

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**DINÂMICA DE ENTUPIMENTO DE GOTEJADORES EM FUNÇÃO DA
APLICAÇÃO DE ÁGUA RICA EM FERRO**

RIGLÉIA LIMA BRAUER

Dissertação apresentada à Faculdade
de Ciências Agronômicas da Unesp -
Campus de Botucatu, para obtenção
do título de Mestre em Agronomia
(Irrigação e Drenagem)

BOTUCATU-SP

Junho – 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**DINÂMICA DE ENTUPIMENTO DE GOTEJADORES EM FUNÇÃO DA
APLICAÇÃO DE ÁGUA RICA EM FERRO**

RIGLÉIA LIMA BRAUER

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Leite Cruz

Co – Orientador: Prof. Dr. Roberto Lyra Villas Boas

Dissertação apresentada à Faculdade
de Ciências Agronômicas da Unesp -
Campus de Botucatu, para obtenção
do título de Mestre em Agronomia
(Irrigação e Drenagem)

BOTUCATU-SP

Junho – 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

B825d Brauer, Rigléia Lima, 1980-
Dinâmica de entupimento de gotejadores em função da aplicação de água rica em ferro / Rigléia Lima Brauer. - Botucatu : [s.n.], 2010

xi, 59 f. : il. color., tabs., gráfs., fots. color.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2010
Orientador: Raimundo Leite Cruz
Co-orientador: Roberto Lyra Villas Bôas
Inclui bibliografia.

1. Entupimento de gotejadores. 2. Irrigação localizada. 3. Uniformidade de distribuição de água. I. Cruz, Raimundo Leite. II. Villas Bôas, Roberto Lyra. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "DINÂMICA DE ENTUPIMENTO DE GOTEJADORES EM FUNÇÃO DA
APLICAÇÃO DE ÁGUA RICA EM FERRO"

ALUNA: RIGLÉIA LIMA BRAUER

ORIENTADOR: PROF. DR. RAIMUNDO LEITE CRUZ

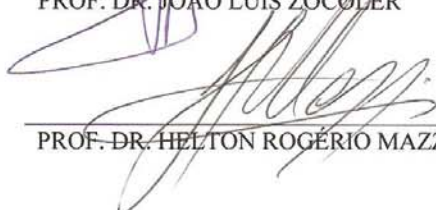
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. RAIMUNDO LEITE CRUZ



PROF. DR. JOÃO LUÍS ZOCOLER



PROF. DR. HELTON ROGÉRIO MAZZER

Data da Realização: 21 de junho de 2010.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pela minha existência e por se fazer constante nas minhas dificuldades e fraquezas;

Aos meus pais Elaine (sempre presente) e Rosselini por contribuírem na formação de meus valores e princípios mais nobres, e por serem exemplo de vida, amor e fé;

A minha irmã Antonieta e meu cunhado Fernando pelo incentivo, paciência, carinho e apoio incondicional;

Ao meu namorado Eduardo, por ter abraçado este sonho junto comigo, por ter suportado minhas chatices em momentos difíceis, pelas palavras de incentivo e gesto de compreensão quando era preciso, pelo amor incondicional;

Ao amigo Marconi pelo incentivo e sugestões dadas a esta dissertação;

Ao professor Dr. Raimundo Leite Cruz, pela orientação, amizade, ensinamentos e pelo exemplo de dedicação à ciência, cheia de sabedoria e humildade.

Ao professor Dr. Roberto Lyra Villas Boas pela co-orientação, sabedoria e dedicação à pesquisa e ao ensino;

Aos meus nobres amigos irmãos Francilene, Jaime, José, Liana e Talita pelo apoio, proteção, carinho, exemplo de vida, humildade, comprometimento e amizade sincera e oportunidade de vivenciar bons momentos juntos;

Ao nobre funcionário do Departamento de Engenharia Rural (UNESP-FCA) José Israel Ramos, que auxiliou diretamente na execução do trabalho com muito bom ânimo, amizade, sabedoria e humildade, sem esperar nada em troca, meu sincero agradecimento;

À NaanDan que doou material para a realização do trabalho, por não medir esforços para estreitar os laços de união com a universidade, contribuindo para o desenvolvimento de pesquisas aplicadas as necessidades do mercado, meu sincero agradecimento;

Aos amigos Rone e Marcelo, por me ajudarem no decorrer do desenvolvimento da dissertação, principalmente com a parte estatística;

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pelo apoio, amizade, dedicação à ciência e humildade;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural (UNESP-FCA), da seção de Pós-Graduação e da Biblioteca pela gentileza e simpatia no atendimento prestado;

A todos os colegas do Curso de Pós-Graduação, pela convivência e pelo companheirismo no decorrer do curso;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo fornecida durante o curso;

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Irrigação e Drenagem), pela oportunidade oferecida para a realização do curso;

Enfim, para todos aqueles que de alguma maneira colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE QUADROS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XI
1 RESUMO.....	01
2 SUMMARY.....	02
3 INTRODUÇÃO	04
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	06
4.1 Irrigação localizada por gotejamento	06
4.2 Qualidade da água para irrigação localizada.....	07
4.2.1 Fatores físicos	09
4.2.2 Fatores químicos	10
4.2.2.1 Ferro nas águas e nos solos	11
4.2.3 Fatores biológicos.....	12
4.3 Uniformidade de distribuição de água.....	12
4.3.1 Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)	14
4.3.2 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)	15
4.4 Coeficiente de variação de fabricação.....	16
5 MATERIAIS E MÉTODOS	19
5.1 Descrição da estrutura experimental e funcionamento do sistema.....	19
5.2 Análise da água e seu preparo para irrigação.....	24
5.3 Parâmetros avaliados.....	26
5.4 Delineamento estatístico	27

5.5 Determinação da vazão, do coeficiente de variação de fabricação, do coeficiente de uniformidade de Christiansen e do coeficiente de uniformidade de distribuição.....	27
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
6.1 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)	31
6.2 Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)	33
6.3 Coeficiente de variação de fabricação (CVq)	35
6.4 Vazão relativa (Qr)	37
6.5 Vazão média dos emissores em função do tempo de operação	39
6.5.1 Ajuste de equações de vazão em função do tempo de operação	48
7 CONCLUSÕES.....	51
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
9 APÊNDICE	59

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Entupimento por precipitados de ferro.	12
Figura 2: Vista geral da bancada de ensaios para tubo gotejadores	20
Figura 3: Vista geral da válvula da saída de ar.....	20
Figura 4: Vista geral dos manômetros (analógico e digital).....	21
Figura 5: Esquema da bancada de ensaios.....	21
Figura 6: Modelos de gotejadores da NAANDAN	22
Figura 7: Valores médios de CUC, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de 1,5 mg L ⁻¹ de ferro total.....	31

Figura 8: Valores médios de CUC, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total..... 32

Figura 9: Valores médios de CUD, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total..... 33

Figura 10: Valores médios de CUD, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total 34

Figura 11: Valores médios de CVq, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total..... 35

Figura 12: Valores médios de CVq, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total..... 36

Figura 13: Valores médios de Qr, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total..... 37

Figura 14: Valores médios de Qr, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total..... 38

Figura 15: Valores médios de vazão dos emissores do tubo gotejador NaanPC Laranja, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total....39

Figura 16: Valores médios da vazão para o tubo gotejador NaanPC Laranja, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total.....40

Figura 17: Valores médios de vazão dos emissores do tubo gotejador NaanPC Laranja, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total....41

Figura 18: Valores médios da vazão para o tubo gotejador NaanPC Laranja, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total.....42

Figura 19: Valores médios de vazão dos emissores do tubo gotejador NaanPC Azul, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total....43

Figura 20: Valores médios da vazão para o tubo gotejador NaanPC Azul, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total.....44

Figura 21: Valores médios de vazão dos emissores do tubo gotejador NaanPC Azul, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total....45

Figura 22: Valores médios da vazão para o tubo gotejador NaanPC Azul, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total.....46

Figura 23: Variação da vazão dos tubo gotejadores NaanPC Azul(a) e NaanPC Laranja (b), e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na doses de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total47

Figura 24: Comparativo da variação da vazão dos tubo gotejadores NaanPC Azul e NaanPC Laranja, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na doses de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ (a) e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ (b) de ferro total48

Figura 25: Correlações entre vazão média e tempo de operação em horas acumuladas para os 4 tratamentos e modelos polinomiais ajustados: (a) modelo NaanPC laranja, dose $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ Fe; (b) modelo NaanPC laranja, dose $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ Fe; (c) modelo NaanPC azul, dose $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ Fe; (b) modelo NaanPC azul, dose $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ Fe 49

LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro 1: Agentes causadores de entupimento de gotejadores	09
Quadro 2: Análise de Variância das variáveis avaliadas: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), Vazão relativa (Qr), Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e Coeficiente de Variação da Vazão (CVQ). Botucatu – SP, 2010.....	61

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1: Propostas de classificação do potencial de risco das águas no entupimento de sistemas de irrigação localizada	08
Tabela 2: Classificação dos valores de UD	15
Tabela 3: Classificação do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)	16
Tabela 4: Descrição técnica dos modelos de gotejadores, com suas respectivas características técnicas	22
Tabela 5: Análise de água	24

1 RESUMO

Com o propósito de avaliar a susceptibilidade de dois tipos de gotejadores ao processo de entupimento por ferro, foi conduzido um experimento em uma bancada de ensaios no Laboratório de Ensaio de Equipamentos para Irrigação do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Botucatu. O ensaio corresponde ao processo de entupimento, e foram avaliados os seguintes modelos de gotejadores NaanDanJain: NaanPC laranja e NaanPC azul. Foram utilizados segmentos de tubos, totalizando 25 emissores, onde se mediu a vazão com a pressão de 150 KPa, com três repetições para cada gotejador. A água utilizada no ensaio foi proveniente do lago do Departamento de Engenharia Rural que é comumente utilizado para irrigações de experimentos. Posteriormente foram calculados: Vazão Média, Coeficiente de Variação de Vazão (C.V.Q), Uniformidade de Distribuição da Água (C.U.D), Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (C.U.C) e Vazão Relativa (V.R.). Foi utilizado delineamento experimental estatístico de blocos inteiramente casualizados, com fatorial $2 \times 2 \times 7$, com três repetições, sendo o primeiro fator os tratamentos com ferro, o segundo fator os tipos de gotejadores e o terceiro fator o tempo. Os resultados obtidos não apontaram diferença significativa nas diferentes doses de ferro. Entretanto, os resultados apontaram diferença significativa na interação gotejador x tempo e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e vazão relativa (V.R.).

Palavras-chave: Entupimento de gotejadores, Irrigação localizada, Uniformidade de distribuição de água.

2 SUMMARY

DYNAMIC OF CLOGGING DRIPPERS AS FUNCTION OF THE APPLICATION OF WATER RICH IN IRON. Botucatu, 2010. 61p. Dissertação(Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista

Author: RIGLÉIA LIMA BRAUER

Adviser: RAIMUNDO LEITE CRUZ

Co-Adviser: ROBERTO LYRA VILLAS BOAS

The objective of this study was to evaluate the susceptibility of clogging by iron in two types of drippers using a test bank located at the Irrigation Experimental Laboratory in the Department of Agricultural Engineering of “Sao Paulo State University Julio de Mesquita Filho ”- Campus of Botucatu, Sao Paulo state. The experiment aims to study the clogging process, evaluating 2 models of drippers NaanDanJain: NaanPC orange and NaanPC blue. It was used tube segments, totaling 25 drippers, using pressure of 150 kPa, with 3 repetitions for each dripper. The water used in the test was from the lake of the Department of Agricultural Engineering which is commonly used for irrigation experiments. It was calculated: the average discharge, the variation coefficient of discharge (CVQ), the uniformity coefficient of distribution (CUD), the uniformity coefficient of Christiansen (CUC) and the relative discharge (VR). It was used statistical experimental design of randomized blocks, with a 2x2x7 factorial with three replications, with the first factor treatment with iron, the second factor the types of drippers and the third factor the time.

The results showed no significant difference in different doses of iron. However, the results indicated significant differences in drip x time interaction and the Christiansen uniformity coefficient (CUC) and relative discharge rate (VR).

Keywords: Clogging of drippers, Trickle irrigation, Uniformity of water distribution

3 INTRODUÇÃO

A irrigação localizada representa um grande avanço na tecnologia de irrigação. Pode ser definida como uma aplicação precisa e lenta de água na forma de gotas, gotas contínuas ou pequenos jatos através de equipamentos mecânicos denominados de emissores, localizados em pontos selecionados ao longo das linhas condutoras de água, e se bem manejado resulta na economia de água e energia. A qualidade da água é um fator essencial, pois problemas com entupimento diminuem a eficiência do sistema. Desta forma análises das fontes de água são extremamente necessárias, exigindo-se água de boa qualidade, livre de sólidos suspensos e dissolvidos, como o ferro, que pode precipitar e causar problemas no sistema, sendo bastante aconselhável sua análise antes da instalação do sistema de gotejamento.

Uma característica inerente aos métodos de irrigação localizada é a pequena área de passagem da água nos emissores. Em função dos pequenos diâmetros do orifício, a obstrução dos emissores parece ser o maior problema associado à operação de irrigação por gotejamento.

Os agentes causadores de entupimento nas tubulações e emissores dos sistemas de irrigação podem ser de natureza física química ou biológica. Os agentes físicos causadores de entupimento são partículas inorgânicas em suspensão (areia, silte, argila) e partículas orgânicas (fragmentos vegetais e animais, bactérias, algas, larvas, etc.). Areia, silte e outros resíduos introduzidos nas linhas laterais, durante a instalação, também podem causar problemas e devem ser retirados do sistema, antes da colocação dos emissores nas mangueiras.

As obstruções químicas geralmente resultam da precipitação de sais de cálcio, magnésio, ferro ou manganês, formando incrustações que podem bloquear, parcial ou completamente, o emissor.

