \tag{31}$$

Introduzindo $f(a)$ definida pela Equação 16 e observando que ela só possui valores significativos no intervalo de 0 a 1, tem-se o seguinte:

$$\sigma_a^2 = \int_0^1 a^2 m (1 - a^n)^{(m-1)} n a^{(n-1)} da - m_a^2 \tag{32}$$

Utilizando as substituições indicadas pelas igualdades na Equação 25, na Equação 31, tem-se o seguinte resultado simplificado:

$$\begin{aligned}
\sigma_a^2 &= m \int_0^1 u^{\frac{2}{n}} (1 - u)^{(m-1)} du - m_a^2 \\
\sigma_a^2 &= m B\left(\frac{2}{n} + 1, m\right) - m_a^2
\end{aligned} \tag{33}$$

Introduzindo a definição da função Beta em termos da função Gama, tem-se que:

$$\begin{aligned}
\sigma_a^2 &= m \frac{\Gamma\left(\frac{2}{n} + 1\right) \Gamma(m)}{\Gamma\left(\frac{2}{n} + m + 1\right)} - m_a^2 \\
\sigma_a^2 &= \frac{2m}{(2 + mn)} \frac{\Gamma\left(\frac{2}{n}\right) \Gamma(m)}{\Gamma\left(\frac{2}{n} + m\right)} - m_a^2
\end{aligned} \tag{34}$$

É importante salientar que seria desejável que a variância fosse definida em termos de uma expressão simples, descrita diretamente pelos parâmetros do modelo, para que fosse de utilidade na construção, a partir da média e da variância, da função de probabilidade resultante. Ou seja, uma vez conhecidos os dados observados e calculando sua média e variância, os parâmetros do modelo estariam automaticamente determinados, o que não é o caso dessa formulação matemática. É claro que, com os recursos mais facilmente disponíveis das ferramentas de regressão não linear, a exemplo da rotina “Solver” do programa “Excel” e outros programas, essa limitação pouco importa. No caso do modelo utilizado, a alternativa é calcular seus parâmetros de ajuste, por meio de regressão não linear, e, a partir deles, determinar os demais parâmetros derivados.

4.2.8 Aplicação do modelo utilizado na análise de desempenho da irrigação

Uma vez ajustado o modelo aos dados observados, então todos os indicadores de desempenho da irrigação podem ser diretamente calculados a partir do perfil de água modelado. Essa abordagem é altamente desejável conforme preconiza Solomon (1983, apud Silva et al. 2002). Nesse caso, o modelo utilizado será utilizado como base de desenvolvimento das principais relações necessárias na análise de desempenho da irrigação, utilizando os valores de m , n , X_{\max} e X_{\min} .

4.2.9 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

De maneira geral, o valor de CUC, que reflete a relação entre a média absoluta dos desvios e a média geral aplicada (CHRISTIANSEN, 1942), pode ser definido da seguinte forma:

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{|\overline{D}|}{\overline{X}} \right) \quad (35)$$

onde $|\overline{D}|$: média dos desvios absolutos e \overline{X} : média geral do perfil de água aplicada. A seguir, serão apresentadas as deduções das fórmulas de cálculo e suas exemplificações para os termos $|\overline{D}|$ e \overline{X} , necessários à determinação do CUC.

4.2.10 Lâmina média aplicada

É importante lembrar as definições de lâmina estabelecidas pelas Equações 1 e 3. A primeira definição (Equação 1) considera a variável \hat{X} na unidade em que foi medida, enquanto a segunda definição (Equação 3) considera essa mesma variável expressa em sua forma reduzida, representada por x . Por isso, a média da lâmina aplicada pode ser deduzida, quanto na sua forma reduzida, representada por \bar{x} , quanto na sua forma absoluta, representado por \bar{X} .

Desse modo, partindo-se da Equação 3, a fórmula para o cálculo da média reduzida do perfil de água aplicada pode ser derivada, considerando a seguinte definição:

$$\bar{x} = \int_0^1 (1 - a^n)^m da \quad (36)$$

Fazendo uso das igualdades indicadas na Equação 25 para realizar as substituições desejadas, então o valor de \bar{x} se transforma na seguinte integração:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \int_0^1 u^{\frac{(1-n)}{n}} (1-u)^m du \quad (37)$$

Finalmente, considerando a definição da função Beta dada pela Equação 27, a Equação 37, pode ser expressa pela seguinte fórmula:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} B\left(\frac{1-n}{n} + 1, m + 1\right)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} B\left(\frac{1}{n}, m + 1\right) \quad (38)$$

Por sua vez, tomando-se a definição da função Beta apresentada na Equação 29, em termos da função Gama, tem-se que:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \frac{\Gamma\left(\frac{1}{n}\right)\Gamma(m+1)}{\Gamma\left(\frac{1}{n} + m + 1\right)}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \frac{\Gamma\left(\frac{1}{n}\right)m\Gamma(m)}{\left(\frac{1}{n} + m\right)\Gamma\left(\frac{1}{n} + m\right)}$$
(39)

$$\bar{x} = \frac{m}{(1 + mn)} \frac{\Gamma\left(\frac{1}{n}\right)\Gamma(m)}{\Gamma\left(\frac{1}{n} + m\right)}$$

Fazendo uso da propriedade $\Gamma(\alpha + 1) = \alpha\Gamma(\alpha)$ da função Gama (ABRAMOWITZ & STEGUN, 1972, apud SIVA et al. 2002) nas simplificações acima, o resultado encontrado é exatamente igual à fórmula de média derivada na Equação 30.

A fórmula para o cálculo da média geral \bar{X} , expressa na unidade de medida da água aplicada, pode ser derivada, integrando a variável \hat{X} , definida pela Equação 1, no domínio não nulo da variável a (0 a 1), da seguinte maneira:

$$\bar{X} = \int_0^1 \left[X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})(1 - a^n)^m \right] da$$

$$\bar{X} = \int_0^1 X_{\min} da + (X_{\max} - X_{\min}) \int_0^1 (1 - a^n)^m da$$
(40)

$$\bar{X} = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})\bar{x}$$

Esse resultado é obtido, utilizando a condição do integrando X_{\min} ser constante na primeira integral e o \bar{x} ser a solução da segunda integral (Equação 36).

4.2.11 Média dos desvios absolutos

Para o cálculo da média dos desvios absolutos, a qual representa a média dos desvios dos valores da variável reduzida em relação aos valores observados, também será empregada a lógica de primeiro calcular a média reduzida dos desvios absolutos \bar{d} , para depois calcular, a partir dela, a média dos desvios absolutos \bar{D} , na unidade de medida em que foi realizada a coleta dos dados.

A média reduzida dos desvios pode ser derivada, utilizando a seguinte definição, encontrada em Warrick (1983, apud SILVA et al. 2002):

$$|\bar{d}| = \int_0^{a_L} (x - \bar{x}) da + \int_{a_L}^1 (\bar{x} - x) da \quad (41)$$

É importante ressaltar que ao se ajustar qualquer modelo aos dados de lâmina de água coletada, utilizando o método de regressão, o processo trata de dividir igualmente as áreas em excesso e em deficiência, minimizando a soma dos quadrados dos erros entre os valores observados e calculados. Nessa modelagem, o termo a_L representa exatamente o valor específico da área relativa acumulada, no qual o valor de \hat{X} do perfil modelado coincide com a lâmina média de água aplicada, ou seja, é o ponto onde o perfil deixa de ser excedente e passa a ser deficiente.

A fórmula de cálculo do valor de a_L pode ser definida diretamente da Equação 3, considerando que $x = \bar{x}$ para $a = a_L$, da seguinte maneira:

$$a_L = \left(1 - \bar{x}^{1/m}\right)^{1/n} \quad (42)$$

A Equação 41 pode ser resolvida, empregando o seguinte desenvolvimento:

$$|\bar{d}| = \int_0^{a_L} (x - \bar{x}) da + \int_{a_L}^1 (\bar{x} - x) da$$

$$|\bar{d}| = \int_0^{a_L} x da - \int_0^{a_L} \bar{x} da + \int_0^1 \bar{x} da - \int_{a_L}^1 \bar{x} da - \int_0^{a_L} x da + \int_{a_L}^1 x da$$

$$|\bar{d}| = \int_0^{a_L} x da - \int_0^{a_L} \bar{x} da + \int_0^1 \bar{x} da - \int_0^1 x da - \int_0^{a_L} \bar{x} da + \int_0^{a_L} x da \quad (43)$$

$$|\bar{d}| = \int_0^{a_L} x da - \int_0^{a_L} \bar{x} da + \bar{x} - \bar{x} - \int_0^{a_L} \bar{x} da + \int_0^{a_L} x da$$

$$|\bar{d}| = 2 \int_0^{a_L} x da - 2 \int_0^{a_L} \bar{x} da$$

$$|\bar{d}| = 2 \int_0^{a_L} x da - 2 \bar{x} a_L$$

Substituindo a variável x por sua definição (Equação 3), a Equação 43 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$|\bar{d}| = 2 \int_0^{a_L} x da - 2 \bar{x} a_L$$

$$|\bar{d}| = 2 \int_0^{a_L} (1 - a^n)^m da - 2 \bar{x} a_L \quad (44)$$

Utilizando as substituições pertinentes indicadas na Equação 45:

$$u = a^n \Rightarrow a = u^{1/n} \text{ se } a = 0 \Rightarrow u = 0; a = a_L \Rightarrow u = (a_L)^n \quad (45)$$

$$du = n a^{n-1} da \quad du = n u^{\frac{(n-1)}{n}} da \Rightarrow da = \frac{1}{n} u^{\frac{(1-n)}{n}} du$$

