Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Efeito do pulso de partículas sólidas na obstrução de tubogotejadores

Marcos Antonio Correa Matos do Amaral

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2017

Marcos Antonio Correa Matos do Amaral
Engenheiro Agrônomo

Efeito do pulso de partículas sólidas na obstrução de tubogotejadores
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Tese apresentada para obtenção do título Doutor ou em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Amaral, Marcos Antonio Correa Matos do

Efeito do pulso de partículas sólidas na obstrução de tubogotejadores / Marcos Antonio Correa Matos do Amaral.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011 - - Piracicaba, 2017.

66 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Irrigação localizada 2. Pulso de sujidade 3. Obstrução 4. Qualidade da água I. Título

DEDICATÓRIA

A Deus, pelo Seu infinito amor de Pai, e
a Nossa Senhora de Nazaré, por sua
contínua intercessão.

OFEREÇO

Aos meus pais,
Marcos Antônio A. do Amaral e
Sônia Regina C. M. do Amaral.
Ao meu irmão,
Madson Anderson C. M. do Amaral.
E aos meus avós,
Deodato Marques de Matos (*in memorian*),
Maria do Carmo Corrêa de Matos (*in memorian*),
Paulo Erzon do Amaral (*in memorian*) e
Clair Abreu do Amaral (*in memorian*)

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus e Nossa Senhora, por todas as graças alcançadas.

Aos meus amados pais e irmão, por todo amor e sacrifícios oferecidos, e pelo exemplo de vida transmitido. A todos os familiares, que colaboraram com a minha formação e me incentivaram.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade, pela acolhida e pela infraestrutura disponibilizada para a realização do doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

A Drip Plan pela doação do sistema de irrigação utilizado nesta tese.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Engenharia de Irrigação (INCTEI) pela infraestrutura disponibilizada para a realização esta tese

Ao Professor Dr. Rubens Duarte Coelho pela orientação e pelos ensinamentos que foram importantes para a minha formação científica.

Aos Professores: Dra. Patrícia Marques, Dra. Sônia Piedade, Dr. Sérgio Duarte, Dr. Marcos Folegatti, Dr. Tarlei Botrel, Dr. José Frizzzone, Dr. Paulo Sentelhas pelo conhecimento compartilhado e pelo apoio na realização deste trabalho.

Aos Técnicos: Dr. Antonio Pires de Camargo e MSc. Áureo Santana de Oliveira pelo apoio inestimável oferecido, sem o qual seria impossível a realização desta tese.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, Gilmar Grigolon, Paula Pedro, Antônio Gozzo (Seu Antônio), Ângela Silva, Beatriz Novaes, Davilmar Colevatti, Luiz Camargo, Luis Afonso Costa (in memorian), Seu Chicão e Seu Lino pela atenção e disposição durante a realização dos trabalhos.

Aos amigos de pós-graduação: Jefferson José, Ailson Maciel, Asdrubal Farias, Maria Moreno, Arthur Sanches, Luis Carvalho, Lucas Santos, Alex Nunes, Danilo Gomes, Débora Souza, Jefferson O. Costa, João P. Francisco, Hermes Rocha, Jonathan Lizcano, Fernando Barbosa, Osvaldo Neto, Amarilis Shiroma, Rogério Lavanholi, Marcus Talamini, Wagner Bombardelli, Ezequiel Saretta e outros do PPGESA que não foram mencionados.

Aos professores da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), em especial ao Professor Dr. Rodrigo Otávio Rodrigues de Melo Souza, pelo exemplo profissional e incentivo à carreira científica.

Aos padres e irmãos da Pia Sociedade de São Francisco de Sales (Salesianos de Dom Bosco) pela formação humana e espiritual nesta fase importante da minha vida.

Ao Grupo de Oração Universitário (GOU), em especial aos amigos Fredy Aguiar, Mariana Pontin, Márcio Soares, Flaviane Cunha, Tati Tokairin e Vanessa Queiroz, pela confiança em mim depositada para coordenação do Grupo de Partilha e Perseverança (GPP).

Aos alunos de Agronomia da disciplina de Irrigação em 2015, pela honra de servi-los como Estagiário Docente.

A todas as pessoas que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho. Muito Obrigado e que Deus os abençoe!