As obstruções biológicas são causadas por pequenos organismos aquáticos, como larvas, algas, fungos e bactérias que passam através dos filtros e desenvolvem-se formando grandes colônias no interior das tubulações, sendo seu crescimento favorecido por condições de repouso, iluminação, temperatura e nutrientes, como nitrogênio e fósforo.

Atualmente existem diversos gotejadores de uso comercial, sendo que cada tipo de emissor possui uma sensibilidade própria ao entupimento, como verificado em trabalhos realizados por Ravina et al. (1992) e Resende (1999).

O entupimento parcial dos emissores apresenta o inconveniente adicional de não ser perceptível visualmente, o que retarda a tomada de decisão para a solução do problema.

O entupimento pode ser parcial, reduzindo a uniformidade de aplicação, ou total, interrompendo por completo o funcionamento do sistema, causando sérios problemas às culturas, devido à deficiência hídrica (Cararo et al., 2004). As obstruções provocam variação na vazão nos gotejadores e como consequência reduz a uniformidade de distribuição de água e também de fertilizante, no caso de uso da fertirrigação (López et al., 1997).

Sabe-se que a questão do entupimento de emissores na irrigação por gotejamento constitui um importante problema que se enfrenta atualmente. Tendo em vista esta questão, neste trabalho objetivou-se a estudar o efeito da ocorrência de precipitados químicos em dois tipos de tubo gotejadores (NaanPC laranja e NaanPC azul), em função do tempo de funcionamento, quando submetidos a uma água rica em ferro, avaliando-se especificamente a vazão média, coeficiente de variação de vazão (CVQ), coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Irrigação localizada por gotejamento

A irrigação localizada é um método de irrigação no qual a água é aplicada diretamente na região radicular da planta, com pequena intensidade e alta frequência, para manter a umidade próxima da ideal, ou seja, da capacidade de campo (BERNARDO et al., 2006). Este método de irrigação tem sido o que mais se desenvolveu nas últimas décadas devido à maneira racional e econômica do uso da água, bem como do aumento da produção e de uma melhor qualidade da cultura.

A utilização do sistema de irrigação por gotejamento na agricultura viabilizou soluções para diversos problemas enfrentados pelos agricultores, tais como o cultivo de solos de baixa fertilidade natural, de terrenos acidentados, diminuição dos riscos de salinização e, o que nos dias atuais é mais limitante a agricultura irrigada, aumentou a eficiência no uso da água, permitindo assim a otimização da produção (Leite, 1995).

Olitta (1986) afirma que apesar da irrigação localizada apresentar várias vantagens sobre outros métodos, o certo é que não existe um método ideal para todas as situações. A escolha adequada do método de irrigação e o projeto e o manejo corretos são importantes para o sucesso de um empreendimento com agricultura irrigada.

De acordo com Bernardo et al. (2006), as principais vantagens da irrigação localizada são:

- Maior eficiência do uso da água;
- Maior produtividade;

- Maior eficiência na adubação;
- Maior eficiência no controle fitossanitário;
- Não interfere com as práticas culturais;
- Adapta-se a diferentes tipos de solos e topografia;
- Pode ser usado com água salina ou em solos salinos;
- Economia de mão-de-obra.

Se por um lado, este sistema pode amenizar o problema de escassez de água, por outro, em função do pequeno diâmetro dos orifícios dos gotejadores pode causar transtornos aos produtores em função do entupimento dos emissores. Isto se configura como uma das principais limitações deste método de irrigação, sendo a qualidade da água um fator essencial, uma vez que, partículas em suspensão, raízes e precipitados químicos podem provocar obstruções, diminuindo a uniformidade de aplicação e, conseqüentemente, a eficiência do sistema (Ravina et al., 1992; Leite, 1995, Resende, 1999 e 2003).

O elevado custo inicial do sistema e a obstrução dos emissores e tubulações pelos precipitados, sedimentos e crescimento microbiano (Ayers & Westcot, 1991; Hanson & Lamm, 1995), são limitações sérias que a irrigação localizada apresenta, necessitando de uma avaliação periódica do sistema para checagem, troca e recuperação de emissores em mau funcionamento, constituindo assim, uma atividade de rotina a verificação da uniformidade de distribuição de água pelos emissores (Bucks et al., 1979).

Diversos tipos de gotejadores estão disponíveis no mercado, apresentando diferentes sensibilidades ao entupimento, fato que pode ser verificado em trabalhos realizados por Ravina et al. (1992), Resende (1999) e Pizarro (1996).

4.2 Qualidade da água para a irrigação localizada

A agricultura irrigada depende tanto da quantidade como da qualidade da água. No entanto, o aspecto qualidade tem sido desprezado devido ao fato de que no passado as fontes de água, no geral, eram abundantes, de boa qualidade e de fácil utilização. Esta situação, todavia, está se alterando em muitas localidades. O uso intensivo de praticamente de todas as águas de boa qualidade implica, tanto para os projetos novos como

para os antigos que requerem águas adicionais, em ter que se recorrer às águas de qualidade inferior. Para se evitar problemas conseqüentes, deve existir planejamento efetivo que assegure o melhor uso possível de águas de acordo com sua qualidade (AYERS e WESTCOT, 1991).

Na atualidade, não se dispõe de um método seguro para avaliar o risco de entupimento pelo uso de uma determinada água de irrigação. A dificuldade reside no fato de que alguns fatores intervenientes são variáveis, como a temperatura, que afeta a formação de precipitados e o desenvolvimento de microrganismos, e outros que não dependem somente da água mas também dos produtos que se adicionam, como os fertilizantes (PIZARRO CABELLO, 1996).

A qualidade da água de irrigação está diretamente relacionada com a obstrução de emissores (POVOA; HILLS, 1994), a qual recebe diversas classificações, onde uma destas pode ser observada na Tabela 1 desenvolvida por Bucks et al. (1979), que tem por objetivo proporcionar uma orientação de caráter quantitativo, indicando critérios para avaliação do risco de entupimento de emissores.

Tabela 1 – Propostas de classificação do potencial de risco das águas no entupimento de sistemas de irrigação localizada

Causa obstrutora potencial	Unidade	Grau de restrição ao uso		
		Nenhum	Leve a moderado	Severo
Sólidos suspensos	mg L ⁻¹	< 50	50-100	>100
pH	mg L ⁻¹	< 7,0	7,0-8,0	>8,0
Sólidos dissolvidos	mg L ⁻¹	< 500	500-2.000	>2.000
Manganês	mg L ⁻¹	< 0,1	0,1-1,5	>1,5
Ferro	mg L ⁻¹	< 0,1	0,1-1,5	>1,5
Sulfeto de hidrogênio	mg L ⁻¹	< 0,5	0,5-2,0	>2,0
População bacteriana	Nº máximo de UFC*/ml	< 10.000	10.000-50.000	>50.000

*Unidades Formadoras de Colônia

Fonte: Bucks, Nakayama e Gilbert (1979).

O fluxo de água carrega partículas inorgânicas bem como partículas orgânicas. Essas partículas podem impedir o fluxo normal ou se depositarem nas linhas laterais ou nos filtros. Para Nakayama e Bucks (1986) independentemente da fonte de água, os

sistemas de gotejamento requerem algum tipo de filtração para remover a carga de materiais suspensos. Entretanto, isso não é suficiente para remover todas as partículas problemáticas.

Os pequenos diâmetros dos emissores, sobretudo no caso dos gotejadores, e as baixas velocidades da água facilitam a ocorrência de entupimentos. Estes podem ser devidos a vários agentes causadores (Quadro 01) (PIZARRO, 1990).

Quadro 1 – Agentes causadores de entupimento de gotejadores

Partículas minerais	Areia
	Silte
	Argila
	Outras
Partículas orgânicas	Algas
	Bactérias
	Restos vegetais ou animais
Precipitados químicos	Sais da água
	Deposição de Fe, S e Mn
	Fertilizantes

Fonte: PIZARRO, 1990.

4.2.1 Fatores físicos

O entupimento por fatores físicos pode ser causado por partículas inorgânicas em suspensão (areia, silte, argila) e por partículas orgânicas (fragmentos vegetais e animais, bactérias, algas, larvas, etc.). Areia, silte e outros resíduos introduzidos nas linhas laterais, durante a instalação, podem causar problemas e devem ser retirados do sistema, antes da colocação dos emissores nas mangueiras.

A turbidez da água é um indicador de sólidos em suspensão, mas, por si só ela não constitui um prognóstico exato do potencial de entupimento de uma fonte de água (GILBERT e FORD, 1986).

4.2.2 Fatores químicos

O entupimento químico geralmente resulta da precipitação de sais de cálcio, magnésio, ferro ou manganês, formando incrustações que podem bloquear, parcial ou completamente, o emissor. A formação de precipitados destes sais está condicionada à sua concentração, ao pH e à temperatura. O aumento da temperatura ou do pH reduz a solubilidade dos sais de cálcio em água, resultando na precipitação dos mesmos (PITTS et al., 1990).

A salinidade da água usada na irrigação não contribui para o entupimento de gotejadores, a menos que os íons dissolvidos interajam entre si para formar precipitados ou promover o crescimento de limo. A precipitação de carbonato de cálcio é comum em regiões áridas com águas ricas em bicarbonatos e cálcio (GILBERT e FORD, 1986).

Os elementos ferro, manganês e enxofre são solúveis em estado reduzido, mas, quando oxidados, precipitam e podem obstruir os gotejadores. A oxidação pode ser produzida por bactérias ou pelo contato com o ar ou com oxidantes contidos na água (PIZARRO, 1990). O limo filamentoso hidrofílico, que ocorre em concentrações de Fe^{2+} acima de $0,4 \text{ mg L}^{-1}$, geralmente está associado à oxidação deste por ferrobactérias (GILBERT e FORD, 1986).

Substâncias químicas dissolvidas na água, como carbonato e sulfato de cálcio em altas concentrações, podem precipitar e eventualmente formar incrustações, restringindo o movimento da água. Situação similar pode ocorrer com hidróxidos ou sulfetos de ferro e manganês (Bucks et al., 1979). Esses autores estabeleceram que, para ser utilizada sem restrição na irrigação, a água deve apresentar uma concentração de ferro menor que $0,1 \text{ mg L}^{-1}$. A utilização de águas com teor de ferro maior que $1,5 \text{ mg L}^{-1}$, em sistemas de irrigação por gotejamento, possui severas restrições, apresentando alto risco de entupimento de gotejadores.

4.2.2.1 Ferro nas águas e nos solos

O ferro nas águas é proveniente da intemperização do material geológico de origem, como solos e rochas, bem como do carreamento de materiais sólidos do entorno da bacia, proveniente das ações antrópicas na água de irrigação. O ferro encontra-se em sua forma, reduzido (Fe^{+2}), mais solúvel, que ao passar pelo sistema de filtragem oxida-se, precipitando e adquirindo a forma Fe^{+3} (MANTOVANI, 2006).

O ferro é solúvel em estado reduzido, porém, ao oxidar, precipita-se e pode obstruir os emissores. Este processo de oxidação pode ocorrer pela ação de bactérias e pelo contato com o ar ou com oxidantes contidos na água, em ambiente aeróbico e anaeróbico (KELLER E BLIESNER, 1990).

Em ambientes anaeróbicos, a oxidação pode ocorrer pela ação de vários gêneros de bactérias, que oxidam o ferro dissolvido por diferentes mecanismos, em que na forma solúvel o mesmo serve como fonte primária de energia para essas bactérias. Tais microrganismos, também conhecidos como ferrobactérias, produzem mucilagens que contribuem para agravar os problemas de entupimento nos sistemas de irrigação localizada (RALPH E STEVENSON, 1995).

Há algumas formas de lodo orgânico, que contribuem para obstrução dos emissores, particularmente na presença de Fe^{++} e H_2S . Seu crescimento pode ser favorecido pelo carbono orgânico adicionado por algas presentes nas águas superficiais, combinado com fertilizantes e o calor no tubo escuro. Fontes de água que contêm carbonatos e bicarbonatos podem servir como fonte de energia inorgânica para certas formas de bactérias autotróficas, podendo provocar danos futuros na bomba e nos emissores pela formação de matriz gelatinosa, que servem como base para o crescimento de bactérias. Águas superficiais também podem apresentar ocorrência natural de agentes complexos como, por exemplo, taninos, fenólicos e ácidos húmicos e complexos ferrosos. As ferrobactérias, nas linhas dos sistemas de irrigação, podem precipitar os complexos solúveis de ferro. As bactérias podem também utilizar complexos de precipitados ferrosos, como polifosfatados e outros materiais quelatados que são usados para fertilização (GILBERT E FORD, 1986).

Nos solos o ferro pode ser encontrado na forma de hematita (Fe_2O_3),

sesquióxido de ferro ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ou siderita (FeCO_3). Segundo Vanzela (2004), o processo de erosão dos solos formados a base de sesquióxidos de ferro faz com que haja um aumento na concentração de ferro tanto solúvel quanto em suspensão nas águas.

A Figura 1 mostra o entupimento causado por precipitados de ferro.

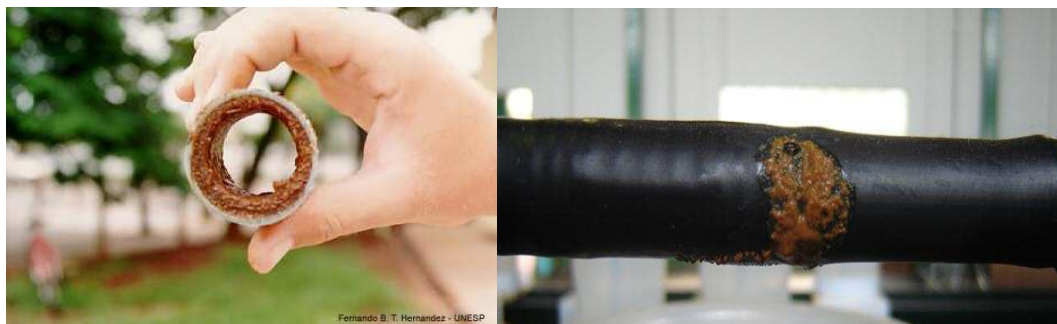


Figura 1 – Entupimento por precipitados de ferro

4.2.3 Fatores biológicos

A obstrução devido a processos biológicos comporta-se como a maior comprometedora em sistemas de irrigação localizada. Os fatores de origem biológica são causados por pequenos organismos aquáticos, como larvas, algas, fungos e bactérias que passam através dos filtros e desenvolvem-se formando grandes colônias no interior das tubulações, sendo seu crescimento favorecido por condições de repouso, iluminação, temperatura e nutrientes, como nitrogênio e fósforo. O pequeno diâmetro do orifício de gotejadores e a pequena velocidade da água, favorecem o entupimento pelo crescimento biológico (TAJRISHY et al., 1994; RAVINA et al., 1997).