Tem-se como resultado para Equação 44 a seguinte expressão:

$$|\bar{d}| = 2 \int_0^{a_L} (1 - a^n)^m da - 2 \bar{x} a_L$$

$$|\bar{d}| = \frac{2}{n} \int_0^{a_L^n} u^{\frac{(1-n)}{n}} (1 - u)^m du - 2 \bar{x} a_L \quad (46)$$

A integral resultante da Equação 46 pode ser expressa em termos da função Beta incompleta, aplicando a seguinte definição encontrada em Abramowitz & Stegun (1972, apud SILVA et al. 2002):

$$B_\lambda(\alpha, \beta) = \int_0^\lambda u^{\alpha-1} (1-u)^{\beta-1} du \quad (47)$$

De forma que, a Equação 46 resulta em:

$$\begin{aligned}
|\bar{d}| &= \frac{2}{n} \int_0^{a_L^n} u^{\frac{(1-n)}{n}} (1-u)^m du - 2\bar{x}a_L \\
|\bar{d}| &= \frac{2}{n} B_{a_L^n} \left(\frac{(1-n)}{n} + 1, m + 1 \right) - 2\bar{x}a_L \\
|\bar{d}| &= 2 \left[\frac{1}{n} B_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) - \bar{x}a_L \right]
\end{aligned} \tag{48}$$

É importante salientar que existe uma relação entre a função Beta incompleta e a função Beta completa, expressa da seguinte maneira (ABRAMOWITZ & STEGUN, 1972, apud SILVA et al. 2002):

$$I_\lambda(a, b) = \frac{B_\lambda(\alpha, \beta)}{B(\alpha, \beta)} = \frac{\int_0^\lambda u^{\alpha-1} (1-u)^{\beta-1} du}{\int_0^1 u^{\alpha-1} (1-u)^{\beta-1} du} \tag{49}$$

De modo que, para $\lambda = a_L^n$, $\alpha = \frac{1}{n}$ e $\beta = m + 1$, tem-se:

$$B_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}; m - 1 \right) = I_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) B \left(\frac{1}{n}; m + 1 \right) \tag{50}$$

Substituindo a Equação 50 na Equação 48 e considerando a definição de \bar{X} expressa pela Equação 38, tem-se o seguinte resultado:

$$\begin{aligned}
|\bar{d}| &= 2 \left[\frac{1}{n} B \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) I_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}; m + 1 \right) - \bar{x}a_L \right] \\
|\bar{d}| &= 2 \left[\bar{x} I_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) - \bar{x}a_L \right] \\
|\bar{d}| &= 2\bar{x} \left[I_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) - a_L \right]
\end{aligned} \tag{51}$$

Segundo Abramowitz & Stegun (1972, apud SILVA et al. 2002), a função Beta incompleta se relaciona com a função de distribuição F da seguinte maneira:

$$I_\lambda(\alpha, \beta) = DISTF\{f; 2\beta; 2\alpha\}$$

$$f = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{1-\lambda}{\lambda} \right) \tag{52}$$

onde $DISTF()$ é a função estatística da planilha eletrônica “Excel” que retorna um valor da Distribuição F, associado aos parâmetros $(f; 2\beta; 2\alpha)$.

De modo que, a Equação 51 pode ser expressa da seguinte maneira:

$$|\bar{d}| = 2\bar{x}\{DISTF[f; 2(m+1); 2(1/n)] - a_L\} \quad (53)$$

Para se obter a expressão que transforma $|\bar{d}|$ na média dos desvios $|\bar{D}|$, é necessário, primeiramente, considerar a seguinte definição:

$$|\bar{D}| = \int_0^{a_L} (\hat{X} - \bar{X}) da + \int_{a_L}^1 (\bar{X} - \hat{X}) da$$

$$|\bar{D}| = 2 \int_0^{a_L} \hat{X} da - 2\bar{X}a_L \quad (54)$$

Substituindo os termos \hat{X} e \bar{X} da Equação 54 por suas definições decorrentes da Equação 1 e considerando, também, a definição de x expressa pela Equação 36, tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$|\bar{D}| = 2 \int_0^{a_L} \hat{X} da - 2\bar{X}a_L$$

$$|\bar{D}| = 2 \int_0^{a_L} [X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})(1 - a^n)^m] da - 2[X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})(1 - a_L^n)^m] a_L$$

$$|\bar{D}| = 2 \int_0^{a_L} X_{\min} da + 2(X_{\max} - X_{\min}) \int_0^{a_L} (1 - a^n)^m da - 2X_{\min} a_L - 2(X_{\max} - X_{\min})(1 - a_L^n)^m a_L$$

$$|\bar{D}| = 2X_{\min} a_L + (X_{\max} - X_{\min}) \int_0^{a_L} 2(1 - a^n)^m da - 2X_{\min} a_L - 2(X_{\max} - X_{\min}) \bar{x} a_L$$

$$|\bar{D}| = (X_{\max} - X_{\min}) \left[2 \int_0^{a_L} (1 - a^n)^m da - 2\bar{x} a_L \right] \quad (55)$$

Reconhecendo que o termo em colchete é exatamente a fórmula dada pela Equação 44, então a Equação 55 pode ser simplificada na seguinte expressão:

$$|\bar{D}| = (X_{\max} - X_{\min}) |\bar{d}| \quad (56)$$

4.2.12 Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)

Outro indicador de uniformidade bastante utilizado na avaliação de sistemas de irrigação é o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição que se baseia na relação entre a média do quartil inferior e a média geral aplicada (DAVIS, 1966, apud SILVA et al. 2002).

Para essa determinação, é necessário primeiramente derivar a fórmula de cálculo da média do quartil inferior, uma vez que a média geral já foi desenvolvida anteriormente (Equação 40).

Expressando a definição do CUD matematicamente, tem-se o seguinte:

$$CUD = 100 \left(\frac{\overline{X}_q}{\overline{X}} \right) \quad (57)$$

onde \overline{X}_q : média, em relação ao quartil inferior, dos valores de água aplicada.

4.2.13 Lâmina média do quartil inferior

À semelhança da abordagem empregada no cálculo da média geral, aqui também, será empregada a idéia da média reduzida, ou seja, primeiro será calculada a média reduzida do quartil inferior e, posteriormente, a média do quartil inferior, propriamente dita.

A média reduzida do quartil inferior pode ser encontrada, seguindo a definição dada por Warrick (1983, apud SILVA et al. 2002), expressa da seguinte maneira:

$$\overline{x}_q = \frac{\int_{\frac{3}{4}}^1 x da}{\left(1 - \frac{3}{4}\right)}$$

$$\overline{x}_q = 4 \int_{\frac{3}{4}}^1 x da \quad (58)$$

Introduzindo a definição de x da Equação 3, na Equação 58, tem-se que:

$$\bar{x}_q = 4 \int_{\frac{3}{4}}^1 (1-a^n)^m da \quad (59)$$

Para facilitar a integração desta Equação 59 e antecipando ser sua solução expressa em termos da função Beta completa e incompleta, serão realizadas as seguintes transformações:

$$\begin{aligned} \bar{x}_q &= 4 \int_{\frac{3}{4}}^1 (1-a^n)^m da \\ &= 4 \left[\int_0^1 (1-a^n)^m da - \int_0^{\frac{3}{4}} (1-a^n)^m da \right] \end{aligned} \quad (60)$$