EPÍGRAFE

“Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, se não tiver caridade, sou como o bronze que soa, ou como o címbalo que retine. Mesmo que eu tivesse o dom da profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência; mesmo que tivesse toda a fé, a ponto de transportar montanhas, se não tiver caridade, não sou nada. Ainda que distribuísse todos os meus bens em sustento dos pobres, e ainda que entregasse o meu corpo para ser queimado, se não tiver caridade, de nada valeria! A caridade é paciente, a caridade é bondosa. Não tem inveja. A caridade não é orgulhosa. Não é arrogante. Nem escandalosa. Não busca os seus próprios interesses, não se irrita, não guarda rancor. Não se alegra com a injustiça, mas se rejubila com a verdade. Tudo desculpa, tudo crê, tudo espera, tudo suporta. A caridade jamais acabará. As profecias desaparecerão, o dom das línguas cessará, o dom da ciência findará. A nossa ciência é parcial, a nossa profecia é imperfeita. Quando chegar o que é perfeito, o imperfeito desaparecerá. Quando eu era criança, falava como criança, pensava como criança, raciocinava como criança. Desde que me tornei homem, eliminei as coisas de criança. Hoje vemos como por um espelho, confusamente; mas então veremos face a face. Hoje conheço em parte; mas então conhecerei totalmente, como eu sou conhecido. Por ora subsistem a fé, a esperança e a caridade - as três. Porém, a maior delas é a caridade. ”

I Coríntios 13: 1-13

*“Semeemos e imitemos o agricultor que espera
com paciência o tempo da colheita”
“Os nossos tempos são difíceis? Foram sempre
assim, mas Deus não falhou nunca com sua ajuda”*

Dom Bosco

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1. Irrigação por gotejamento	15
2.2. A obstrução de gotejadores	16
2.3. Obstrução por fatores físicos.....	18
2.4. Velocidade limite de depósito	20
2.5. Pulso de sujidade.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Local do experimento.....	23
3.2. Gotejadores	23
3.3. Bancada de ensaios	23
3.4. Tratamentos de pulso de partículas	25
3.5. Procedimento de ensaio	26
3.6. Análise estatística.....	27
3.6.1. Análise Estatística 1 - Tratamentos para cada gotejador	28
3.6.2. Análise Estatística 2 - Interação dos tratamentos e a posição dos gotejadores.....	28
3.6.3. Análise Estatística 3 –Fatorial.....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Análise do gotejador modelo 1	31
4.1.1. Análise Estatística 1 - Tratamentos para cada gotejador (Modelo1)	31
4.1.2. Análise Estatística 2 - Interação dos tratamentos e a posição dos gotejadores (Modelo 1).....	35
4.1.3. Análise Estatística 3 – Fatorial (Modelo 1)	38
4.1.3.1. Interação Posição da linha x Granulometria	39
4.1.3.2. Interação Posição da linha x Concentração.....	41
4.1.3.3. Interação Concentração x Granulometria	42
4.1.3.4. Fatores isolados.....	44
4.1.3.4.1. Posição da linha	44
4.1.3.4.2. Granulometria	45
4.1.3.4.3. Concentração.....	45
4.2. Análise do gotejador modelo 2	46
4.2.1. Análise Estatística 1 - Tratamentos para cada gotejador (Modelo 2)	46

4.2.2. Análise Estatística 2 - Interação dos tratamentos e a posição dos gotejadores (Modelo 2)	50
4.2.3. Análise Estatística 3 – Fatorial (Modelo 2)	53
4.2.3.1. Interação Posição da linha x Granulometria	54
4.2.3.2. Interação Posição da linha x Concentração	56
4.2.3.3. Interação Concentração x Granulometria	58
4.2.3.4. Fatores isolados	60
4.2.3.4.1. Posição da linha	60
4.2.3.4.2. Granulometria	60
4.2.3.4.3. Concentração	61
5. CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS	65