4.3 Uniformidade de distribuição de água

De acordo com Favetta e Botrel (2001), a uniformidade de distribuição de água é uma informação importante para avaliação de sistemas de irrigação localizada, tanto na fase de projeto como no acompanhamento do desempenho após a implantação. Devido ao crescimento da área irrigada por sistemas localizados e a importância da avaliação da sua uniformidade de distribuição, destaca-se a necessidade da correlação entre os diferentes

métodos aplicáveis.

A uniformidade de distribuição de água às plantas está diretamente ligada ao problema de entupimento de gotejadores (AIROLDI, 2007), onde uma pequena porcentagem dos emissores entupidos pode reduzir de forma significativa a uniformidade de aplicação de água.

Bucks e Myers (1972) consideram que a desuniformidade na distribuição de água é um fator básico para avaliar a qualidade de irrigação, influenciando diretamente na produção da cultura e nos gastos de água; sendo a uniformidade de aplicação afetada principalmente pelas imperfeições de fabricação dos emissores e mudanças na pressão ao longo da linha lateral e pelos entupimentos que poderão ocorrer durante o tempo de uso.

A uniformidade de distribuição de água às plantas é fundamental para a obtenção da máxima produtividade da lavoura e/ou rentabilidade. Baixa uniformidade significa que há excesso de água em certos pontos do campo e falta em outros. Para atender as necessidades hídricas das plantas localizadas em posição crítica, aumenta-se o consumo de água utilizada na irrigação da área, podendo haver percolação profunda da água, aumento no consumo de energia, lixiviação de nutrientes, necessidade de drenagem e contaminação subterrânea (CAPRA e SCICOLONE, 2004). Desta forma, pode-se afirmar que, quanto maior o coeficiente de distribuição de água de um sistema, menor serão as lâminas aplicadas para se atingir uma máxima produção.

Conforme Lopes et al. (1997) a não uniformidade de distribuição nos sistemas localizados resulta de uma série de fatores associados: diferença de pressão, que se produz na rede, devido às perdas de carga e à irregularidade da topografia do terreno; insatisfatória uniformidade de fabricação dos emissores, em razão do inadequado controle de qualidade; número de emissores por planta; variação das características hidráulicas, ao longo do tempo, devido a possíveis obstruções e/ou envelhecimento, temperatura e variação de fabricação dos reguladores de pressão quando existirem.

A uniformidade de distribuição da água é afetada pelo valor e variabilidade da vazão dos emissores e dos locais de aplicação de água. A variabilidade da vazão é atribuída às variações de pressão e temperatura, variabilidade de fabricação, tempo de uso e suscetibilidade de variação da vazão com o tempo. (ABNT, 1986)

Conforme Bernardo et al. (2006), a uniformidade pode ser expressa

por índices ou coeficientes, sendo o mais utilizado o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC). São também utilizados em menor escala o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e o coeficiente estatístico de uniformidade (CUE). Para se determinar a uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação por gotejamento, a vazão dos gotejadores é medida ao longo das linhas laterais e a pressão de funcionamento no início das linhas de derivação, necessitando de proveta, cronômetro e manômetro.

4.3.1 Coeficiente de uniformidade de distribuição (C.U.D.)

O coeficiente utilizado para expressar a uniformidade de distribuição (UD) de água em um sistema de irrigação localizada, de acordo com Merriam e Keller (1978) é um método de obtenção dada pela relação entre a vazão média dos 25% menores valores e a média de todas as vazões dos gotejadores ensaiados, conforme mostra a equação 1:

$$UD = 100 \times \frac{q_{25\%}}{q_m} \quad (1)$$

Em que:

UD – uniformidade de distribuição, em %;

$q_{25\%}$ - vazão média dos 25% menores valores de vazão observada, em $L h^{-1}$;

q_m – média de todas as vazões, em $L h^{-1}$.

Podem-se adotar como parâmetros para UD os seguintes valores:

$UD \geq 90\%$	uniformidade excelente;
$80\% \leq UD < 90\%$	uniformidade boa;
$70\% \leq UD < 80\%$	uniformidade regular; e
$UD < 70\%$	uniformidade ruim.

A interpretação dos valores de uniformidade de distribuição pode ser realizada admitindo-se os valores de UD, relacionados com o tipo de aplicação, espaçamento entre emissores e declividade da área, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos valores de UD

Tipo de aplicação	Esp. (m)	Topografia da área	Declividade	UD (%)
Emissão pontual em culturas perenes	> 4	Uniforme	< 2	90 a 95
		Declivosa ou ondulada	> 2	85 a 90
Emissão pontual em culturas semi-permanentes ou perenes	< 4	Uniforme	< 2	85 a 90
		Declivosa ou ondulada	> 2	80 a 90
Emissão linear em culturas anuais ou perenes	Qualquer	Uniforme	< 2	80 a 90
		Declivosa ou ondulada	> 2	70 a 85

Fonte: ASAE EP 405.1 (1999).

4.3.2 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (C.U.C.)

Durante décadas, pesquisadores propuseram diferentes coeficientes para expressar a uniformidade da lâmina aplicada com base em informações pontuais. O coeficiente de Christiansen (CUC), desenvolvido por Christiansen (1942), é o mais utilizado para a quantificação da uniformidade na distribuição da água em irrigação.

De acordo com Nakayama e Bucks (1986), informações referentes à vazão dos emissores e sua uniformidade são essenciais para o dimensionamento dos sistemas de irrigação localizada.

Conforme Zocoler (2009), um dos coeficientes mais conhecidos e utilizados é o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CHRISTIANSEN, 1942), que adotou o desvio médio como medida de dispersão, conforme mostra a equação 2:

$$CUD = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \bar{Y}|}{n \times \bar{Y}} \right] \quad (2)$$

Em que:

CUC – coeficiente de uniformidade de Christiansen, em %;

n – número de amostras na linha lateral;

Y_i – vazão do emissor, em $L h^{-1}$;

\bar{Y} – vazão média dos gotejadores, em $L h^{-1}$.

Na Tabela 3 estão apresentados os critérios para a classificação da uniformidade nos sistemas de irrigação.

Tabela 3 – Classificação do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

CUC(%)	Classificação
90 – 100	Excelente
80 – 90	Bom
70 – 80	Razoável
60 – 70	Ruim
< 60	Inaceitável

O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) fornece resultados mais precisos, no entanto, possui alguns inconvenientes, como, por exemplo, dar idêntica importância às variações tanto acima como abaixo da média; isto no caso de irrigação localizada é grave, pois muitas variações superiores indicam um excesso de água que em geral não afetará o cultivo, mas sim, a eficiência de irrigação; já as variações inferiores indicam que a planta receberá menos água do que necessita, podendo diminuir a produtividade (MEDINA SAN JUAN, 2000).

4.4 Coeficiente de variação de fabricação

O coeficiente de variação de fabricação (CV_f) é um índice que informa a variação da vazão para uma determinada amostra de gotejadores novos. Considerando que as

secções transversais de fluxo são normalmente de diâmetros reduzidos, a fabricação deverá ser precisa, uniforme e constantemente monitorada, pois pequenas variações poderão causar grandes diferenças na vazão (VIEIRA, 1996).

Conforme a ABNT (1987), o coeficiente de variação de fabricação é obtido através da relação entre o desvio-padrão e a média das vazões dos emissores amostrados, conforme equação 3.

$$CV_f = 100 \times \frac{S}{\bar{X}} \quad (3)$$

Em que:

CV_f – coeficiente de variação de fabricação, em %;

S – desvio-padrão das amostras;

X – média das vazões dos emissores, em L h⁻¹.

Para Solomom(1979), valores comuns de Coeficientes de Variação de Fabricação do gotejador podem variar de 2 a 10%, apesar de valores acima desse intervalo também serem observados em alguns casos. O significado físico do CV_f pode ser explicado por assumir a distribuição de vazão segundo uma “distribuição estatística normal”, para um dado dispositivo, trabalhando em sua pressão de serviço.

Segundo Hillel (1982), o CV_f pode classificar os emissores, de acordo com os seguintes valores:

a) Para Gotejadores, Microaspersores e Difusores:

CV _f até 5%.....	Bons
CV _f entre 5 e 10%.....	Médios
CV _f entre 10 e 15%.....	Deficientes
CV _f acima de 15%.....	Inaceitáveis

b) Para Tubogotejadores:

CV _f até 10%.....	Bons
CV _f entre 10 e 20%.....	Médios
CV _f acima de 20%.....	Deficientes e
Inaceitáveis	

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Descrição da estrutura experimental e funcionamento do sistema

A presente pesquisa foi conduzida no Laboratório de Ensaio de Equipamentos para Irrigação do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrônômicas, localizada no município de Botucatu – SP.

O experimento foi desenvolvido em uma bancada de ensaios para tubo gotejadores (Figura 2), que possui um reservatório de água com capacidade para 300 litros e um conjunto moto-bomba Schneider Modelo BC 92S AV 2CV Trifásica 60 HZ 220/380 para pressurizar a água pelas tubulações de PVC de 1 ¼ de polegada, com um filtro de discos de 120 mesh. As linhas laterais têm comprimento de 6 metros (12 linhas, com recirculação de água), 2 válvulas de saída de ar (Figura 3) e 2 manômetros do tipo Bourdon (Figura 4) testados e aferidos antes dos ensaios. A Figura 5 mostra o esquema da bancada de ensaios.



Figura 2 – Vista geral da bancada de ensaios para tubo gotejadores.



Figura 3 – Vista geral da válvula da saída de ar.



Figura 4 – Vista geral dos manômetros (analógico e digital).

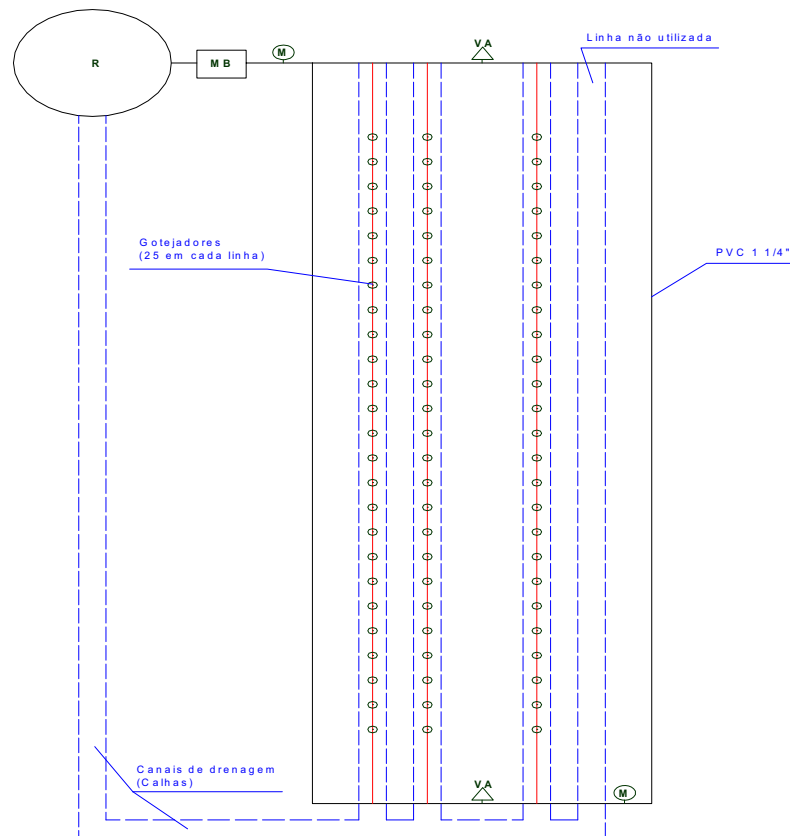


Figura 5 – Esquema da bancada de ensaios.

Foi utilizado para o experimento, dois modelos de tubo gotejadores da marca NaanDanJain que apresentam as seguintes características, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Características técnicas dos modelos de gotejadores.

Fabricante	Modelo	Fluxo	Vazão L h ⁻¹	Ø N mm	Pressão KPa	Distância entre gotejadores m	Espessura parede mm	Diâmetro interno mm
NAANDANJAIN								
	Naan PC (laranja)	AC	3,8	16	100– 350	0,90	0,90	13,9
	Naan PC (azul)	AC	2,1	16	100– 350	0,80	0,90	13,9

As principais características dos modelos de gotejadores da NaanDanJain (Figura 6) são:

- Membrana reguladora de alta flexibilidade;
- Passagens de água que asseguram elevada tolerância à obstrução;
- Cada gotejador possui dois filtros individuais de proteção, com mecanismo de auto-limpeza;
- Uniformidade categoria A conforme norma ISO 9261: 1991;
- Filtragem recomendada: mínimo 120 mesh (refere-se ao número de abertura em cada eixo por polegada quadrada), mediante especificação em função da qualidade da água.

**Figura 6** – Modelos de gotejadores da NAANDAN.

Para a condução do ensaio, foram retirados de uma bobina, ao acaso, 25 segmentos do tubo gotejador para cada linha de gotejadores, o que resultou na avaliação de um total de 75 gotejadores de cada modelo para cada tratamento. Para isso, as mangueiras com espaçamento original entre os emissores foram cortadas e remontadas, utilizando uniões de mangueira, resultando em um espaçamento único entre gotejadores, de 0,20 m para todos os modelos. A água, após passar através dos gotejadores, era recolhida por uma calha que a reconduzia ao reservatório, constituindo, assim, um sistema de recirculação de água. No sentido de agilizar a medição da vazão dos gotejadores, era utilizada uma prateleira móvel, a qual permitia a inserção de uma bateria de 75 beckers graduados de 1000 ml.