Pelo que já foi demonstrado anteriormente (Equações 36-38), a solução da primeira integral resulta na função Beta completa, enquanto a segunda integral resulta na função Beta Incompleta (Equações 46-51), de modo que a solução da Equação 60 poderá ser encontrada empregando o seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned} \bar{x}_q &= 4 \left[\int_0^1 (1-a^n)^m da - \int_0^{\frac{3}{4}} (1-a^n)^m da \right] \\ &= 4 \left[\frac{1}{n} B\left(\frac{1}{n}, m+1\right) - \frac{1}{n} B_{\left(\frac{3}{4}\right)^n}\left(\frac{1}{n}, m+1\right) \right] \\ &= 4 \left[\frac{1}{n} B\left(\frac{1}{n}, m+1\right) - I_{\left(\frac{3}{4}\right)^n}\left(\frac{1}{n}, m+1\right) \frac{1}{n} B\left(\frac{1}{n}, m+1\right) \right] \\ &= 4 \left[\frac{1}{n} B\left(\frac{1}{n}, m+1\right) \right] \left\{ 1 - I_{\left(\frac{3}{4}\right)^n}\left(\frac{1}{n}, m+1\right) \right\} \end{aligned} \quad (61)$$

Reconhecendo que a função Beta incompleta pode ser expressa em termos da função de distribuição F (Equação 52) e considerando o resultado dado pela Equação 38, o valor de x_q pode ser, então, reduzido à seguinte fórmula:

$$\bar{x}_q = 4\bar{x} \{1 - DISTF[f; 2(m+1); 2(1/n)]\} \quad (62)$$

Uma vez conhecido o valor de x_q , a média do quartil inferior X_q pode ser, então, derivada, considerando a definição de \hat{X} na sua forma absoluta (Equação 1) e realizando os seguintes passos:

$$\bar{x}_q = 4 \int_{\frac{3}{4}}^1 \left[X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})(1-a^n)^m \right] da$$

$$\begin{aligned}
&= 4 \left\{ \int_0^1 \left[X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})(1 - a^n)^m \right] da - \int_0^{3/4} \left[X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})(1 - a^n)^m \right] da \right\} \\
&= 4 \left\{ X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) \int_0^1 (1 - a^n)^m da - \frac{3}{4} X_{\min} - (X_{\max} - X_{\min}) \int_0^{3/4} (1 - a^n)^m da \right\} \\
&= 4 \left\{ X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) \left[\left(\frac{1}{n} \right) B \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) \right] - \frac{3}{4} X_{\min} - (X_{\max} - X_{\min}) \left(\frac{1}{n} \right) B_{(3/4)^n} \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) \right\} \\
&= 4 \left\{ X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) \left[\left(\frac{1}{n} \right) B \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) \right] - \frac{3}{4} X_{\min} - (X_{\max} - X_{\min}) I_{(3/4)^n} \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) \frac{1}{n} B \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) \right\} \\
&= 4 \left\{ \frac{1}{4} X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) \left[\frac{1}{n} B \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) \right] \left[1 - I_{(3/4)^n} \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) \right] \right\} \\
&= \left\{ X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) 4 \left[\frac{1}{n} B \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) \right] \left[1 - I_{(3/4)^n} \left(\frac{1}{n}, m + 1 \right) \right] \right\} \tag{63}
\end{aligned}$$

Introduzindo a definição de x_q , expressa pela Equação 61, na Equação 63, obtém-se a seguinte fórmula para o cálculo de \bar{X}_q :

$$\bar{X}_q = \left\{ X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) \bar{x}_q \right\} \tag{64}$$

4.2.14 Eficiência de aplicação de água da irrigação

Esse indicador de desempenho expressa a relação entre o volume útil e o total de água aplicada, definido da seguinte maneira:

$$E_A = 100 \left(\frac{\nabla_U}{\nabla_A} \right) \tag{65}$$

onde: símbolo utilizado para indicar volume de água por unidade área; ∇_A : volume total de água aplicado, contido na área delimitada pelo perfil de água modelado ao longo da fração de área acumulada; ∇_U : volume útil aplicado, contido na área delimitada pela média, quando esta for menor ou igual à lâmina aplicada e pelo próprio perfil de água aplicada, quando ele for menor do que a média, ou seja, é o volume da água aplicada que, contido na zona útil de absorção de água da planta, correspondente à lâmina líquida requerida pelas plantas naquela irrigação; E_A : eficiência de aplicação de água da irrigação, equivalente à relação entre a água útil e água total aplicada.

4.2.15 Volume total aplicado

Se a água aplicada for medida em termos de lâmina (mm) e a área em metros quadrados, então ∇_A indicará o volume, em litros, da água aplicada. Ao se adotar o conceito de área adimensional, então ∇_A passa a ter as mesmas unidades de lâmina de água.

A fórmula para o cálculo de ∇_A pode ser obtida a partir da seguinte definição:

$$\nabla_A = \int_0^1 \left[X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})(1 - a^n)^m \right] da \quad (66)$$

Como se trata de uma integração no intervalo de 0 a 1, então ∇_A é exatamente igual a média geral aplicada \bar{X} . De modo que, utilizando a Equação 40, pode-se estabelecer a seguinte fórmula:

$$\begin{aligned} \nabla_A &= \bar{X} \\ &= X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})\bar{x} \end{aligned} \quad (67)$$

4.2.16 Volume excedente

O volume de água excedente corresponde a toda água aplicada além do limite definido pela lâmina média. Essa definição não implica que o volume excedente não possa ser aproveitado pela planta. Considerando que os processos de redistribuição da água no solo e de desenvolvimento de raízes são dinâmicos, eventualmente, ao longo do ciclo da cultura, parte dessa água poderá ser utilizada, contribuindo para o aumento na eficiência real de uso da água pela planta.

A definição matemática do volume excedente pode ser inferida da Equação 42, reconhecendo que a primeira integral abrange exatamente a porção do perfil de água que ultrapassa a média aplicada. Nessa abordagem, é importante destacar que o volume excedente derivado a partir do perfil de água reduzido resultará no volume menor de água excedente, identificado por ∇_e .

Deste modo, pode-se estabelecer o seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned}
\forall_e &= \int_0^{a_L} (x - \bar{x}) da \\
&= \int_0^{a_L} x da - \int_0^{a_L} \bar{x} da \\
&= \int_0^{a_L} x da - \bar{x} a_L
\end{aligned} \tag{68}$$

A solução da integral resultante na Equação 68 pode ser expressa em termos da função Beta incompleta, seguindo os mesmos procedimentos empregados nas transformações desde a Equação 44 até 45. Assim procedendo, a Equação 68 passa a ser rescrita da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
\forall_e &= \left[\frac{1}{n} B\left(\frac{1}{n}; m+1\right) I_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}; m+1\right) - \bar{x} a_L \right] \\
&= \left[\bar{x} I_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}; m+1\right) - \bar{x} a_L \right] \\
&= \bar{x} \left[I_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}; m+1\right) - a_L \right]
\end{aligned} \tag{69}$$

Utilizando a relação entre a função Beta incompleta e a Distribuição F, expressa pela Equação 52, o volume excedente fica definido pela seguinte fórmula:

$$\forall_e = \bar{x} [DISTF(f; 2\beta; 2\alpha) - a_L] \tag{70}$$

O volume excedente relativo pode ser transformado no volume excedente, propriamente dito, \forall_E , reconhecendo que a Equação 68 pode ser reescrita em termos dos valores da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
\forall_E &= \int_0^{a_L} (\hat{X} - \bar{X}) da \\
&= \int_0^{a_L} \hat{X} da - \int_0^{a_L} \bar{X} da \\
&= \int_0^{a_L} \hat{X} da - \bar{X} a_L
\end{aligned} \tag{71}$$

Substituindo \hat{X} pela definição dada na Equação 1 e reconhecendo que \bar{X} representa um valor específico de \hat{X} para $a = a_L$, então a Equação 71 pode ser rescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
\forall_E &= \int_0^{a_L} \left[X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})(1 - a^n)^m \right] da - \left[X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min})(1 - a_L^n)^m \right] a_L \\
&= X_{\min} \int_0^{a_L} a_L da + (X_{\max} - X_{\min}) \int_0^{a_L} (1 - a^n)^m da - \left[X_{\min} a_L + (X_{\max} - X_{\min}) a_L (1 - a_L^n)^m \right] \\
&= X_{\min} a_L + (X_{\max} - X_{\min}) \int_0^{a_L} (1 - a^n)^m da - X_{\min} a_L - (X_{\max} - X_{\min}) a_L (1 - a_L^n)^m \\
&= (X_{\max} - X_{\min}) \left[\int_0^{a_L} (1 - a^n)^m da - a_L (1 - a_L^n)^m \right]
\end{aligned} \tag{72}$$

Sabendo que \bar{x} representa, também, um valor específico de x para $a = a_L$ na Equação 3, então a Equação 72 pode ser expressa como segue:

$$\begin{aligned}
V_E &= (X_{\max} - X_{\min}) \left[\int_0^{a_L} (1 - a^n)^m da - a_L (1 - a_L^n)^m \right] \\
&= (X_{\max} - X_{\min}) \left[\int_0^{a_L} (1 - a^n)^m da - a_L \bar{x} \right] \\
&= (X_{\max} - X_{\min}) \left[\int_0^{a_L} x da - a_L \bar{x} \right]
\end{aligned} \tag{73}$$

Reconhecendo que o termo em colchete é exatamente a definição do volume excedente reduzido expresso pela Equação 68, então a Equação 73 restringe-se à seguinte fórmula:

$$\forall_E = (X_{\max} - X_{\min}) \forall_e \tag{74}$$

4.2.17 Volume deficiente

O volume deficiente de água representa a quantidade de água que faltou para atingir a média aplicada. A definição matemática do volume deficiente pode ser inferida da Equação 42, reconhecendo que a segunda integral dessa equação engloba exatamente a porção da área irrigada em deficiência.