RESUMO

Efeito do pulso partículas sólidas na obstrução de tubogotejadores

Para que o sistema de irrigação localizada opere com uma boa uniformidade de aplicação, é necessário que sejam adotadas boas práticas de instalação e manejo, como também, que a fonte de água atenda aos requisitos de qualidade exigida e que o sistema de filtragem contribua para reduzir os riscos de obstrução. Entretanto, há condições em que o risco de obstrução pode ocorrer após o sistema de filtragem. Procedimentos inadequados de montagem e manutenção da linha podem levar a entrada de partículas sólidas que oferecem risco de obstrução. A característica da partícula associada a posição da linha pode favorecer ou reduzir os riscos de obstrução. O trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do pulso de partículas em diferentes posições de linha. O experimento foi realizado no Instituto Nacional Ciência e Tecnologia em Engenharia de Irrigação, INCT-EI, vinculado ao Laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia de Biossistemas, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- (ESALQ/USP). Foram avaliados dois modelos de tubos gotejadores com emissores convencionais (não compensantes), integrados, de formato plano (tipo pastilha), submetidos a pulso por partículas sólidas combinando três fatores: posição da linha (para cima, para baixo e para o lado), diâmetro da partícula (0,05-0,1mm; 0,1-0,25mm; 0,25-0,5mm), concentração de partículas (5g, 10g e 20g), em sete posições de gotejadores na linha espaçados a cada 0,5 m. Foi utilizado o delineamento de blocos não casualizados, e para a comparação das médias de vazões relativas, foi adotado o teste de Tukey com significância de 5% e 10% na análise de variância. A análise fatorial revelou que o modelo de gotejador 1 apresenta maior susceptibilidade a obstrução nos quatro primeiros gotejadores, com diferença significativa para fatores isolados quanto em interação. O modelo 2 não apresentou diferença estatística para o fator concentração. Para os demais fatores e interações, foi observado que gotejadores mais distantes também podem apresentar redução de vazão quando submetidos ao pulso. Em ambos modelos, observou-se que o diâmetro da partícula é um fator que influencia a obstrução de gotejadores. Os gotejadores iniciais estão mais propensos a obstrução quando submetidos a pulsos de partículas. A posição da linha voltada para o lado contribui para redução dos riscos de obstrução.

Palavras-chave: Irrigação localizada, Pulso de sujidade, Obstrução, Qualidade da água

ABSTRACT

Effect of solid particles pulse on the obstruction of drip line (Irrigation)

For an irrigation system located operate with good uniformity of application, it is necessary to adopt good installation and management practices, as well as the water source meets the required quality requirements and the filtering system contributes to reduction of obstruction's risks. However, there are conditions where the risk of obstruction may occur after the filtering system. Inadequate line assembly and maintenance procedures can lead to the entry of solid particles that allow the clogging emitters. The particle characteristic associated with lineage may favor or reduce the risk of obstruction. The objective of this work was to evaluate the effect of the pulse of particles in different positions of the line. The experiment was carried out at the National Institute of Science and Technology in Irrigation Engineering, INCT-EI, linked to the Irrigation Laboratory of the Department of Biosystems Engineering, School of Agriculture "Luiz de Queiroz" - (ESALQ / USP). Two tube models of conventional drippers (non-compensating) were submitted to pulses by solid particles combining three factors: line position (up, down and to the side), particle diameter (0.05-0.1 mm, 0.1-0.25mm, 0.25- 0.5mm), particle concentration (5g, 10g and 20g) in seven positions of drippers in the line spaced every 0.5 m. The design of non-randomized blocks was used, and the Tukey test with significance of 5% and 10% as analysis of variance for comparison of means. The factorial analysis revealed that the model drip tube 1 presented greater susceptibility to obstruction in the first four drippers, with a significant difference for factors isolated and in interaction. The model 2 did not present statistical difference for the concentration factor, however, for the other factors and interactions, it was observed that more distant drippers can also present reduction of flow when submitted to the pulse. In both models, it was observed that the particle diameter is a factor that influences the drip obstruction. It has been observed that the diameter of the particle is a factor that influences the obstruction of drippers. The initial drippers are more prone to obstruction when subjected to pulses of particles. The position of the line facing the side of the contributed to reduces the risk of obstruction.