A pressão de serviço foi mantida em 150 ± 15 KPa, por meio de um registro de pressão, colocada na linha principal de bombeamento da bancada.

O ensaio foi conduzido durante 1 ano, totalizando 4800 horas de funcionamento da bancada, sendo 1200 horas para cada modelo em cada tratamento. Para cada modelo de tubo gotejador, foram efetuadas duas aplicações de dosagens de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro, contabilizando 4 tratamentos.

A operacionalização do funcionamento da bancada, quanto ao horário de início e de parada, foi efetuada através de um timer programável, marca Key West, modelo DNI 6621 – 220V, o qual foi utilizado no acionamento do conjunto moto bomba elétrico, visando um funcionamento em 8 ciclos diários, com duração de duas horas cada e intervalos de descanso de 1 hora, totalizando 16 horas por dia. Os horários estabelecido foram: 00:00 às 02:00; 03:00 às 05:00; 06:00 às 08:00; 09:00 às 11:00; 12:00 às 14:00; 15:00 às 17:00; 18:00 às 20:00; 21:00 às 23:00, para todos os dias da semana.

As medições individuais da vazão dos gotejadores foram efetuadas semanalmente, correspondendo a intervalos de 112 horas de funcionamento do sistema, totalizando onze medições no período de ensaio para cada tratamento. Ao efetuar a medição das vazões com o uso dos beckers, cada gotejador era cuidadosamente observado, no sentido de não permitir a interferência de vazões provenientes de gotejadores adjacentes e/ou pontos de conexão, e então, os volumes eram coletados por um período de tempo de 10 minutos.

Com o objetivo de monitorar o nível de aquecimento da água, na bancada do ensaio, devido à recirculação de água no sistema e evitar temperaturas acima de

32°C, foram efetuadas leituras diárias da temperatura da água na bancada de ensaio. As medições foram efetuadas sempre as 11:00, após a parada do sistema, durante toda fase do ensaio.

5.2 Análise da água e seu preparo para a irrigação

Utilizou-se como fonte de água para o experimento, água lago do Departamento de Engenharia Rural localizada no Campus da UNESP – FCA.

A análise da água utilizada no experimento antes da adição de Fe, foi feita pelo Departamento de Recursos Naturais, no Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas “Prof.^a Dr.^a Leônia Aparecida de Lima”, UNESP-FCA. Os resultados são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 – Análise de água

Parâmetros	Unidade	Análise
N	mg L ⁻¹	7,0
P	mg L ⁻¹	4,0
K	mg L ⁻¹	6,0
Ca	mg L ⁻¹	0,0
Mg	mg L ⁻¹	0,0
S	mg L ⁻¹	5,0
Cu	mg L ⁻¹	0,0
Fe	mg L ⁻¹	0,51
Mn	mg L ⁻¹	0,0
Zn	mg L ⁻¹	0,0
pH		6,90
C.E.	mS	0,022

Verifica-se que a água possuía um teor natural de ferro de $0,51 \text{ mg L}^{-1}$. Como o experimento foi conduzido com teores fixos em $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$, somente foi acrescentado o complemento.

Os teores de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ foram escolhidos basicamente, levando-se em consideração a Tabela 1, que considera como leve a moderado e severo respectivamente, o risco de entupimento as águas com os respectivos valores de ferro total.

Como as concentrações de ferro total na água bruta foram sempre inferiores a $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$, adicionou-se o complemento pelos seguintes cálculos químicos:

Produto utilizado:

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Sulfato Ferroso Heptahidratado)

Dados químicos: Massa Molecular: $277,92 \text{ g mol}^{-1}$

Teor de pureza: 99% (produto de uso laboratorial)

Exemplo de cálculo do ferro a ser adicionado:

O teor de ferro total no primeiro dia foi de $0,51 \text{ mg L}^{-1}$, então, tem-se:

Fe original = $0,51 \text{ mg L}^{-1}$

Fe desejado = $1,5 \text{ mg L}^{-1}$

Fe complementar = $0,99 \text{ mg L}^{-1} = 0,99 \times 10^{-3} \text{ g L}^{-1}$

Fe peso atômico = 55,85

$$A = \frac{(0,99 \times 10^{-3} \text{ g L}^{-1}) \times (277,92 \text{ g mol}^{-1})}{55,85 \text{ g mol}^{-1}} = 0,004926424 \text{ g L}^{-1} \text{ de } \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$$

Considerando-se o reservatório de 300 L, tem-se:

$$B = \frac{(0,004926424 \text{ g}) \times (300 \text{ L})}{0,3 \text{ L}} \cong 4,93 \text{ g de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O para 300 L}$$

Ao invés de se adicionar o sal na forma sólida dentro do reservatório de 300 L, preparou-se uma solução prévia de 0,3 L para facilitar a homogeneização, levando em conta também o teor de pureza do produto comercial.

Tem-se, então, que:

$$C = \frac{4,93 \times 100}{99} \cong 4,98 \text{ g L}^{-1}$$

Preparo da solução:

- Pesaram-se 4,98 g de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ comercial;
- Diluíram-se em 0,3 L de água destilada;
- Adicionaram-se no reservatório de 300 L;
- Promoveu-se a homogeneização;
- No final, a água, que, originalmente possuía $0,59 \text{ mg L}^{-1}$ de Fe total, passou a ter $1,5 \text{ mg L}^{-1}$.

Observação: as análises de ferro foram realizadas diariamente. Nos casos em que o teor de ferro na água se alterou, os cálculos também foram ajustados, de forma a garantir as concentrações fixas de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total na solução.

5.3. Parâmetros avaliados

Para efeito de avaliação da performance dos emissores foram analisados os seguintes parâmetros:

- a. Vazão média dos emissores, no período do ensaio, expressa como um percentual do valor nominal (vazão relativa);
- b. Coeficiente de variação de vazão de cada modelo de emissor;

- c. Uniformidade de distribuição de água utilizando-se o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC); e
- d. Uniformidade de distribuição de água utilizando-se o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD).

5.4. Delineamento estatístico

O experimento foi montado em esquema fatorial $2 \times 2 \times 7$, sendo duas doses de Fe, duas marcas de gotejadores e sete tempos de funcionamento com três repetições, totalizando 84 parcelas experimentais.

Inicialmente foi verificada a normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk ($P < 0,05$) e a homogeneidade de variância pelo teste de Levene. Efetuou-se a análise de variância pelo teste F. As médias das marcas dos gotejadores foram comparadas pelo teste de T de Student a 5% de probabilidade. As interações significativas das marcas dos gotejadores com tempo foram estudadas utilizando o método estatístico “Intervalo de Confiança para Diferenças entre as Médias” com grau de confiança de 95% ($IC_{95\%}$) para a análise comparativa dos tratamentos.

5.5. Determinação da vazão, do coeficiente de variação de fabricação, do coeficiente de uniformidade de Christiansen e do coeficiente de uniformidade de distribuição

Após a montagem do experimento, todo o sistema hidráulico foi posto em operação, por um período de 48 horas antes do início das avaliações, com a finalidade de promover a estabilização do funcionamento dos gotejadores. Após o período de estabilização do sistema, realizou-se uma leitura de vazão de todos os gotejadores à temperatura ambiente de 22°C e temperatura da água 25°C e pressão de 150 KPa no início da linha, com a finalidade de se obter uma caracterização inicial dos gotejadores (vazão de referência) para ser utilizada como base nos cálculos dos parâmetros analisados. Ao se efetuar a medição de vazão, cada gotejador era cuidadosamente observado, no sentido de não haver interferência de vazões provenientes de gotejadores adjacentes e/ou de pontos de conexão.

A referida vazão foi determinada através do método gravimétrico, com o objetivo de se obter maior exatidão do volume coletado de cada emissor, e seus valores expressos em $L h^{-1}$. O volume da água, emitido para cada emissor em beakers, durante 10 minutos, foi pesado, utilizando-se uma balança de precisão Gehaka BK 4000 (0,01 g) certificada.

Depois de tabulados os pesos, procederam-se os cálculos da vazão, do coeficiente de variação de fabricação, do coeficiente de uniformidade de Christiansen e do coeficiente de uniformidade de distribuição através das equações 4 a 11.

$$v = \frac{M}{D_{\text{água}}} \quad (4)$$

Em que:

v – volume de água, em ml;

M – massa da água coletada, em g;

D – massa específica da água utilizada no ensaio, em $g ml^{-1}$.

$$q = \frac{(6 \times v)}{1000} \quad (5)$$

Em que:

q – vazão do gotejador, em $L h^{-1}$;

v – volume de água, em ml.

$$\bar{q} = \frac{q_{\text{média}}}{N} \quad (6)$$

Em que:

q – vazão média do gotejador, em $L h^{-1}$;
 q_{linha} – vazão da linha gotejadora, em $L h^{-1}$ e
 N – número de emissores da linha.

$$CV_f = 100 \times \frac{S_{\text{novo}}}{\bar{q}_{\text{novo}}} \quad (7)$$

Em que:

CV_f – coeficiente de variação de fabricação, em %;
 S_{novo} – desvio-padrão da vazão dos gotejadores novos (primeira leitura), e
 q_{novo} – vazão média do gotejador novo, em $L h^{-1}$.

$$CV_q = 100 \times \frac{S_{\text{usado}}}{\bar{q}_{\text{usado}}} \quad (8)$$

Em que:

CV_q – coeficiente de variação de vazão, em %;
 S_{usado} – desvio-padrão da vazão dos gotejadores usados, e
 q_{usado} – vazão média do gotejador usado, em $L h^{-1}$.

$$CUD = 100 \times \frac{q_{25\%}}{\bar{q}_{\text{usado}}} \quad (9)$$

Em que:

CUD – coeficiente de uniformidade de distribuição, em %;
 $q_{25\%}$ – vazão média de $\frac{1}{4}$ dos menores valores, em $L h^{-1}$
 q_{usado} – vazão média do gotejador usado, em $L h^{-1}$.

$$CUD = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \bar{Y}|}{n \times \bar{Y}} \right] \quad (10)$$

Em que:

CUC – coeficiente de uniformidade de Christiansen, em %;

n – número de amostras na linha lateral;

Y_i – vazão do emissor, em $L h^{-1}$;

\bar{Y} – vazão média dos gotejadores, em $L h^{-1}$.

$$Q_r = \frac{q_a}{q_i} \quad (11)$$

Em que:

Q_r – vazão relativa, em $L h^{-1}$;

q_a – vazão atual, em $L h^{-1}$; e

q_i – vazão inicial, em $L h^{-1}$.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

Nas Figuras 7 e 8, estão apresentados os valores médios de CUC para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e Azul, em função do tempo de operação do sistema de irrigação, nas doses de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente.

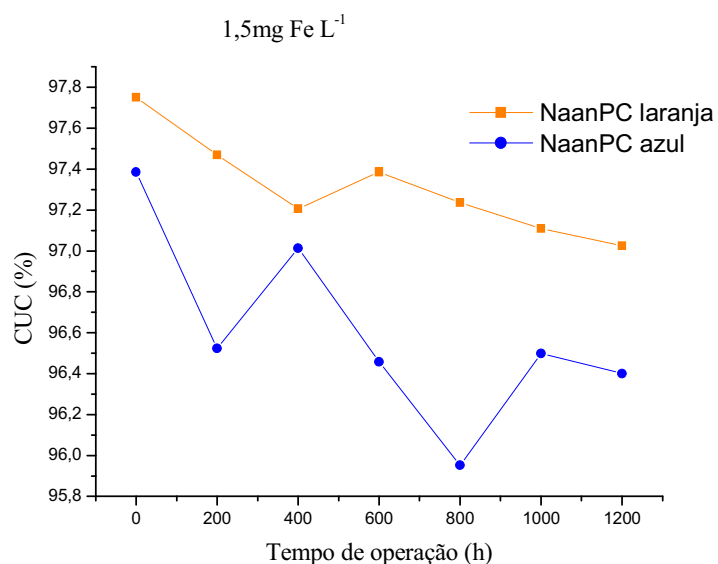


Figura 7 – Valores médios de CUC, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total.

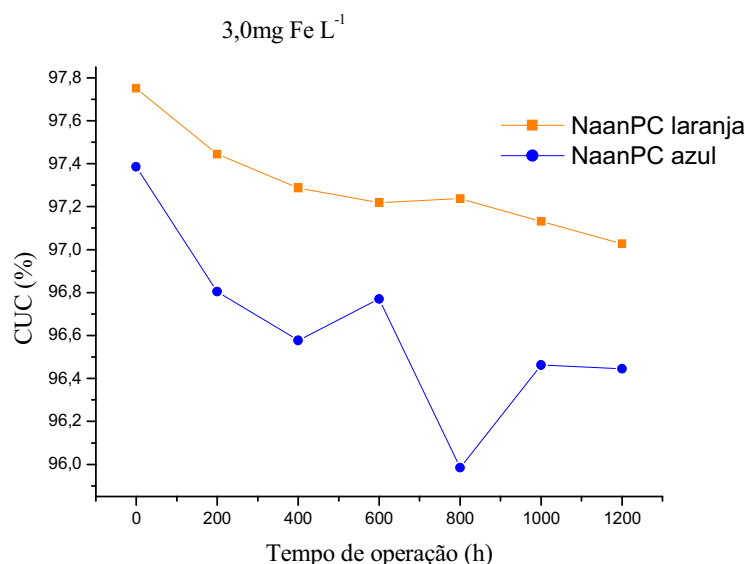


Figura 8 - Valores médios de CUC, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de 3,0 mg L⁻¹ de ferro total.

Observa-se na Figura 7 uma redução nos valores médios do CUC, para os dois gotejadores, ao longo do tempo de operação do sistema de irrigação, com a utilização de água ferruginosa. Os valores médios do CUC para os modelos NaanPC laranja e NaanPC azul apresentaram reduções de 0,74% e 1,48%, respectivamente, o que permite mantê-los na classificação de excelente, mesmo após 1200 horas de operação do sistema de irrigação.