Usando o mesmo procedimento adotado na derivação do volume de água em excesso, primeiro calcula-se o volume deficiente de água reduzido, \forall_d , considerando o seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned}
\forall_d &= \int_{a_L}^1 (\bar{x} - x) da \\
&= \int_0^1 (\bar{x} - x) da - \int_0^{a_L} (\bar{x} - x) da \\
&= \int_0^1 \bar{x} da - \int_0^1 x da - \int_0^{a_L} \bar{x} da + \int_0^{a_L} x da \\
&= \int_{a_L}^1 x da - \bar{x} a_L
\end{aligned} \tag{75}$$

A solução da integral da Equação 75 pode ser expressa em termos da função Beta incompleta, usando a mesma abordagem empregada nas transformações das Equações de 44 a 51.

Assim procedendo, a Equação 75 transforma-se na seguinte:

$$\begin{aligned}
\forall_d &= \left[\frac{1}{n} B\left(\frac{1}{n}; m+1\right) I_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}; m+1\right) - \bar{x} a_L \right] \\
&= \left[\bar{x} I_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}; m+1\right) - \bar{x} a_L \right] \\
&= \bar{x} \left[I_{a_L^n} \left(\frac{1}{n}; m+1\right) - a_L \right]
\end{aligned} \tag{76}$$

Utilizando a relação entre a função Beta Incompleta e a Distribuição F (Equação 52), o volume deficiente pode ser, finalmente, definido por:

$$\forall_d = \bar{x} [DISTF(f; 2\beta; 2\alpha) - a_L] \tag{77}$$

Essa fórmula de cálculo de \forall_d é exatamente igual ao cálculo de \forall_e (Equação 70) demonstrando, assim, ser os dois volumes iguais.

O volume deficiente reduzido pode ser transformado no volume deficiente, propriamente dito, \forall_D , sabendo que:

$$\forall_D = \int_{a_L}^1 (\bar{X} - X) da \tag{78}$$

Da qual é possível deduzir que:

$$\begin{aligned}
\forall_D &= \int_{a_L}^1 \bar{X} da - \int_{a_L}^1 \hat{X} da \\
&= (1 - a_L) \bar{X} - \int_{a_L}^1 \hat{X} da
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \bar{X} - a_L \bar{X} - \left[\int_0^1 \hat{X} da - \int X da \right] \\
&= \bar{X} - a_L \bar{X} - \left[\bar{X} - \int_0^{a_L} \hat{X} da \right] \\
&= \int_0^{a_L} \hat{X} da - a_L \bar{X}
\end{aligned} \tag{79}$$

A Equação 79 é exatamente igual à Equação 71, de modo que se pode inferir a partir da Equação 74 que:

$$\nabla_D = (X_{\max} - X_{\min}) \nabla_d \tag{80}$$

4.2.18 Volume útil

O volume útil representa exatamente a porção da água contida na área delimitada pela média aplicada. De modo que, subtraindo o volume excedente do volume aplicado, obtém-se o volume útil da seguinte maneira:

$$\nabla_U = \nabla_A - \nabla_E \tag{81}$$

4.3 Análise estatística aplicada aos índices

Com o Coeficiente de Christiansen (CUC), o Coeficiente de Distribuição (UD) e a Eficiência de Aplicação (EA) calculados para cada equipamento, e com os seguintes parâmetros estabelecidos:

Quantidade de horas trabalhadas do equipamento:

Fator Horas

<3500 – menos de 3500 horas

>3500 - mais de 3500 horas

Perfil de utilização:

Fator Uso

Aplica - Utilização de químicos junto à água de irrigação

Não - Sem utilização de químicos junto à água de irrigação

Velocidade da água na tubulação aérea do pivô central:

Fator Velocidade

<3 - Menor que 3 m.s⁻¹

>3 - Maior que 3 m.s⁻¹

Os dados foram submetidos a uma análise de variância, com auxílio do programa estatístico SOC, onde foram analisadas os fatores principais e as correlações entre estes fatores para cada conjunto de dados de coeficientes, CUC, CUD e EA:

- Fator Horas
- Fator Uso
- Fator Velocidade
- Fator Horas x Fator Uso
- Fator Horas x Fator Velocidade
- Fator Uso x Fator Velocidade
- Fator Horas x Fator Uso x Fator Velocidade

Foi utilizado como parâmetro para a análise de variância, o nível de significância de 5% para as comparações de médias pela Diferença Mínima Significativa (DMS) e para o teste de comparação de médias de Tukey.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com relação aos dados coletados nos 33 equipamentos avaliados e, posteriormente ajustados ao Modelo de Distribuição de Água Aplicada, segundo Silva et al. (2002), segue o estudo dos fatores: a) quantidade de horas de funcionamento dos equipamentos; b) velocidade da água na tubulação aérea dos equipamentos e c) aplicação ou não de produto químico com a água de irrigação, usados para o auxílio da otimização operacional dos equipamentos.

A seqüência de dados originais e o Modelo de Distribuição de Água Aplicada; segundo Silva et al., de dois equipamentos estudados no estado de São Paulo estão demonstrados na Figura 9 e Figura 10, onde também estão representados a lâmina média ponderada e cada torre do equipamento.

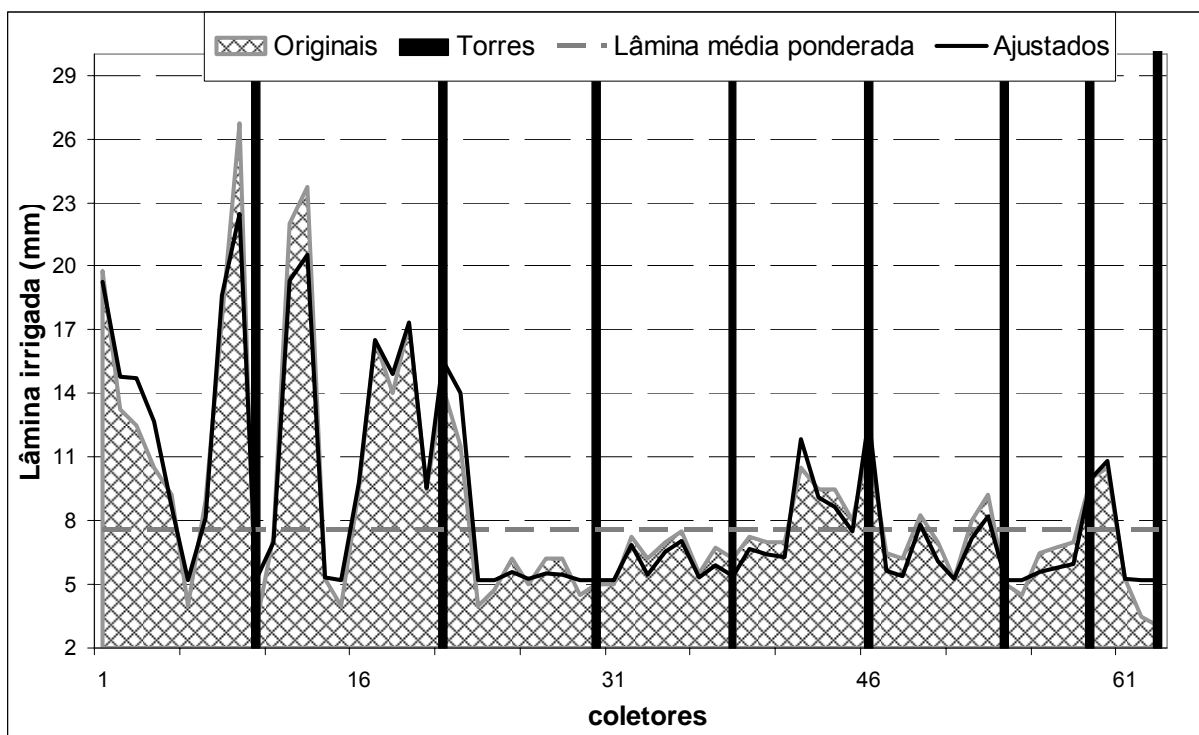


Figura 10 – Distribuição longitudinal das lâminas coletadas em sistema de irrigação tipo “pivô central” e representação do modelo ajustado segundo Silva et al. do equipamento 12 do estado de São Paulo.