Keywords: Localized irrigation, Pulse of dirtiness, Obstruction, Water quality

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de regimes de Newitt et al. (1955)	21
Figura 2. Esquema de gotejador Drip-Tech utilizado no experimento	23
Figura 3. Estrutura de um manifold do tipo bifurcações.....	23
Figura 4. Esquema da bancada de ensaios de obstrução	24
Figura 5. A) Entrada das linhas; B) Saída das linhas; C) Disposição das linhas na bancada; D) Tomada de pressão no início da linha	24
Figura 6. Representação da posição de inserção dos gotejadores	25
Figura 7. A) Agitador mecânico; B) Frações de areia separadas por faixas granulométricas ..	26
Figura 8. Análise conjunta dos tratamentos para os gotejadores 1, 2 e 3 do modelo 1. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador	33
Figura 9. Análise conjunta dos tratamentos para os gotejadores 4, 5 e 6 do modelo 1. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador	34
Figura 10. Análise conjunta dos tratamentos para o gotejador 7 do modelo 1. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.	35
Figura 11. Análise da interação dos tratamentos com a posição do gotejador na linha para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam médias dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	37
Figura 12. Análise da interação Posição da linha para baixo x Granulometria para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.	39
Figura 13. Análise da interação Posição da linha para cima x Granulometria para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.	40
Figura 14. Análise da interação Posição da linha para o lado x Granulometria para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.	40
Figura 15. Análise da interação Posição da linha x Concentração de 5g para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.	41
Figura 16. Análise da interação Posição da linha x Concentração de 10g para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.	41
Figura 17. Análise da interação Posição da linha x Concentração de 20g para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.	42
Figura 18. Análise da interação Granulometria x Concentração de 5g para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.	42
Figura 19. Análise da interação Granulometria x Concentração de 10g para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.	43
Figura 20. Análise da interação Granulometria x Concentração de 20g para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.	44
Figura 21. Análise do efeito da posição da linha para diferentes posições de gotejador do modelo 1. Letras maiúsculas comparam médias dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	44

Figura 22. Análise do efeito da granulometria para diferentes posições de gotejador do moledo 1. Letras maiúsculas comparam médias dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	45
Figura 23. Análise do efeito da concentração para diferentes posições de gotejador do moledo 1. Letras maiúsculas comparam médias dos tratamentos para cada posição do gotejador.	46
Figura 24. Análise conjunta dos tratamentos para os gotejadores 1,2 e 3 do modelo 2. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	48
Figura 25. Análise conjunta dos tratamentos para os gotejadores 4,5 e 6 do modelo 2. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	49
Figura 26. Análise conjunta dos tratamentos para o gotejador 7 do modelo 2. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	50
Figura 27. Análise da interação dos fatores com a posição do gotejador na linha para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam médias dos tratamentos para cada posição do gotejador.	52
Figura 28. Análise da interação Posição da linha para baixo x Granulometria para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	54
Figura 29. Análise da interação Posição da linha para cima x Granulometria para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	55
Figura 30. Análise da interação Posição da linha para o lado x Granulometria para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.	55
Figura 31. Análise da interação Posição da linha x Concentração de 5g para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	56
Figura 32. Análise da interação Posição da linha x Concentração de 10g para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	57
Figura 33. Análise da interação Posição da linha x Concentração de 20g para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	57
Figura 34. Análise da interação Granulometria x Concentração de 5g para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	58
Figura 35. Análise da interação Granulometria x Concentração de 10g para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	59
Figura 36. Análise da interação Granulometria x Concentração de 20g para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	59
Figura 37. Análise do efeito da posição da linha para diferentes posições de gotejador do moledo 2. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	60
Figura 38. Análise do efeito do diâmetro de partícula para diferentes posições de gotejador do moledo 2. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	61
Figura 39. Análise do efeito da concentração para diferentes posições de gotejador do moledo 2. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Riscos potenciais de entupimento dos emissores irrigação por gotejamento	16
Tabela 2. Classificação de emissores quanto a sensibilidade ao entupimento.....	17
Tabela 3. Causas dominantes de entupimento com a sua porcentagem relativa de ocorrência em irrigação por gotejamento	19
Tabela 4. Nomenclatura adotada para representação dos fatores.	25
Tabela 5. Classificação adotada para representação dos tratamentos.	26
Tabela 6. Quadro de análise da variância dos tratamentos para cada gotejador	28
Tabela 7. Quadro de análise da variância dos tratamentos (Interação tratamentos x posição dos gotejadores).....	28
Tabela 8. Quadro de análise de variância dos tratamentos	29
Tabela 9. Quadro de análise da variância dos tratamentos para o gotejador modelo 1	31
Tabela 10. Quadro de análise da variância dos tratamentos para o modelo 1	38
Tabela 11. Quadro de análise da variância dos tratamentos para o gotejador modelo 2	46
Tabela 12. Quadro de análise da variância dos tratamentos para o modelo 2.	53

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos na área de irrigação promoveram inúmeras vantagens aos agricultores, uma vez que ofereceram algumas soluções para problemas relacionados a utilização dos recursos hídricos. A irrigação localizada, especialmente, levou a otimização das áreas de cultivo uma vez que permitiu maior controle e organização da produção pelo aumento da eficiência do uso da água.