Observa-se na Figura 8 também, uma redução nos valores médios do CUC, para os dois gotejadores, ao longo do tempo de operação do sistema de irrigação, com a utilização de água ferruginosa. Os valores médios do CUC para os modelos NaanPC laranja e NaanPC azul apresentaram reduções de 0,74% e 1,44%, respectivamente, o que também permite mantê-los na classificação de excelente, mesmo após 1200 horas de operação do sistema de irrigação. Tal sensibilidade ao entupimento foi atribuída à característica deste gotejador de apresentar duas saídas de água, sendo que uma delas ficava virada para cima, o que permitiu um maior acúmulo de mucilagem e/ou precipitados na câmara de autocompensação.

Segundo Mantovani e Ramos (1994), quanto maior o valor do CUC, menor é a lâmina de irrigação necessária para alcançar a produtividade máxima e de acordo com Bernardo et al. (2006), o limite mínimo de coeficiente de uniformidade de Christiansen aceitável em um sistema de irrigação por gotejamento é de 80%.

6.2 Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)

Estão apresentados nas Figuras 9 e 10, os valores médios do CUD para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e Azul, em função do tempo de operação do sistema de irrigação, nas doses de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente.

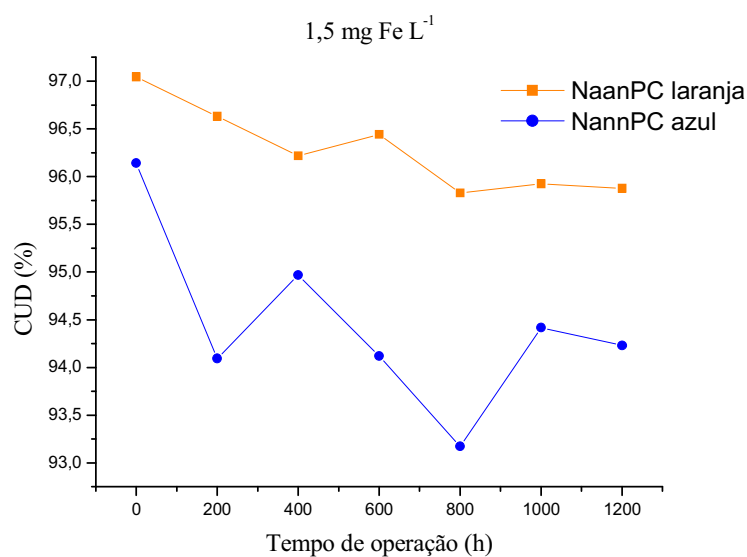


Figura 9 - Valores médios de CUD, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total.

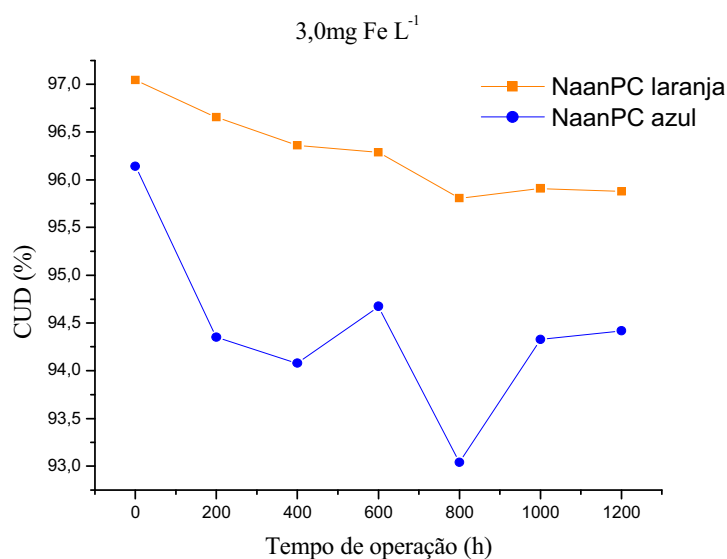


Figura 10 - Valores médios de CUD, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total.

O coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) mostrou-se mais sensível as variações de uniformidade de aplicação de água pelo efeito do entupimento que o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), como era de se esperar, pois em seu cálculo, utilizam-se valores médios dos 25% dos menores valores das vazões.

Na primeira avaliação, os valores médios do CUD permitiram a classificação excelente para os dois modelos de gotejadores nas duas doses de ferro total. Observa-se na Figura 9 uma redução nos valores médios do CUD, para os dois gotejadores, ao longo do tempo de operação do sistema de irrigação, com a utilização de água ferruginosa. Os valores médios do CUD para os modelos NaanPC laranja e NaanPC azul apresentaram reduções de 1,25% e 3,09%, respectivamente, o que permite mantê-los na classificação de excelente, mesmo após 1200 horas de funcionamento do sistema de irrigação.

Observa-se também na Figura 10, uma redução nos valores médios do CUC, para os dois gotejadores, ao longo do tempo de operação do sistema de irrigação, com a utilização de água ferruginosa. Os valores médios do CUD para os modelos NaanPC laranja e NaanPC azul apresentaram reduções de 1,28% e 2,15%, respectivamente, o que o também

permite mantê-los na classificação de excelente, mesmo após 1200 horas de funcionamento do sistema de irrigação.

6.3 Coeficiente de variação de vazão (CVq)

Para avaliação dos efeitos no coeficiente de variação de vazão dos tubo gotejadores NaanPC laranja e NaanPC azul, após seus usos com água ferruginosa nas doses de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro, calculou-se a vazão média e o desvio-padrão, e, em seguida, determinou-se o coeficiente de variação de vazão (CVq), dividindo-se o desvio-padrão pela média da vazão. Os resultados são apresentados a seguir:

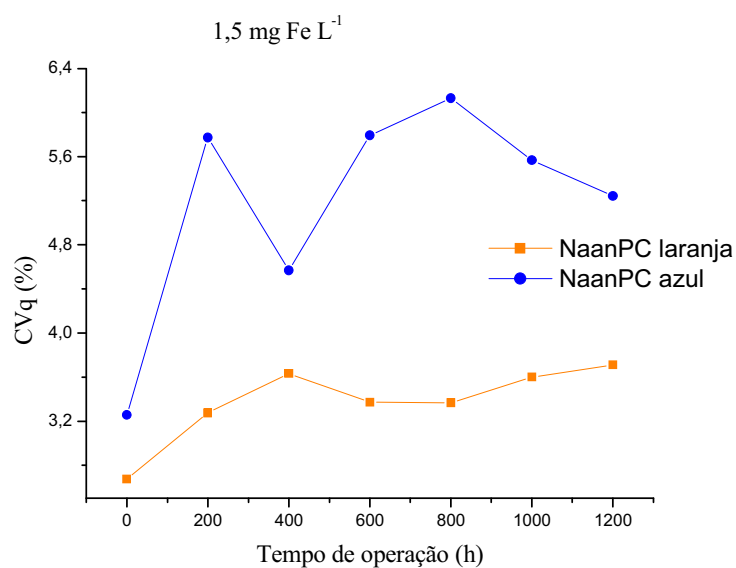


Figura 11 - Valores médios de CVq, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total.

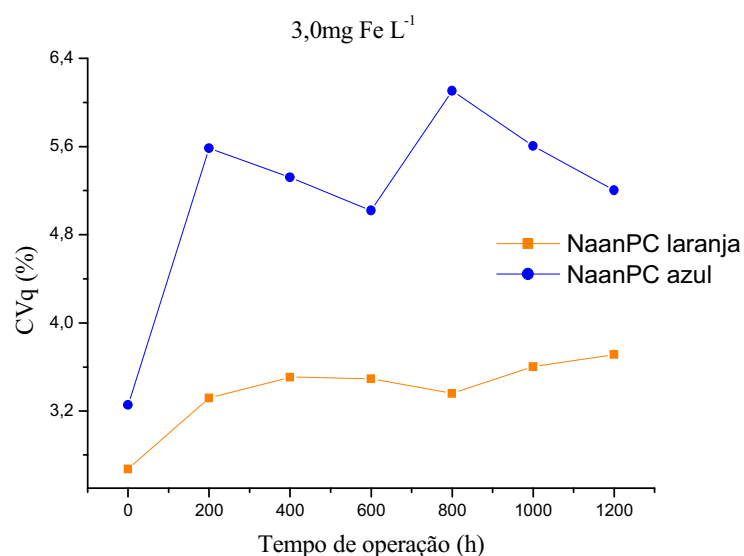


Figura 12 - Valores médios de CVq, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total.

O coeficiente de variação de vazão (CVq), determinado pelo desvio-padrão dos valores de vazão da amostra, em relação à vazão média, representa uma medida de dispersão relativa dos dados, e quando aplicado em uma amostra de emissores novos, é definido como coeficiente de variação de fabricação, o qual representa pequenas diferenças construtivas de cada emissor (SOLOMON, 1979).

Conforme as Figuras 11 e 12, todos os emissores avaliados apresentaram coeficiente de variação inicial de vazão (0h) $< 4\%$, sendo, portanto, considerados bons de acordo com a classificação de Hillel (1982), onde o de CV inferior a 10% tem uniformidade boa; de 10 a 20% é média e superior a 20% é deficiente e inaceitável.

Dada à pequena magnitude de fatores causadores de desuniformidade (perdas de carga, declividade e diferencial de temperatura da água), uma vez determinado o valor de CV no início do ensaio, as diferenças encontradas, nas demais épocas de amostragem estarão relacionadas ao processo de entupimento dos emissores (RESENDE, 1999).

Observa-se na Figura 11, que o tubo gotejador NaanPC azul mostrou-se mais sensível ao CV, passando de um CV de 3,26%, no início do experimento, para 5,79% após 600 h de uso, o que corresponde a um acréscimo de 77,94% no valor do CV.

O mesmo comportamento é observado na Figura 12, onde o tubo gotejador NaanPC azul mostrou-se mais sensível ao CV, passando de um CV de 3,26%, no início do experimento, para 6,11% após 800 h de uso, o que corresponde a um acréscimo de 87,57% no valor do CV.

Conforme apresentado nas Figuras 11 e 12, verifica-se que o CVq do modelo NaanPC laranja variou menos ao longo do tempo de funcionamento do sistema.

6.4 Vazão relativa (Qr)

Este índice refere-se às vazões iniciais de cada modelo no instante da realização da primeira leitura.

Nas figuras 13 e 14, estão apresentados os valores médios de Qr para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e Azul, em função do tempo de operação do sistema de irrigação, nas doses de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente.

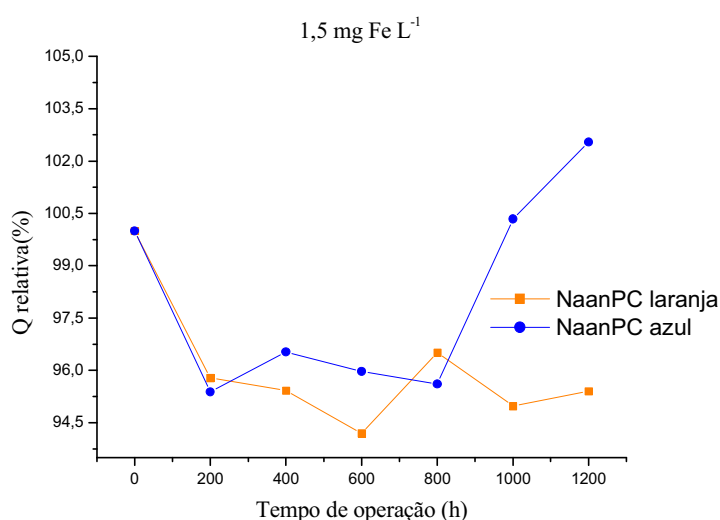


Figura 13 – Valores médios de Qr, para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total.

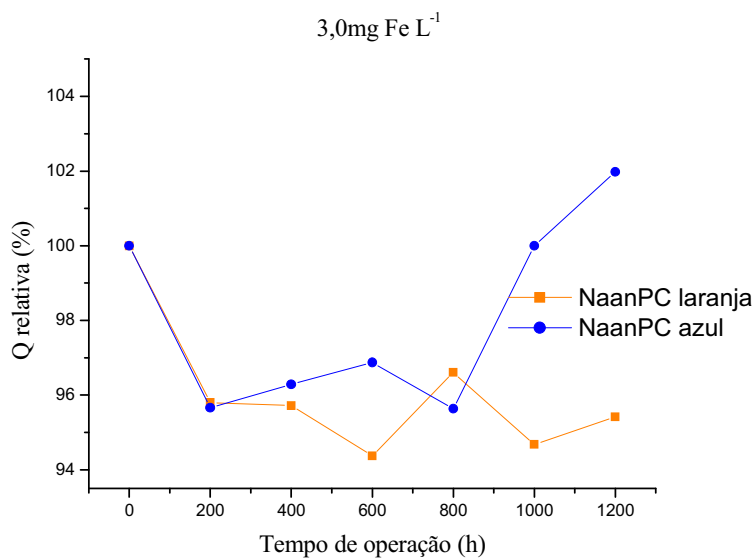


Figura 14 – Valores médios de Q_r , para os tubo gotejadores NaanPC Laranja e NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de 3,0 mg L⁻¹ de ferro total.

Conforme as Figuras 13 e 14 observam-se que alguns emissores tiveram aumento de vazão por um determinado período, retratando, assim, uma fase inicial do entupimento com aumento de vazão, concordando com Teixeira (2006) e Coelho (2007). Problemas de desuniformidade de vazão também estão relacionados ao aumento da vazão nominal (vazão relativa) do gotejador, devido à deposição de materiais na membrana flexível dos gotejadores autocompensantes, assim como pela deterioração da mesma (GILBERT et al, 1981).