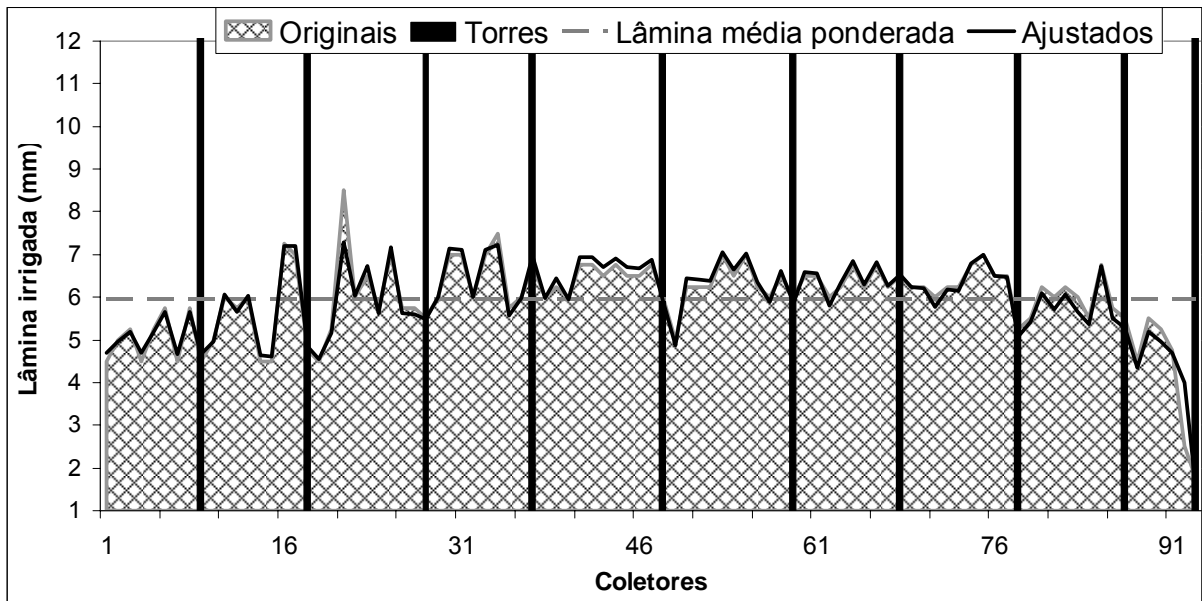


Figura 11 – Distribuição longitudinal das lâminas coletadas em sistema de irrigação tipo “pivô central” e representação do modelo ajustado segundo Silva et al. do equipamento 23 do estado de São Paulo

5.1 Análise da variância nos fatores:

5.1.1 Fatores isolados

Com os dados em estudo, o fator quantidade de horas de funcionamento não interferiu no Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), no Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e na Eficiência de Aplicação (EA), ao nível de significância adotado de 5%.

Entretanto, para os mesmos coeficientes de uniformidade e de eficiência, os outros dois fatores, ou seja, o uso de produtos químicos com a água de irrigação e a velocidade da água na tubulação aérea do equipamento, influenciam ao mesmo nível de significância.

A não significância do fator quantidade de horas trabalhadas, pode ser explicada pela influência das manutenções e ações realizadas por parte dos proprietários nos equipamentos durante seu período de utilização.

Os outros dois fatores não são facilmente modificados pelos proprietários, sendo o primeiro decorrente de uma prática associada ao equipamento ao longo de seu funcionamento, e o segundo à uma característica associada ao equipamento no momento do seu projeto.

5.1.2 Fatores agrupados

No estudo da interação dos três fatores agrupados, a quantidade de horas trabalhadas versus o uso de produtos químicos com a água de irrigação versus a velocidade da água na tubulação aérea do equipamento, houve interferência significativa no Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), no Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e na Eficiência de Aplicação (EA), com os dados deste trabalho.

Quando agrupados, os fatores exercem efeito conjunto nos coeficientes de uniformidade e na eficiência de aplicação do equipamento, demonstrando que há interferência já a partir do projeto dos equipamentos.

5.1.3 Níveis dos fatores

Não foram encontradas diferenças significativas entre os dois níveis do fator número de horas de funcionamento dos equipamentos (Tabela 1), sendo estes níveis: com equipamentos abaixo de 3500 horas de funcionamento e outro com equipamentos acima de 3500 horas de funcionamento.

Tabela 1 – Valores médios do CUC, CUD e EA em função do fator horas de funcionamento dos equipamentos

Fator Horas	Repetições	Média CUC (%)	Média CUD (%)	Média EA (%)
< 3500	18	86,94 A	84,59 A	93,47 A
> 3500	15	86,54 A	83,03 A	93,27 A

(*) Médias com mesma letra não diferem entre si pelo teste de DMS a 5% de probabilidade

Em relação ao fator uso, ou seja, equipamentos em que foram aplicados produtos químicos com a água de irrigação e aqueles que não utilizaram, em relação ao Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), ao Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e à Eficiência de Aplicação (EA) (Tabela 2), as melhores práticas são dos equipamentos que não utilizaram produtos químicos, sendo que para o CUC a diferença entre as médias foi de 7,12%, para o CUD foi de 7,17% e para a EA foi de 3,25%.

Provavelmente apareceram diferenças maiores nesta faixa de equipamentos, tornando significativa as diferenças entre médias, pelo fato que os componentes do equipamento de irrigação que não apresentam-se em contato com a água com produtos químicos, ainda não apresentam os desgastes relacionados com sua vida útil; enquanto os componentes que estão em contato com a água de irrigação com produtos químicos, apresentam desgastes maiores. Com um tempo maior de utilização, também os componentes que não estão em contato com a água de irrigação com produtos químicos, apresentam desgastes, sendo que a diferença entre estes e aqueles diminui, não aparecendo significância ao nível de 5%.

Tabela 2 - Tabela do teste t para as médias do CUC, CUD e EA em função do fator uso de produto químico junto a água de irrigação

Fator Uso	Repetições	Média CUC (%)	Média CUD (%)	Média EA (%)
Não	15	90,02 A	87,06 A	95,01 A
Aplica	18	84,03 B	81,23 B	92,02 B

(*) Médias com mesma letra não diferem entre si pelo teste de DMS a 5% de probabilidade

Em relação ao fator velocidade, ou seja, a velocidade da água na tubulação aérea do equipamento, acima de 3 m.s^{-1} ou abaixo, em relação ao Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), ao Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e à Eficiência de Aplicação (EA) (Tabela 3), as melhores práticas são dos equipamentos com velocidade acima de 3 m.s^{-1} , sendo que para o CUC a diferença entre as médias foi de 7,17%, para o CUD foi de 8,02% e para a EA foi de 9,90%.

Tabela 3 - Valores médios do CUC, CUD e EA em função do fator velocidade da água na parte aérea do equipamento

Fator Velocidade (m.s^{-1})	Repetições	Média CUC (%)	Média CUD (%)	Média EA (%)
> 3	14	90,23 A	87,63 A	95,12 A
< 3	19	84,19 B	81,12 B	92,09 B

(*) Médias com mesma letra não diferem entre si pelo teste de DMS a 5% de probabilidade

Através do método de comparação de médias de Tukey, ao nível de significância de 5%, verificou-se que a única faixa de equipamentos que o CUC, o CUD e a EA diferem significativamente pela aplicação produtos químicos com a água de irrigação são aqueles com tempo de uso abaixo de 3500 horas, e com velocidade da água dentro da tubulação aérea abaixo de 3 m.s^{-1} , sendo o percentual expresso na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores médios dos coeficientes dos equipamentos com tempo de uso abaixo de 3500 horas de uso e com velocidade dentro da tubulação aérea abaixo de 3 m.s^{-1}

	Água com Produto Químico	Água sem Produto Químico	Diferença Percentual
CUC (%)	76,58	90,68	18,41
CUD (%)	74,81	87,83	17,40
EA (%)	88,29	95,34	7,98

Na interação tripla entre a quantidade de horas de uso dos equipamentos, o tipo de uso e a velocidade da água na tubulação aérea (Tabela 5), os melhores índices foram observados, em relação ao Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), ao Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e à Eficiência de Aplicação (EA), com equipamentos acima de 3500 horas trabalhadas, que não usavam água para irrigação com produtos químicos e com a velocidade na tubulação aérea maior que 3 m.s^{-1} .

O segundo melhor desempenho foi observado com equipamentos com menos de 3500 horas trabalhadas, que também não usavam água para irrigação com produtos químicos e com a velocidade na tubulação aérea maior que 3 m.s^{-1} .