Os sistemas de irrigação localizada favorecem a aplicação de água com menores perdas, melhor eficiência e menor custo energético. Para que o sistema opere com uma boa uniformidade de aplicação, é necessário que sejam adotadas boas práticas de instalação e manejo do sistema, como também, que a fonte de água atenda aos requisitos de qualidade exigida e que o sistema de filtragem contribua para reduzir os riscos de obstrução.

Há situações em que a obstrução pode ocorrer pela entrada de partículas após o sistema de filtragem, como exemplo os resíduos plásticos ou grãos de areia, que adentram a malha hidráulica durante a etapa de montagem ou manutenção das linhas. Quando o sistema de irrigação é acionado, esses resíduos percorrem o sistema como pulsos de sujeira que podem obstruir os gotejadores. São pouco conhecidos os processos que envolvem a obstrução de gotejadores nestas condições, tampouco é desenvolvida uma metodologia própria para compreensão deste processo. Por isso, procura-se simular em laboratório situações que possam ocorrer em campo e assim buscar soluções para os problemas.

As pesquisas buscam compreender que fatores dominam o processo de obstrução, como ele ocorre, além da associação de condições que podem tanto favorecer como reduzir as perdas de uniformidade. Sabe-se, que a obstrução pode ocorrer por fatores físicos, químicos e biológicos. Medidas como aberturas das linhas para lavagem do sistema, aplicação de ácidos, entre outras práticas, podem contribuir para a redução dos problemas. O controle da qualidade da água oferecida para o sistema, juntamente a avaliação periódica da uniformidade auxiliam na tomada de decisão de que medidas deverão ser adotadas.

Contudo as obstruções por pulso de partículas ainda são pouco estudadas pois, apesar de ocorrerem com relativa frequência em campo, os efeitos dela dependem de outros fatores que condicionarão a severidade da obstrução. A natureza da partícula, o diâmetro da partícula, a posição da linha e o tipo de gotejador são exemplos dos fatores que podem oferecer diferentes respostas a esta situação.

Pesquisas já foram desenvolvidas para compreensão da obstrução por partículas sólidas, mas grande parte estão associadas a concentrações constantes de partículas na água ou ao tempo

de funcionamento do sistema. A posição da linha também pode favorecer a obstrução em virtude da exposição dos gotejadores a partículas por decantação ou sobrenadantes, contudo, poucos trabalhos foram feitos para maior conhecimento deste processo, especialmente a posição voltada para o lado.

O modelo de gotejador, com sua diversidade de diâmetros de abertura da saída e “design” do labirinto podem tornar alguns modelos mais propícios a obstrução que outros, fazendo necessária a comparação para o acompanhamento do desempenho.

Haja vista que poucos trabalhos estudaram o efeito da posição da linha na obstrução dos gotejadores, este trabalho tem como hipótese que a posição da linha voltada para o lado, ainda não estudada, pode reduzir a obstrução de gotejadores.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar se a posição da linha de tubogotejadores pode influenciar na para a redução obstrução de gotejadores quando expostos a pulsos de partículas sólidas de diferentes granulometrias e concentrações.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Irrigação por gotejamento

A irrigação por gotejamento pode ser compreendida como a aplicação de água próxima a zona radicular, em pequenas vazões, mas com elevada frequência, utilizando baixas pressões, com um baixo consumo energético, atingindo marca superior a 90% de eficiência e a manutenção da umidade do solo na capacidade de campo. Tem como vantagens a possibilidade de aplicações de fertilizantes via água de irrigação e a baixas perdas por evaporação (Pizarro, 1996; Bernardo, 2006; Faria, 2012)

A expansão de áreas irrigadas por gotejamento ainda é limitada devido ao elevado custo de aquisição e necessidade de capacitação técnica para a operacionalização do sistema. Isto se dá, principalmente, pela necessidade de um monitoramento da qualidade da água de irrigação, caso contrário, pode ocorrer a redução da vida útil do sistema devido a obstrução dos emissores (Bounoua, 2010; Nakayama e Bucks, 1991).

A uniformidade de distribuição de água é um importante parâmetro a ser monitorado no sistema de irrigação por gotejamento, uma vez que variações de vazão ao longo das linhas laterais podem interferir no fornecimento de água às plantas assim como de nutrientes durante o processo de fertirrigação. A origem dessas variações está associada à temperatura, pressão de operação, fabricação do emissor, variações topográficas, perda de carga e obstrução de emissores (Vekariya et al. , 2011).