Verificam-se nas Figuras 13 e 14, o modelo NaanPC laranja manteve a vazão nominal praticamente constante durante todo o período estudado. O modelo NaanPC azul apresentou uma tendência de aumentar sua vazão quando entupido, tendo um incremento em torno de 6,94% e 6,35%, respectivamente, a partir de 800 h trabalhadas. Tal resultado está em concordância com os obtidos por Cordeiro (2002), que observou este mesmo comportamento neste gotejador, em pesquisa de laboratório.

6.5. Vazão média dos emissores em função do tempo de operação

Os valores médios da vazão para o tubo gotejador NaanPC Laranja e NaanPC azul, em função do tempo de operação, nas doses de 1,5 mg L⁻¹ e 3,0 mg L⁻¹ de ferro total, respectivamente, estão representados nas figuras 16, 18, 20 e 22. Ocorreu uma tendência de queda e elevação em todos os emissores, porém não simultaneamente nas respectivas figuras.

A figura 15 mostra os valores médios de vazão dos emissores do tubo gotejador NaanPC Laranja, em função do tempo de operação, na dose de 1,5 mg L⁻¹ de ferro total.

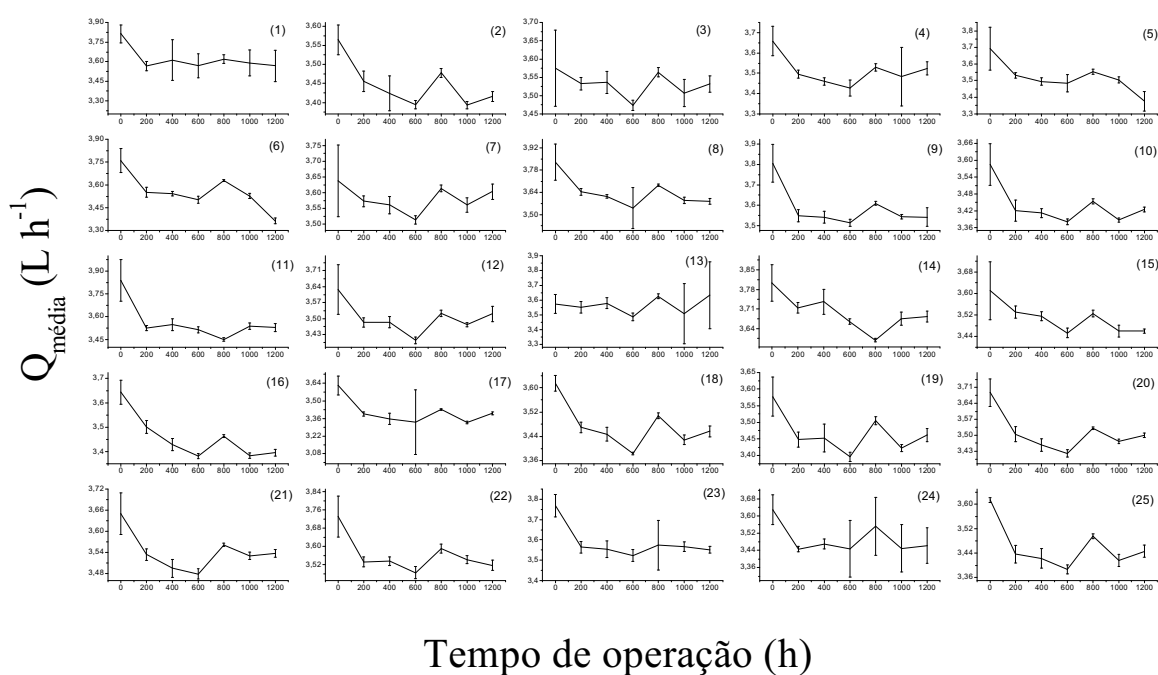


Figura 15 – Valores médios de vazão dos emissores do tubo gotejador NaanPC Laranja, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de 1,5 mg L⁻¹ de ferro total.

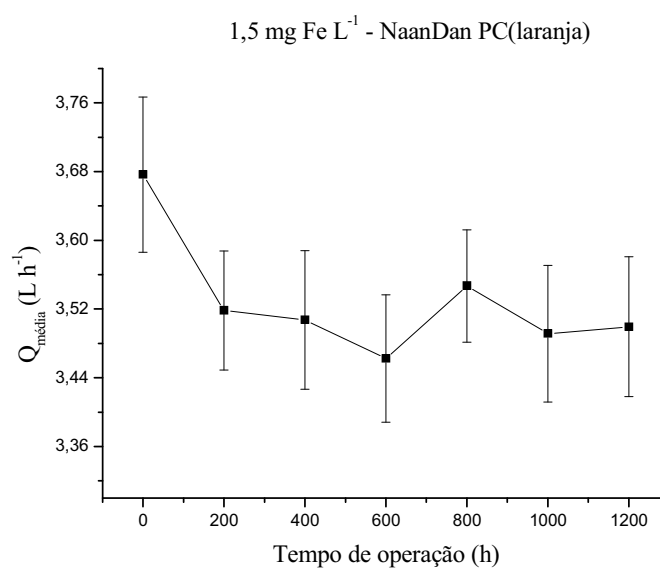


Figura 16 - Valores médios da vazão para o tubo gotejador NaanPC Laranja, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de 1,5 mg L⁻¹ de ferro total.

A vazão média ficou em torno de 3,53 L h⁻¹ ± 0,077, mesmo após 1200 horas de operação. A vazão máxima de 3,84 L h⁻¹ ocorreu no emissor 11 no tempo de 0 h, tendo um incremento em torno de 1,02% em relação a vazão original do fabricante. Já a vazão mínima de 3,33 L h⁻¹ ocorreu no emissor 17 no tempo de 600 h, tendo uma queda em torno de 12,33% da vazão original do fabricante, mostrando que em alguns emissores fica evidente o efeito do entupimento parcial dos mesmos.

Na Figura 17 observa-se os valores médios de vazão dos emissores do tubo gotejador NaanPC Laranja, em função do tempo de operação, na dose de 3,0 mg L⁻¹ de ferro total.

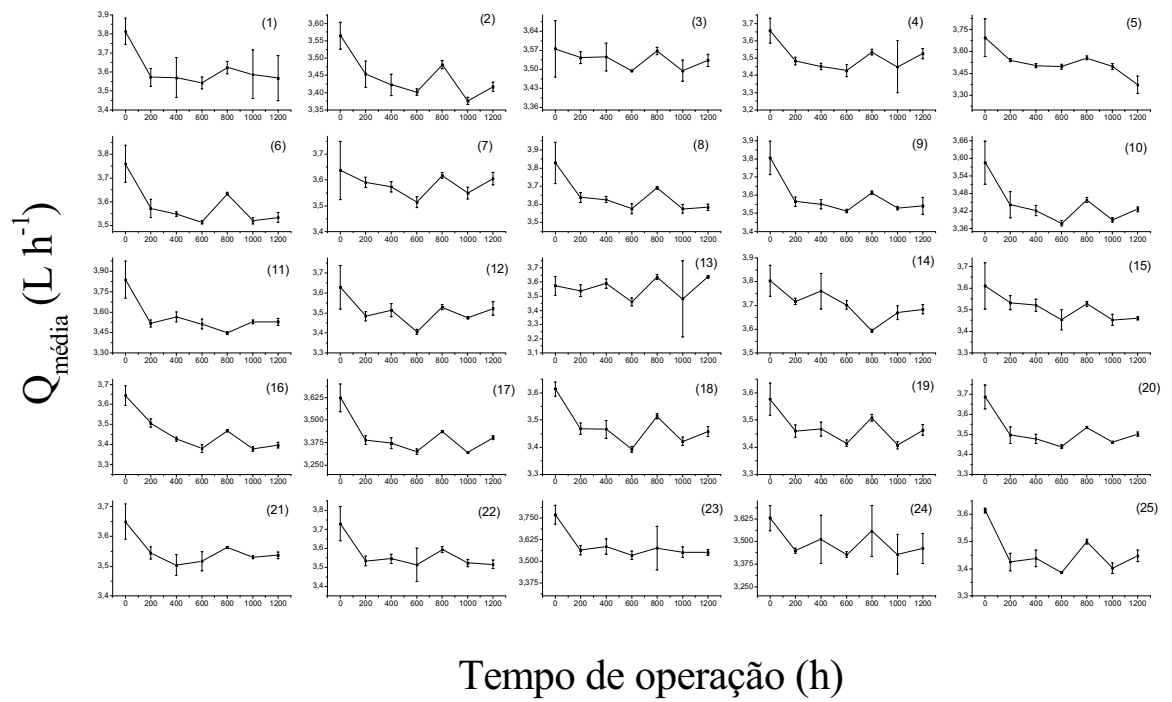


Figura 17 - Valores médios de vazão dos emissores do tubo gotejador NaanPC Laranja, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total.

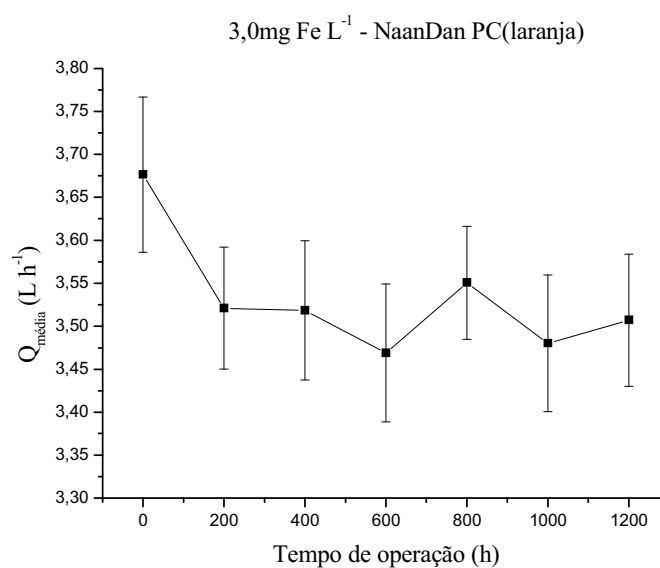


Figura 18 - Valores médios da vazão para o tubo gotejador NaanPC Laranja, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de 3,0 mg L⁻¹ de ferro total.

A vazão média ficou em torno de $3,53 \text{ L h}^{-1} \pm 0,078$, mesmo após 1200 horas de operação. A vazão máxima, de $3,83 \text{ L h}^{-1}$, ocorre no emissor no tempo de 0 h, tendo um incremento em torno de 0,79% da vazão original do fabricante. Já a vazão mínima, de $3,32 \text{ L h}^{-1}$, ocorre no emissor 17 no tempo de 1000 h, tendo uma queda em torno de 12,61% da vazão original do fabricante.

Na figura 19 observa-se os valores médios de vazão dos emissores do tubo gotejador NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de 1,5 mg L⁻¹ de ferro total.

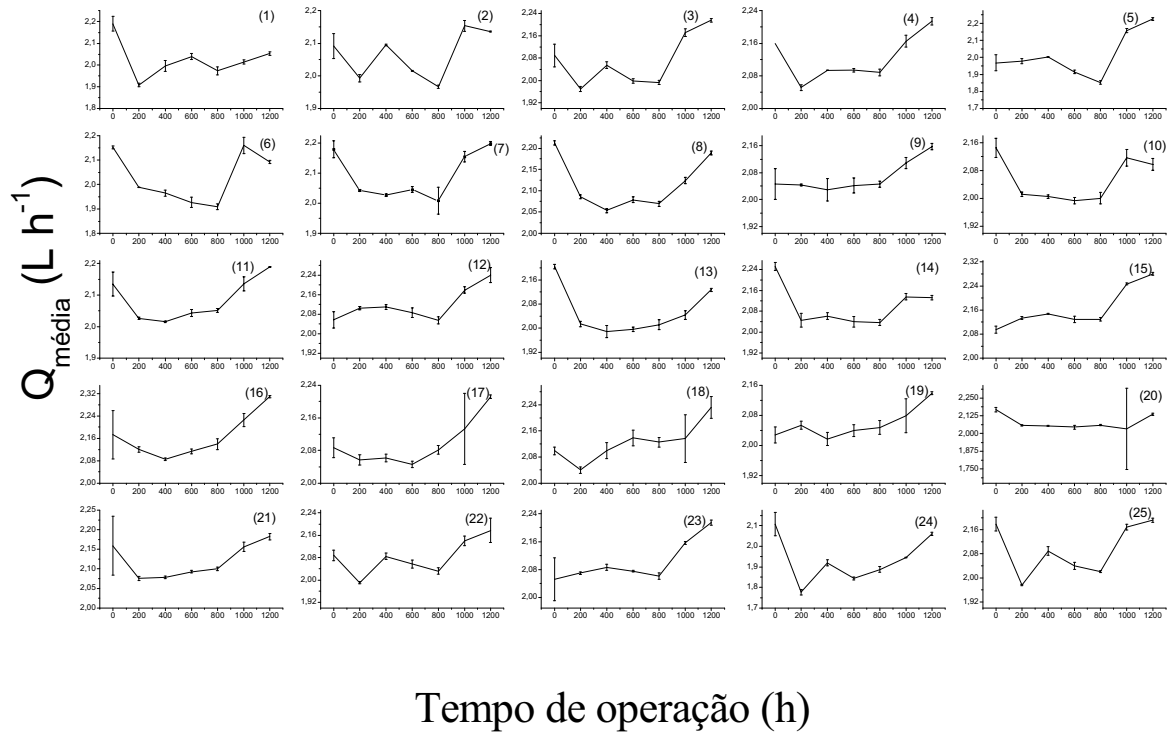


Figura 19 - Valores médios de vazão dos emissores do tubo gotejador NaanPC Azul, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total.