Tabela 5 - Valores médios percentuais dos fatores quantidades de horas de funcionamento, fator uso de produto químico junto a água de irrigação e fator velocidade da água na parte aérea do equipamento

Fator Horas	Fator Uso	Fator Velocidade (m.s ⁻¹)	Repetições	Média CUC (%)	Média CUD (%)	Média EA (%)
< 3500	Aplica	< 3	5	76,58	74,81	88,29
< 3500	Aplica	> 3	3	90,84	88,27	95,42
< 3500	Não	< 3	4	90,68	87,83	95,34
< 3500	Não	> 3	6	91,12	88,73	95,56
> 3500	Aplica	< 3	7	85,26	81,68	92,63
> 3500	Aplica	> 3	3	86,80	83,85	93,40
> 3500	Não	< 3	3	85,74	81,38	92,87
> 3500	Não	> 3	2	91,81	89,01	95,91

Seguem gráficos representativos das médias dos coeficientes de uniformidade e eficiência resultante, de acordo com os fatores estudados.

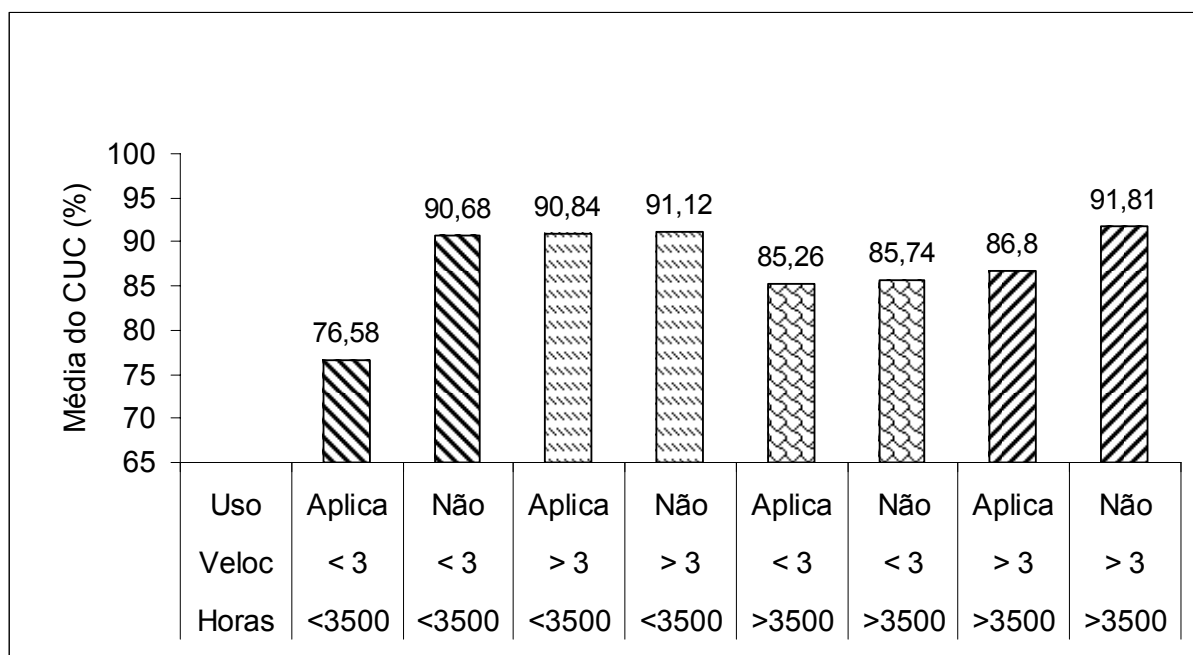


Gráfico 1 – Média percentual do coeficiente de Christiansen dos equipamentos, resultante da interação dos fatores quantidade de horas de funcionamento, velocidade da água na tubulação aérea e uso de produto químico com a água de irrigação.

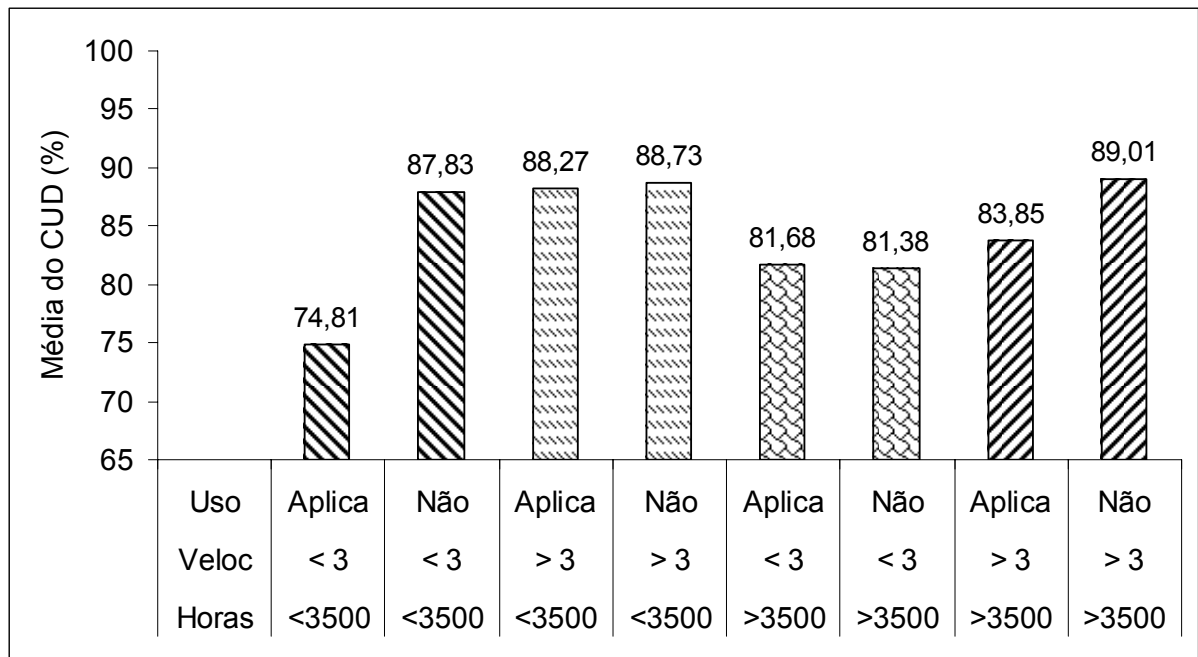


Gráfico 2 – Média percentual do coeficiente de uniformidade de Distribuição dos equipamentos, resultante da interação dos fatores quantidade de horas de funcionamento, velocidade da água na tubulação aérea e uso de produto químico com a água de irrigação.

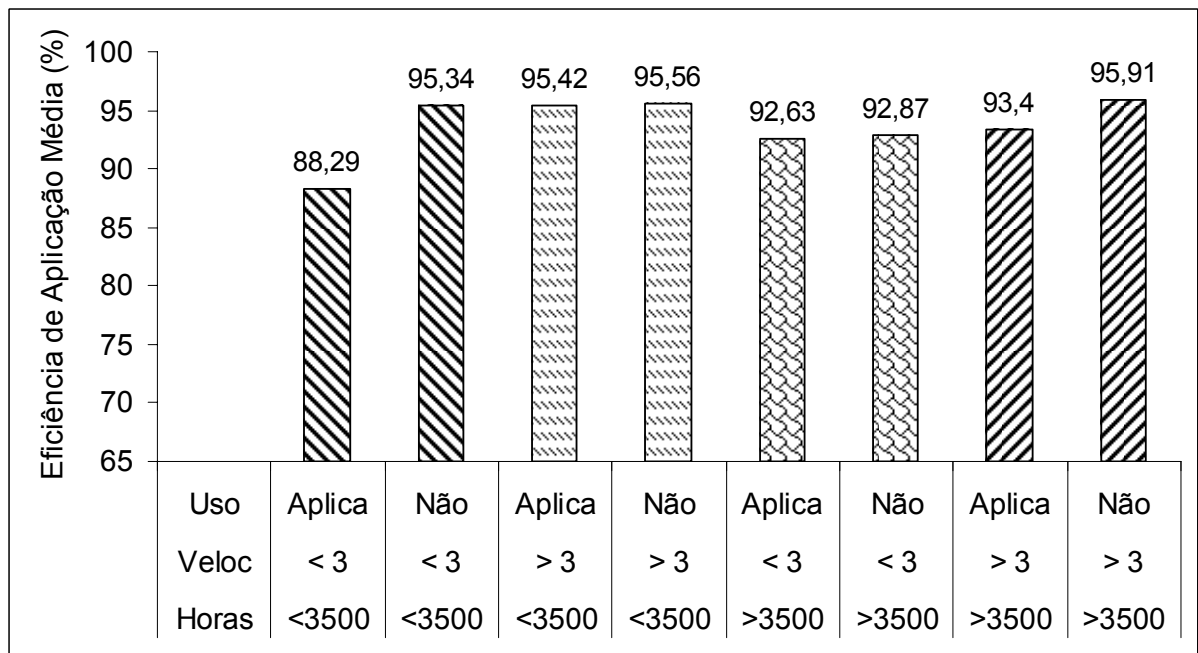


Gráfico 3 – Média percentual da Eficiência de Aplicação dos equipamentos, resultante da interação dos fatores quantidade de horas de funcionamento, velocidade da água na tubulação aérea e uso de produto químico com a água de irrigação.