O controle da vazão é realizado pelos gotejadores, considerados como os principais componentes deste sistema irrigação. Esses emissores conduzem a água por labirintos de reduzidas dimensões, e são responsáveis por dissipar a pressão disponível na linha lateral e controlar a vazão do gotejador, permitindo que a água seja aplicada ao solo com baixa vazão e modo uniforme. Contudo, o bom desempenho dos gotejadores pode ser comprometido pela qualidade da água utilizada no sistema (Nakayama e Bucks, 1991), fator limitante para irrigação localizada devido às pequenas dimensões dos caminhos de passagem de água no interior dos emissores (Ravina et al., 1992)

O entupimento tornou-se o principal obstáculo para o desenvolvimento da tecnologia de irrigação por gotejamento. Uma vez que um emissor está entupido, sua vazão irá reduzir (Boman, 1995). Enquanto isso, as descargas de emissores não entupidos na mesma linha lateral poderão aumentar (Bralts et al., 1981). Assim, a uniformidade de todo o sistema de irrigação por gotejamento ficará comprometida (Nakayama e Bucks, 1981; Chieng e Ghaemi, 2003).

A obstrução de gotejadores resulta no aumento do custo de manutenção dos sistemas de irrigação localizada (Oron et al., 1991), além de reduzir a vida útil e a eficiência do uso (Zhai et al., 1999). Como resultado, a obstrução do emissor é um dos principais fatores que determinam se os sistemas de irrigação por gotejamento podem ser bem sucedidos (Zhu e Cui, 2005).

2.2. A obstrução de gotejadores

Na microirrigação, o entupimento de gotejadores é um dos principais problemas que afetam gravemente a uniformidade da distribuição de água bem como a durabilidade do sistema de irrigação. A qualidade do material, o fator operacional do sistema e a qualidade da água reduz e eficiência do sistema pressurizado e oneram o projeto com aumento de manutenção. Todos os sistemas hidráulicos apresentam alterações de desempenho no decorrer do tempo de vida útil (Faria, 2012).

A obstrução de emissores pode ocorrer a partir de uma combinação de materiais particulados. Que individualmente ou combinados a outros agentes como o lodo bacteriano, promove o acúmulo de materiais dentro dos emissores e, com a possibilidade de uma cimentação, leva a um tipo de entupimento, mesmo com a utilização de filtros (Gilbert et al., 1981; Adin e Sacks, 1991; Faria, 2012).

Bucks e Nakayama (1979) determinaram os fatores que afetam a qualidade da água para a irrigação, classificando os riscos potenciais conforme a concentração e o tipo de problemas (Tabela 1). Capra & Scicolone (1998) propuseram, para as condições do seu trabalho, uma classificação mais flexível, com limite de 200 mg L⁻¹ para a água ser considerada como de risco mínimo.

Tabela 1. Riscos potenciais de entupimento dos emissores irrigação por gotejamento

Tipo de problema	Risco de entupimento		
	Baixo	Moderado	Alto
Físico			
Sólidos Suspensos (mg L ⁻¹)	<50	50 - 100	>100
Químico			
pH	<7,0	7,0 – 8,0	> 8,0
Sólidos dissolvidos (ppm)	<500	500 – 2000	> 2000
Mn (ppm)	<0,1	0,1 – 1,5	>1,5
Fe (ppm)	<0,1	0,1 – 1,5	> 1,5
H ₂ S (ppm)	<0,5	0,1 – 2,0	> 2,0
Biológico			
População bacteriana (n°/cm ³)	<10000	10000 - 50000	>50000

Fonte: Bucks e Nakayama (1979)

O entupimento biológico é causado pela matéria orgânica transportada nas águas, incluindo o desenvolvimento de algas, bactérias ou fungos. O crescimento das algas requer luz, o que significa que eles geralmente se desenvolvem na saída do gotejamento.

Para a irrigação localizada, seria ideal que água sofresse um tratamento de remoção das partículas suspensas, reduzindo sua turbidez, odor, a proliferação de bactérias patogênicas, todavia, realiza-se para fins práticos um tratamento da água local a níveis toleráveis para a execução da irrigação (Nakayama et al, 2007).