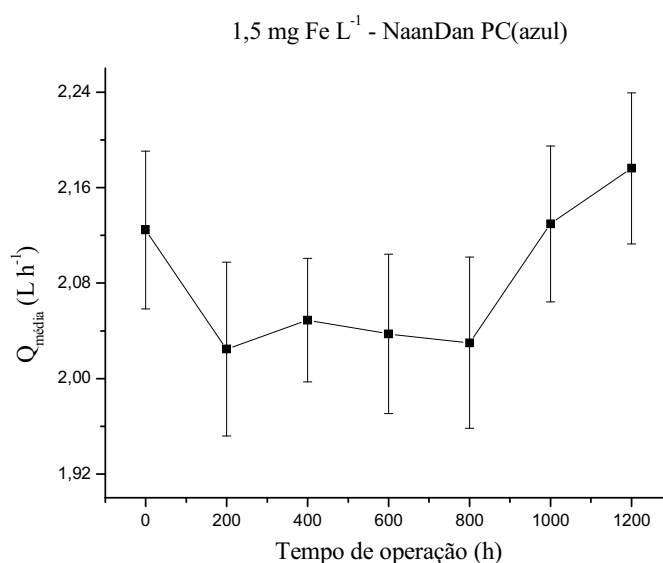


Figura 20 - Valores médios da vazão para o tubo gotejador NaanPC Azul, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de 1,5 mg L⁻¹ de ferro total.

A vazão média ficou em torno de 2,08 L h⁻¹ ± 0,07, mesmo após 1200 horas de operação. A vazão máxima de 2,31 L h⁻¹ ocorreu no emissor 16 no tempo de 1200 h, tendo um incremento em torno de 9,97% em relação a vazão original do fabricante. Já a vazão mínima de 1,84 L h⁻¹ ocorreu no emissor 24 no tempo de 600 h, tendo uma queda em torno de 12,20% da vazão original do fabricante, mostrando que em alguns emissores fica evidente o efeito do entupimento parcial dos mesmos.

Na figura 21 observa-se os valores médios de vazão dos emissores do tubo gotejador NaanPC Azul, em função do tempo de operação, na dose de 3,0 mg L⁻¹ de ferro total.

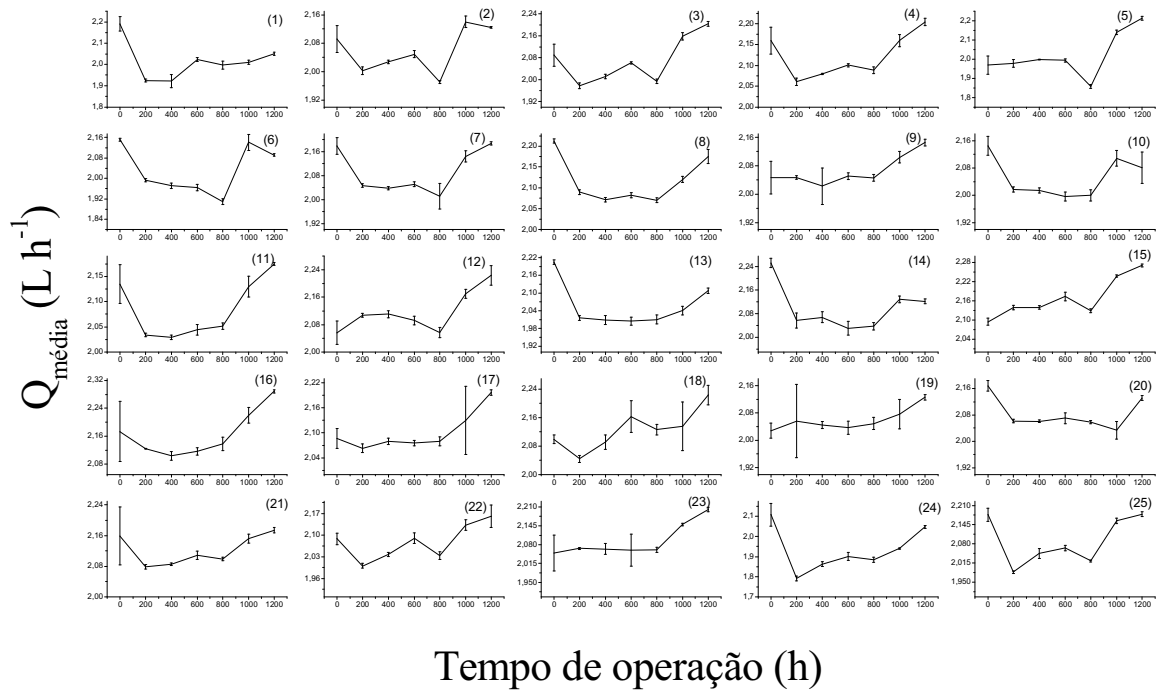


Figura 21 - Valores médios de vazão dos emissores do tubo gotejador NaanPC Azul, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de ferro total.

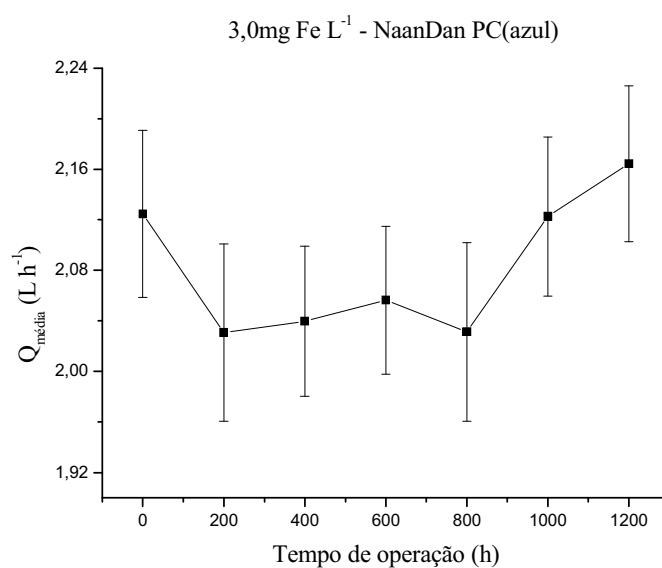


Figura 22 - Valores médios da vazão para o tubo gotejador NaanPC Azul, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na dose de 3,0 mg L⁻¹ de ferro total.

A vazão média ficou em torno de 2,08 L h⁻¹ ± 0,06, mesmo após 1200 horas de operação. A vazão máxima de 2,29 L h⁻¹ ocorreu no emissor 16 no tempo de 1200 h, tendo um incremento em torno de 8,99% em relação a vazão original do fabricante. Já a vazão mínima de 1,86 L h⁻¹ ocorreu no emissor 24 no tempo de 400 h, tendo uma queda em torno de 11,30% da vazão original do fabricante, mostrando que em alguns emissores fica evidente o efeito do entupimento parcial dos mesmos.

Na Figura 23 mostra-se a variação da vazão dos tubo gotejadores NaanPC Azul e NaanPC Laranja, em função do tempo de operação, na doses de 1,5 mg L⁻¹ e 3,0 mg L⁻¹ de ferro total

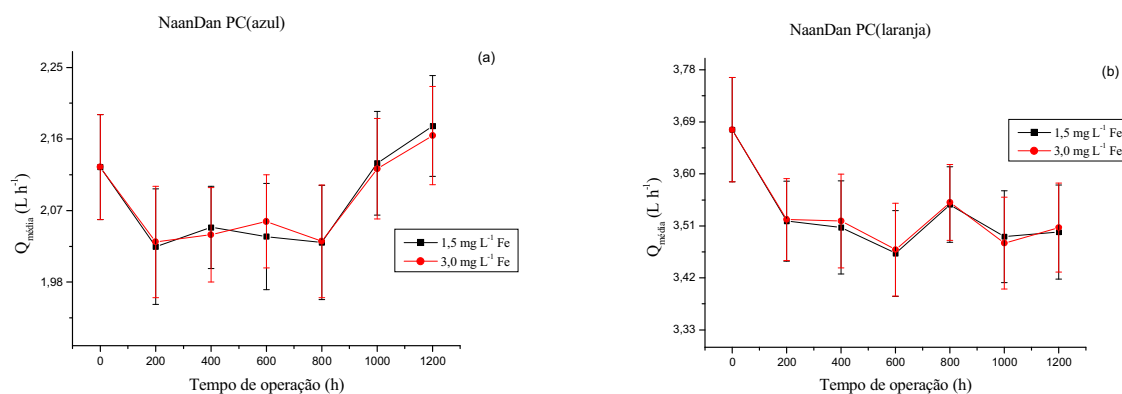


Figura 23 – Variação da vazão dos tubo gotejadores NaanPC Azul(a) e NaanPC Laranja (b), e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na doses de 1,5 mg L⁻¹ e 3,0 mg L⁻¹ de ferro total.

Nas diferentes doses observam-se tendências de variação semelhantes. Entretanto os desvios têm diferenças, mas não significativas.

Na Figura 23a observa-se que independente da dose utilizada ocorreu uma queda até em torno de 800 h e uma elevação a partir da mesma, o que permite afirmar que este comportamento pode se dever ao fato do gotejador apresentar duas saídas de água, sendo que uma delas ficava virada para cima, o que permitiu um maior acúmulo de mucilagem e/ou precipitados na câmara de autocompensação. Em função do comportamento observado, a saída localizada na parte inferior entope, liberando a vazão pela saída superior aumentando novamente sua vazão a valores superiores ao inicial, o que demonstra que se houvesse um maior número de horas trabalhadas, ocorresse uma queda acentuada na vazão sem mais elevações esperando assim que ocorra o entupimento total do emissor.

Na Figura 23b observa-se que independente da dose utilizada também ocorreu uma queda, mas até em torno de 600 h e uma elevação a partir da mesma e uma queda novamente, provavelmente devido ao fato do fechamento da saída inferior e abertura da saída superior.

Na Figura 24 mostra-se o comparativo da variação da vazão dos tubo gotejadores NaanPC Azul e NaanPC Laranja, em função do tempo de operação, na doses de 1,5 mg L⁻¹ e 3,0 mg L⁻¹ de ferro total

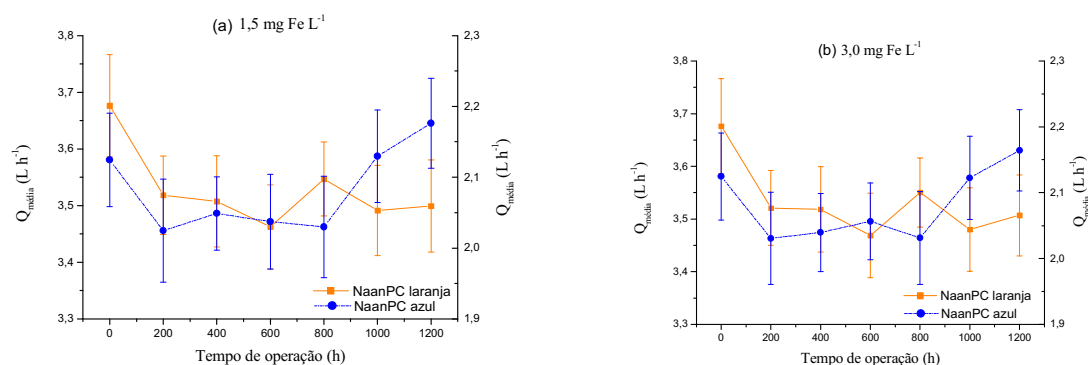


Figura 24 – Comparativo da variação da vazão dos tubo gotejadores NaanPC Azul e NaanPC Laranja, e seus respectivos desvios em função do tempo de operação, na doses de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ (a) e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ (b) de ferro total.

No geral, os comportamentos são semelhantes, ou seja, há quedas e elevações nas vazões em ambos os tratamentos, somente em tempos diferentes nos diferentes tubos.

6.5.1 Ajuste de equações de vazão em função do tempo de operação

Como NaanPC laranja e NaanPC azul têm diferentes tendências de variação de vazão média em função do tempo de operação, foram propostos 4 modelos estatísticos polinomiais de estimativa da vazão média dos tubos em função do tempo de funcionamento acumulado em horas.

A Figura 25 mostra as correlações entre vazão média e tempo de operação em horas acumuladas para os 4 tratamentos e modelos polinomiais ajustados.

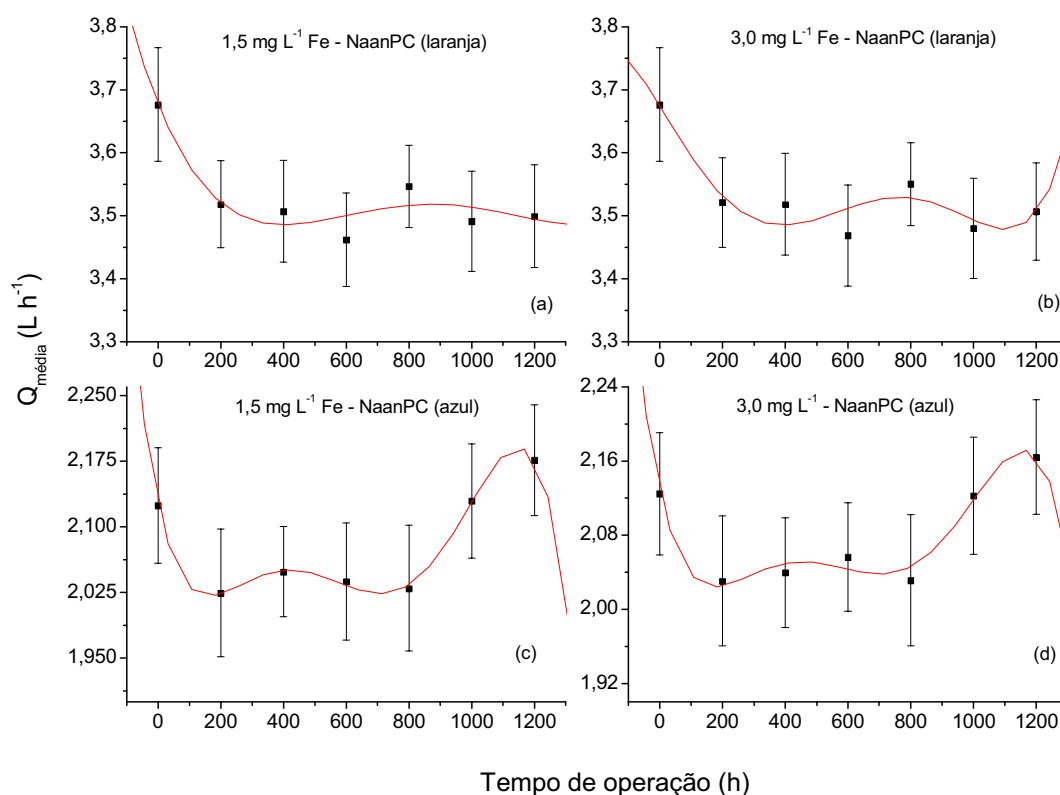


Figura 25 – Correlações entre vazão média e tempo de operação em horas acumuladas para os 4 tratamentos: (a) modelo NaanPC laranja, dose 1,5 mg L⁻¹ Fe; (b) modelo NaanPC laranja, dose 3,0 mg L⁻¹ Fe; (c) modelo NaanPC azul, dose 1,5 mg L⁻¹ Fe; (b) modelo NaanPC azul, dose 3,0 mg L⁻¹ Fe.