Visualiza-se a paridade dos equipamentos com mesma característica em relação aos fatores, quantidade de horas de funcionamento e velocidade da água na tubulação aérea do mesmo, separados pelo uso de produtos químicos junto à água de irrigação.

Praticamente todos os equipamentos que não usavam produtos químicos com a água de irrigação permaneceram com os coeficientes de uniformidade e eficiência maiores que o dos equipamentos que usavam produtos químicos na água de irrigação.

5.2 Ajuste dos dados ao Modelo de Distribuição da Água Aplicada:

Após aplicado o ajuste dos dados, a melhora do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) foi, em média, de 3,38%, para o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), em média, de 15,58%.

Ainda em relação ao ajuste, em duas seqüências de dados de campo, foram retirados os dados extremos para que fosse possível o uso do método de transformação dos dados, estes dados correspondem a um entupimento do bocal do aspersor, fazendo o mesmo gotejar água somente no coletor.

A retirada de dados extremos é referenciada pela norma NBR 14244 como necessária quando estes são dados incorretos, provenientes de vazamentos, coletores tombados, ou outra causa explicável, não devendo ultrapassar a 3% do total do número de lâminas medidas.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no presente trabalho, analisados segundo a metodologia adotada, permitem as seguintes conclusões gerais:

- A avaliação do desempenho operacional de sistemas de irrigação tipo “pivô central” deve ser efetuada ao longo da vida útil dos equipamentos, visando orientar ajustes e correções periódicas nas condições operacionais que permitem otimizar a alocação da água e da energia.

- É recomendável analisar o desempenho de sistemas de irrigação tipo pivô central adotando os três parâmetros empregados neste trabalho, quais sejam:

- a) o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC);
- b) o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD);
- c) a Eficiência de Aplicação (EA).

Em relação aos fatores operacionais analisados, conclui-se que:

- O número de horas de funcionamento do equipamento de irrigação por pivô central não influencia os coeficientes de uniformidade e eficiência de aplicação, quando analisado isoladamente, não tendo se confirmada a hipótese formulada.

- Equipamentos com velocidade da água na parte aérea do equipamento de irrigação por pivô central acima de 3 m.s^{-1} , forneceram os melhores índices para o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (melhora em 7,17%), o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (melhora em 8,02%) e para a Eficiência de Aplicação (melhora em 3,29%).

- Os equipamentos de irrigação por pivô central que não utilizam produtos químicos com a água de irrigação fornecem os melhores índices do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (melhora em 7,12%), do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (melhora em 7,17%) e da Eficiência de Aplicação (melhora em 3,24%) em relação aos equipamentos que utilizam produtos químicos junto à água de irrigação.

7 RECOMENDAÇÕES

Após o estudo deste trabalho, indicam-se algumas recomendações para futuros trabalhos, experimentações ou ações:

- Realizar um estudo do fator velocidade da água na tubulação aérea de equipamentos de irrigação do tipo pivô central. Neste trabalho era esperado que menores valores de velocidade refletissem em coeficientes de uniformidade (CUC e CUD) e eficiência (EA) melhores, o que não veio a ocorrer.
- Experimentar um maior número de níveis nos fatores velocidade da água na tubulação aérea do equipamento e número de horas de funcionamento do equipamento; para melhor visualizar as tendências da influência dos fatores.
- Planejar a normatização das características de velocidade, perda de carga, materiais, entre outros para projetos de irrigação, afim de padronizar e limitar este processo, que parece usar critérios diversos para o projeto hidráulico e mecânico de cada equipamento.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14244**: Equipamentos de irrigação mecanizada – Pivô central e lateral móvel providos de emissores fixos ou rotativos – Determinação da uniformidade de distribuição de água. São Paulo, 1998.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1989, 596p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. Viçosa: UFV, 2005, 611p.

BRASIL. Ministério da Irrigação. Programa Nacional de Irrigação. **Tempo de Irrigar**: Manual do Irrigante. São Paulo. Mater, 1987. 160p.

CAMPOS, H. **Estatística experimental não-paramétrica**. 4 ed. Piracicaba: Esalq, Departamento de Matemática e Estatística, 1983. 349p.

CARLESSO, R.; ZIMMERMANN L. F. **Água no Solo**: Parâmetros para Dimensionamento de Sistemas de Irrigação. Santa Maria: UFSM/Departamento de Engenharia Rural, 2000. 88p. (Caderno Didático; n.3).

CARVALHO, D. F.; et al. Avaliação de um sistema automático de baixo custo para manejo de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California, 1942. Não paginado. (University of California. California Agricultural Experiment Station. Bulletin, 670).

CHRISTOFIDIS, D. Irrigação, a fronteira hídrica e a produção de alimentos. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, n.54, p.46-55, 2002.

COELHO, R. D. **Regulagens de aspersores e seus efeitos sobre a uniformidade de aplicação de água e produtividade das culturas**. 1990. 141f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

COELHO, R. D.; RESENDE, R. S.; FARIA, L. F. Economia de água com nova tecnologia de irrigação. **Agrianual**, p. 60-62, 2002

DORFMAN, R. Análise Econômica de Projetos de Irrigação e Drenagem: Curso. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., 1988, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABID, 1988. p.219-302

DUKE, H. R.; HEERMANN, D. F.; DAWSON, L. J. Appropriate depths of application for scheduling center pivot irrigations. **Transactions of the ASAE**, v.35, n.5, p.1457-1467, 1992.

FARIA, M. A.; VIEIRA, J. Irrigação por aspersão: sistemas mais usados no Brasil. **Informe Agropecuário**, v.12, n.139, p.27-39, jun. 1986.

FOLEGATTI, M. V.; PESSOA, P. C. S.; PAZ, V. P. S. Avaliação do desempenho de um pivô central de grande porte e baixa pressão. **Scientia Agrícola**, v. 55, n. 1, p. 119-127, 1998.

FRIZZONE, J. A. Funções de Resposta do Feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao Uso de Nitrogênio e Lâmina de Irrigação. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, 1., 1987, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 123 - 133

FRIZZONE, J. A.; NETO, D. D.; Avaliação de sistemas de irrigação. In: Miranda, J. H.; Pires, R. C. M. (ed) **Irrigação** – Jaboticabal; FUNEP, 2003. p. 573 – 651 (Série Engenharia Agrícola. Irrigação; 2)

GILLEY, J. R.; et al. Energy management. In : HOFFMAN, G. J.; HOWEL, T. A.; SOLOMON, K. N. (Ed.) **Management of farm irrigation systems**. ASAE, 1990. p.719-746.

GILLEY, J. R.; WATTS, D. G. Possible energy savings in irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, v.103, n.1R4, p.445-457, 1977.

GOMES, H. P. **Engenharia de Irrigação**: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento. 2.ed. Campina Grande. Universidade Federal da Paraíba, 1997. 390 p.

GONZAGA NETO, L. Produtividade e Competitividade Dependem do Aumento de Hectares Irrigados. **Revista dos Agrônomos**, v.3, n.1, p.14-20. 2000

HART, W.E.; NORUM, D.I.; PERI, G. Optimal seasonal irrigation application analysis. **Journal of the Irrigation and Drainage Division of ASCE**, v.106, n.3, p.221-235, 1980.

HEERMANN, D.F.; et al. Distribution functions to represent center-pivot water distribution. **Transactions of the ASAE**, v.35, n.5, p.1465-1472, 1992.

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.

HEINEMANN, A. B.; et al. Modelo de Decisão para a Determinação da Lâmina Ótima de Água para a Cultura do Milho Doce na Região de Sete Lagoas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: SBEA, 1998. V.2, p.4-8

KELLER, J. **Sprinkler irrigation**. Logan: Utha State University, 1984, 621p.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and Trickle Irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652p.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, v.17, n.2,p.678-684. 1974.

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

LETEY, J.; VAUX, H. J.; FEINERMAN, E. Optimum crop water application as affected by uniformity of water infiltration. **Agronomy Journal**, v.76, n.3, p.435-441, 1984.

MANTOVANI, E. C.; et al. Modelling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. **Agricultural Water Management**, v.27, n.3/4, p.243-257, 1995.

MELO, J F. **Custo da Irrigação por Aspersão em Minas Gerais**. 1993. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1993.

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Excel**, versão 5.0: guia do usuário. Redmond, 1993-1994. p. 589-603.