Os modelos foram ajustados de forma a permitir que se estime a vazão média de cada um dos modelos de tubo gotejadores testados em cada uma das dosagens propostas, utilizando o tempo de operação de 0 a 1200 horas como entrada. Esta modelagem visa facilitar a obtenção de valores médios de difícil acesso como no caso das vazões testadas nos tratamentos propostos em função de um parâmetro de entrada simples, que é o tempo, apresentando elevados coeficientes de determinação que evidenciam um elevado ajuste das curvas aos dados.

As funções polinomiais de quarto grau (Figura 25a) e quinto grau (Figuras 25b, 25c e 25d) que melhor se ajustaram à evolução da vazão média em função do tempo de operação em horas acumuladas foram expressas respectivamente por:

NaanPC laranja (1,5 mg L⁻¹ Fe)

$$Q_{méd} = 3,67673 - 0,00123t + 2,68826 \times 10^{-6}t^2 - 2,26667 \times 10^{-9}t^3 + 6,46599 \times 10^{-11}t^4 \quad (12)$$

NaanPC laranja (3,0 mg L⁻¹ Fe)

$$Q_{méd} = 3,67372 - 8,16967 \times 10^{-4}t - 2,3486 \times 10^{-7}t^2 - 5,05095 \times 10^{-9}t^3 - 6,80625 \times 10^{-12}t^4 + 2,6263510^{-15}t^5 \quad (13)$$

NaanPC azul (1,5 mg L⁻¹ Fe)

$$Q_{méd} = 2,12485 - 0,00165t + 8,90797 \times 10^{-6}t^2 - 1,93952 \times 10^{-8}t^3 + 1,80609 \times 10^{-11}t^4 - 5,9208 \times 10^{-15}t^5 \quad (14)$$

NaanPC azul (3,0 mg L⁻¹ Fe)

$$Q_{méd} = 2,12548 - 0,0015t + 7,61525 \times 10^{-6}t^2 - 1,58455 \times 10^{-8}t^3 + 1,43161 \times 10^{-11}t^4 - 4,59457 \times 10^{-15}t^5 \quad (15)$$

Onde:

t – tempo, em horas; e

Q_{méd} – vazão média, em L h⁻¹.

Os elevados coeficientes de determinação, R² = 0,84213; R² = 0,83924; R² = 0,9982 e R² = 0,96943, respectivamente, mostram que as vazões médias estão bem correlacionadas com os tempos de operação em horas acumuladas.

7 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos durante o experimento conclui-se que:

- Após 1200 h de uso do tubo gotejador NaanPC laranja manteve a vazão nominal praticamente constante. O tubo gotejador NaanPC azul apresentou uma tendência de aumentar sua vazão nominal com o tempo de uso, tendo um incremento em torno de 6,94% e 6,35%, nas doses $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de Fe, respectivamente, a partir de 800 h trabalhadas, devido deterioração da membrana flexível dos gotejadores autocompensantes em função da água rica em ferro;
- O Coeficiente de variação de vazão (CVq) do tubo gotejador NaanPC laranja variou menos ao longo de 1200 horas de funcionamento do sistema. O tubo gotejador NaanPC azul mostrou-se mais sensível ao CVq, devido ao maior entupimento;
- Os valores médios do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) reduziram para dois modelos de tubo gotejadores, com a utilização de água ferruginosa nas diferentes doses, mas permitiu mantê-los na classificação de excelente, mesmo após 1200 horas de funcionamento do sistema de irrigação;

- O coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) mostrou-se mais sensível as variações de uniformidade de aplicação de água pelo efeito do entupimento, pois em seu cálculo, utilizam-se valores médios dos 25% dos menores valores das vazões. Entretanto mesmo sendo mais sensível, eles se mantiveram na classificação de excelente, mesmo após 1200 horas de funcionamento do sistema de irrigação;
- Nos ensaios realizados, o tubo gotejador NannPC laranja apresentou um melhor desempenho, mantendo suas vazões médias praticamente constantes mesmo quando submetido a dose de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de Fe. Este emissor pode contribuir para projetos de irrigação mais econômicos, pois não requerem sistemas de filtragem sofisticados;
- Foram ajustados equações de estimativa de vazão em função do tempo de funcionamento do sistema, nas doses de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ e $3,0 \text{ mg L}^{-1}$ de Fe, nos dois tipos de tubo gotejadores. Estas equações permitem calcular a vazão média em função de um parâmetro de fácil acessibilidade que é o tempo em horas com alto coeficiente de determinação. Estas equações permitem verificar variação das vazões médias até 1200 horas. Estudos posteriores se tornam necessários para determinação de estimativa de vazão média do período inicial até o entupimento total, de forma o usuário possa identificar em função do tipo de tubo, dosagem de ferro total e número de horas de funcionamento se o entupimento será parcial ou total ajudando nas tomadas de decisão no campo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIROLDI, R. P. S. **Análise do desempenho de gotejadores e da prevenção do entupimento com água residuária**. 2007. 76 p. Tese (Irrigação e Drenagem), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

ASAE Standards 1999 Standards engineering practices data: EP405.1. **Design and installation of microirrigation systems**. St. Joseph. Mich: American Society of Agricultural Engineers. Dec., p. 879-883, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Emissores para sistema de irrigação localizada**. PNBR 12: 02 – 08 – 021. São Paulo, 1986. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Emissores para sistema de irrigação localizada: avaliação de características operacionais – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1987. 6 p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006.625p.

BUCKS, D. A.; MYERS, L. E. Uniform irrigation with low-pressure trickle systems. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 98, n. 3, p. 341-346, sept.1972.

BUCKS, D. A.; NAKAYAMA, F. S.; GILBERT, R.G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. **Agricultural Water Management**, v.2, p.149-162, 1979.

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 68, p. 135-149, 2004.

CARARO, D. C. **Manejo de irrigação por gotejamento para aplicação de água residuária visando a minimização do entupimento de emissores**. 2004. 130 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

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

COELHO, R. D. **Contribuições para irrigação pressurizada no Brasil**. 2007. 192 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

CORDEIRO, E. A. **Influência do tratamento de água ferruginosa no desempenho de sistema de irrigação por gotejamento**. Viçosa: UFV, 2002. 92 p. Dissertação de Mestrado.

FAVETTA, G.M; BOTREL, T. A. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada: validação de equações. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 58, n. 2, p.427-430, Abr/jun. 2001.

GILBERT, R. G.; FORD, H. W. Operational principles/emitter clogging. In: NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. **Trickle irrigation for crop production**. Elsevier Publishers, 1986. 383p.

GILBERT, R. G; NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D.A.; FRENCH, O. F.; ADAMSON, K. C. Trickle irrigation: emitter clogging and flow problems. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 3, p. 159, 1981.

HANSON, B. R.; LAMM, F.R. Drip irrigation of row crops: an overview. INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS. 5., Orlando, 1995. **Proceedings**. St. Joseph: ASAE, 1995. P. 651-655.

HILLEL, D. **Advances in irrigation**. New York: Academic Press, 1982. V. 1, 302 p.

KELLER, J.C.; BLISNER, R.D. Sprinkler and trickle irrigation. New York: van Norstrand Reinhold, 1990, 652p.

LEITE, J. A. O. **Avaliação da susceptibilidade de tubogotejadores ao entupimento por precipitados químicos de carbonato de cálcio**. Lavras, 1995. 64p. Dissertação (Mestrado Departamento de Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras – UFLA.

LÓPEZ, J. R.; ABREU, J. M. H.; REGALADO, A. P; HERNÁNDEZ, J. F. **Riego localizado**. 2. Ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1997. 405 p.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 318p.

MANTOVANI, E. C.; RAMOS, M.M. Manejo de irrigação. In: COSTA, E. F.; VIEIRA, R. F.; VIANA, P. A. **Quimigação: aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro de Pesquisa Milho e Sorgo. – Brasília: EMBRAPA-SSI, 1994. P. 129-158.

MEDINA SAN JUAN, J. A. **Riego por goteo teoria y práctica**. 4 ed. Espanha: Ediciones Mundi-Prensa, 2000. 302 p.

MERRIAM, J. L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Utah State University, 1978. 271 p.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production: design, operation and management**. New York: Elsevier, 1986. 383p.

OLITTA, A. F. L. Projeto de irrigação localizada. In: BRASIL. Programa nacional de irrigação. **Curso de elaboração de projetos de irrigação**. Brasília, 1986. pg T11

PITTS, D. J.; HAMAN, D. Z.; SMAJSTRIA, A. G. **Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems**. Florida Cooperative Extension Service. University of Florida. bulletin 258. p. 12. 1990.

PIZARRO CABELLO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia**. 3.ed. Madri:Mundi Prensa, 1996. 513p.

PIZARRO, F. **Riego localizados de alta frecuencia: goteo, microaspersión, exudacion**. 2. Ed. Madrid: Mundi Prensa, 1990. 471p.

POVOA, A. F.; HILLS, D. J. Sensitivity of microirrigation system pressure to emitter plugging and lateral line perforations. **Transactions of the ASAE**, St, Joseph, v. 37, n.3, p. 793-799,1994.

RALPH, D.E.; STEVENSON, J.M. The role of bacteria in well clogging. *Wat. Res.* vol. 29. n. 1.p.365-369. **Elsevier Science**, 1995.

RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SCHISCHA, A.; SAGI, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. **Irrigation Science**, v.13, p.129-39, 1992.

RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SCHISCHA, A.; SAGI, G.; YECHIALY, Z.; LEV, Y. Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent 1. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.33, p. 127-37, 1997.

RESENDE, R. S. **Suscetibilidade de gotejadores ao entupimento de causa biológica e avaliação do desentupimento via cloração da água de irrigação**. Piracicaba, 1999. 77p. Dissertação (Mestrado Departamento de Engenharia Rural) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

RESENDE, R. S. **Intrusão radicular e efeito de vácuo em gotejamento enterrado na irrigação de cana-de-açúcar**. Piracicaba, 2003. 124 p. Tese (Doutorado Departamento de Engenharia Rural) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

SOLOMOM, K. H. Manufacturing variation of trickle emitter. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v. 22, n. 4, p. 1034-1043, July/Aug. 1979.

TAJRISHY, M. A.; HILLS, D. J.; TCHOBANOGLIOUS, G. Pretreatment of secondary effluent for drip irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. New York, v. 20, n. 4, p. 716-731, 1994.

TEIXEIRA, M. B. **Efeitos de dosagens extremas de cloro e pH na vazão de gotejadores autocompensantes (irrigação localizada)**. 2006. 322 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2006.

VANZELA, L. S. **Qualidade de água para irrigação na microbacia do Córrego Três Barras no Município de Marinópolis**. 2004. 105 p. Dissertação (Mestrado em Sistema de Produção) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Universidade Estadual paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2004.

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

ZOCOLER, J. L. Avaliação do desempenho de sistemas de irrigação. 2007. Disponível em: <http://www.agr.feis.unesp.br/corso5.htm>. Acesso em: 21 mar. 2009.

9 APÊNDICE

Quadro 2 – Análise de Variância das variáveis avaliadas: Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), Vazão relativa (Qr), Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e Coeficiente de Variação da Vazão (CVQ). Botucatu – SP, 2010.

FV	G. L.	CUD			Qr			CUC			CVq		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F	SQ	QM	F	SQ	QM	F
D. Fe	1	0,0228	0,0228	0,0392 ^{ns}	0,0983	0,0983	0,0337 ^{ns}	0,0430	0,0430	0,3068 ^{ns}	0,0002	0,00017	0,0001 ^{ns}
Got.	1	68,5061	68,5061	117,3186*	88,5907	88,5907	30,3822*	11,0659	11,0659	78,949*	66,3363	66,3363	46,5104*
Tempo	6	28,6266	4,7711	8,1706*	205,2378	34,2063	11,7311*	6,8053	1,1342	8,0920*	25,1417	4,1903	2,9379*
D. Fe x Got.	1	0,0185	0,0185	0,0318 ^{ns}	0,2766	0,2766	0,0948 ^{ns}	0,0226	0,0226	0,1612 ^{ns}	0,0019	0,0019	0,0013 ^{ns}
D. Fe x T	6	0,6873	0,1145	0,1962 ^{ns}	5,2359	0,8726	0,2993 ^{ns}	0,1994	0,0332	0,2371 ^{ns}	0,7139	0,1189	0,0834 ^{ns}
Got x Tempo	6	6,1766	1,0294	1,7629 ^{ns}	124,5486	20,7581	7,1189*	1,8629	0,3105	2,2151 ^{ns}	8,3891	1,3982	0,9803 ^{ns}
D. Fe x Got. x Tempo	6	1,2816	0,2136	0,3658 ^{ns}	5,3155	0,8859	0,3038 ^{ns}	0,4546	0,0757	0,5405 ^{ns}	1,3112	0,2185	0,1532 ^{ns}
Resíduo	56	32,7002	0,5839	-	163,2890	2,9159	-	7,8493	0,1402	-	79,8710	1,4263	-
Média		95,3598			97,0534			96,9381				4,2758	
CV (%)		0,8200			1,7510			0,3220				28,2910	

*Significativas ao nível de 5% de probabilidade. ns- Não significativo ao nível de 5% de probabilidade.