MUNDIM, P. M. **Uniformidade de distribuição de água por aspersão convencional na presença da cultura do milho**. 1996. 82f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

PAIVA, J. B. D. de. **Uniformidade de aplicação de água, abaixo da superfície do solo, utilizando irrigação por aspersão**. 1980. 125f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1980.

PAZ, V. P. S. ; et al. Otimização do uso da água em sistemas de irrigação por aspersão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 404-408, 2002.

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

PEREIRA NETO, A. **Tarifa d'Água e Viabilidade de Projetos Públicos de Irrigação**. 1998. 143f. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

REZENDE, R. **Desempenho de um sistema de irrigação pivô central quanto à uniformidade e eficiência de aplicação de água abaixo e acima da superfície do solo**. 1992. 86f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.

REZENDE, R.; FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T. A. **Desempenho de um sistema de irrigação pivô central quanto à uniformidade de distribuição de água abaixo e acima da superfície do solo.** Engenharia na Agricultura, Série Irrigação e Drenagem, Viçosa, v.1, n.1, p.1-7, 1993.

REZENDE, R.; et al. Influência do espaçamento entre os aspersores na uniformidade da distribuição de água acima e abaixo da superfície do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas, MG. **Anais...** Poços de Caldas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998, p.130-2.

ROCHA, F. E. C.; et al. Desenvolvimento de um equipamento de irrigação com deslocamento linear para parcelas experimentais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.** v.33, n.4, p.471-479, 1998.

RODRIGUES, L. N.; et al. Coeficientes de uniformidade: sensibilidade a mudanças nos fatores operacionais. **IRRIGA**, v.2, n.2, p.90-99, 1997.

ROLLAND, L. **Mechanized sprinkler irrigation.** Rome: FAO, 1982. 409 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 35).

SCHENKEL, R. **Distribuição de água do canhão final em sistema de irrigação por pivô central.** 1992. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.

SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A.; LIMA, J. E. F. W. **Análise de desempenho da irrigação.** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. 84p.

SILVA, D. D.; RAMOS, M. M.; MARTINEZ, M. A.; DENÍCULI, 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.

SOLOMOM, K.; KELLER, J. Trickler irrigation uniformity and efficiency. **Jornal of the Irrigation e Drainagem Division**, Ann Arbor, v. 115, p. 293-306, Sept. 1978.

SOUZA, R. O. R. M., **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação automatizado para áreas experimentais.** 2001. 70f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

VIEIRA, A. T. **Caracterização hidráulica de um tubo gotejador.** 1996. 56f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

VILELA, L. A. A. **Irrigação por autopropelido e pivô central.** Lavras: FAEPE, 1999. 82p.

ZIMMERMANN, F. J. P., **Estatística aplicada à pesquisa agrícola.** Santo Antonio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão, 2004. 402p.

ZOCOLER, J. L. Avaliação do desempenho de sistemas de irrigação In: CURSO CAPACITAÇÃO EM AGRICULTURA IRRIGADA. 1999, Ilha Solteira. **Anais...** Ilha Solteira: UNESP/FEIS, 1999, 55p.

ZOCOLER, J.L.; et al. **Análise dos custos de um sistema elevatório de água em função do diâmetro da tubulação de recalque e modalidades de aplicação das tarifas de energia elétrica**, v.4, n.3, p.53-67, 1999.

ZOCOLER, J.L.; FRIZZONE, J.A. **Modelo de otimização de sistemas elevatórios de água** – OSEA – aplicado em um sistema para suprimento de um equipamento de irrigação do tipo pivô central, XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001.

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

9 ANEXOS

ANEXO A – Uso da rotina “Solver” da planilha “Excel”

Para realizar o procedimento de ajuste dos parâmetros do modelo utilizado (Equação 1), usando a rotina “Solver”, foram utilizados os dados observados, organizados na forma apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Exemplo de dados e parâmetros para utilização da rotina “Solver”

Parâmetros do Modelo					
Xmax	Xmin	n	m		SQ
10,3641	2,8535	1,4866	0,3909		9,0530
Coletores			Lâminas		Quadrado dos
Ordem	Posição	Acumulados	Observadas	Calculadas	Desvios
I	di (m)	ai (dec)	Xi	Xi est	(Xi-Xiest)^2
1	125,35	0,0181	11,50	10,356	1,308
2	85,23	0,0305	10,75	10,348	0,162
3	210,58	0,0610	10,50	10,318	0,033
4	75,21	0,0718	10,25	10,305	0,003
5	105,29	0,0871	10,25	10,285	0,001
6	160,44	0,1103	10,25	10,252	0,000
7	205,57	0,1401	10,25	10,203	0,002
8	45,12	0,1466	10,00	10,192	0,037
9	55,15	0,1546	10,00	10,178	0,032
10	80,22	0,1662	10,00	10,156	0,024
11	175,48	0,1916	10,00	10,105	0,011
12	195,54	0,2199	10,00	10,045	0,002
13	110,30	0,2358	9,75	10,008	0,067
14	120,33	0,2533	9,75	9,967	0,047
15	130,36	0,2721	9,75	9,920	0,029
16	170,47	0,2968	9,75	9,855	0,011
17	180,50	0,3229	9,75	9,782	0,001
18	65,18	0,3324	9,50	9,755	0,065
19	115,32	0,3491	9,50	9,706	0,042
20	225,62	0,3817	9,50	9,604	0,011
21	70,19	0,3919	9,25	9,571	0,103
22	135,37	0,4115	9,25	9,505	0,065
23	220,61	0,4434	9,25	9,392	0,020
24	60,17	0,4521	9,00	9,360	0,130

25	90,25	0,4652	9,00	9,311	0,097
26	150,41	0,4869	9,00	9,226	0,051
27	155,43	0,5094	9,00	9,135	0,018
28	215,59	0,5406	9,00	9,001	0,000
29	240,66	0,5755	9,00	8,842	0,025
30	100,28	0,5900	8,75	8,772	0,000
31	185,51	0,6168	8,75	8,636	0,013
32	145,40	0,6379	8,50	8,525	0,001
33	165,46	0,6618	8,50	8,391	0,012
34	200,55	0,6909	8,50	8,218	0,079
35	230,63	0,7242	8,27	8,004	0,071
36	50,14	0,7315	8,25	7,955	0,087
37	95,26	0,7453	8,25	7,858	0,153
38	250,69	0,7816	8,25	7,585	0,442
39	40,11	0,7874	7,75	7,539	0,045
40	140,39	0,8077	7,50	7,368	0,017
41	190,52	0,8353	7,50	7,116	0,148
42	235,65	0,8694	7,50	6,760	0,548
43	245,68	0,9049	7,50	6,316	1,401
44	30,08	0,9093	6,25	6,255	0,000
45	35,10	0,9144	6,25	6,181	0,005
46	25,07	0,9180	5,75	6,126	0,141
47	20,06	0,9209	5,50	6,081	0,338
48	255,70	0,9579	5,50	5,385	0,013
49	15,04	0,9601	5,25	5,333	0,007
50	10,03	0,9615	4,50	5,298	0,637
51	5,01	0,9623	3,75	5,280	2,341
52	260,72	1,0000	3,25	2,854	0,157

Fonte: Dados de levantamento da dissertação

Para uso da rotina “Solver”, seguiram-se alguns parâmetros: a célula indicada como destino, deve conter a soma dos quadrados dos desvios (Equação 4), verificada entre os dados observados e os valores calculados pelo modelo (Equação1). Como o objetivo da regressão é minimizar essa soma de quadrados (SQ), então, foi selecionada a opção “Min” na referida rotina. No espaço reservado para as células variáveis foram usadas as seguintes: X_{\max} , X_{\min} , n e m. No espaço reservado para restrições às variáveis do modelo, foram usadas as cinco que seguem: a primeira estabelece que X_{\max} seja menor ou igual ao maior valor do conjunto de observações X_i ; a segunda restrição impõe que $X_{\max} \geq X_{\min}$; a terceira

restrição determina que $X_{\min} \geq 0$; a quarta e a quinta restrições determinam que n e m sejam positivos.

Por se tratar de um processo de regressão não linear, é possível que a solução encontrada não seja, ainda, a solução verdadeira e, por isso, a rotina “Solver” foi executada pela segunda vez para ter a certeza da constância dos valores encontrados, indicando assim, que a solução encontrada representa o mínimo global esperado.

Em todo o processo de minimização não linear, os valores iniciais, atribuídos pelo usuário aos parâmetros a serem ajustados, devem ser próximos da solução esperada, para que o algoritmo iterativo conduza, realmente, ao mínimo global. Por isso, foram adotados como estimativas iniciais para X_{\max} e X_{\min} , os respectivos valores máximo e mínimo do conjunto de dados observados e, para as estimativas, tanto de n como de m , o valor de 0,5.