Dentre as causas mais comuns de obstrução de sistemas de irrigação localizada estão: a precipitação de sais, o crescimento microbiológico, a presença de insetos nos gotejadores e sedimentos nos labirintos dos emissores (Gilbert e Ford, 1986).

Associado a esses problemas, tem-se também o diâmetro do orifício de passagem de água dos emissores. Observa-se na Tabela 2 a classificação dos emissores quanto à sensibilidade à obstruções, de acordo com o diâmetro mínimo de passagem de água (Pizarro, 1996).

Tabela 2. Classificação de emissores quanto a sensibilidade ao entupimento

Diâmetro mínimo (mm)	Sensibilidade à obstrução
$\leq 0,7$	alta
0,7 a 1,5	média
$\geq 1,5$	baixa

Fonte: Pizarro (1996)

Bounoua et al (2016) ao estudar as condições reais de obstrução de uma série de gotejadores instalados em uma parcela agrícola no sul da França abastecida com água do rio Durance, verificou que os sedimentos presentes na água obstruíam gradualmente gotejadores e filtros. A análise da água revelou que o entupimento físico-químico prevalecia sobre o entupimento biológico.

Essa caracterização ajudou na configuração do protocolo de experiência em laboratório. De fato, além da observação em campo do entupimento, análises laboratoriais tanto da água de irrigação como do material de obstrução revelaram a presença de argila reativa e inerte: esmectita e uma mistura de ilita-calcita.

Observou-se uma tendência surpreendente. A concentração de sal na água associada com esmectita diminui o entupimento, enquanto aumentava o tamanho do aglomerado. As simulações dinâmicas de fluidos computacionais foram realizadas para investigar o impacto das partículas sobre o comportamento do fluxo. Os resultados demonstraram que as partículas de argila que interagem com o fluxo governam uma estrutura complexa dos campos de velocidade do fluido dentro do canal do labirinto gotejante.

2.3. Obstrução por fatores físicos

A obstrução por fatores físicos ocorre muitas vezes devido a partículas minerais suspensas, como argila e silte. Essas partículas geralmente são pequenas demais para serem retidos pelo filtro, mas podem obstruir os emissores devido à agregação a jusante do sistema de filtração. Esta aglomeração favorece o processo de depósito e resulta em obstrução (Pitts et al., 2003).

Além disso, os diferentes impactos que as partículas podem ter no fluxo dependem de vários fatores, como exemplo: a característica das partículas, a geometria da tubulação, a hidrodinâmica e as propriedades de turbulência. A adição de partículas pode resultar em diferentes fenômenos dependendo de suas características (Bounoua et al. 2016).

A intensidade da turbulência do fluido é reduzida por partículas pequenas enquanto aumenta para partículas grandes (Kulick et al., 1994). Vreman (2007) observou também que as intensidades de turbulência diminuem quando o índice de carga em massa aumenta. Yuan e Michaenidies (1992) estudam modificações de intensidade de turbulência devido a partículas no fluxo de tubulação. Eles concluíram que a redução da turbulência é causada pela dissipação de energia devido à aceleração das partículas, enquanto o aumento da turbulência é o resultado de um distúrbio do fluxo devido ao movimento das partículas.

Quanto a obstrução física, Gilbert et al (1981) relatam em seus trabalhos realizados para investigação de problemas em sistemas de irrigação por gotejamento nos pomares de citros do Arizona, que a redução da vazão devido a fatores físicos como: grãos de areia, partículas de plástico, sedimentos, partes do corpo de insetos e animais, septos deformados; contribuíram com cerca de 55% do total de obstrução observado durante o estudo. Eles tabularam as causas dominantes de entupimento com sua porcentagem relativa de ocorrência em irrigação por gotejamento, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Causas dominantes de entupimento com a sua porcentagem relativa de ocorrência em irrigação por gotejamento

Causas de entupimento	Porcentagem de ocorrência	
	Individual	Total
Fatores físicos		
Grãos de areia	17	
Partículas de plástico	26	
Sedimentos	02	
Partes do corpo de insetos e animais	03	
Septo deformado	07	55
Fatores biológicos		
Película microbiana	11	
Raízes de plantas e algas	03	14
Fatores químicos		
Precipitado de carbonato	02	
Precipitado de magnésio e ferro	00	02
Fator combinado		
Físico / biológico	08	
Físico / químico	02	
Químico / biológico	06	
Físico / Químico / biológico	02	18
Não detectável (provavelmente físico)		11

Fonte: Gilbert et al (1981)

Segundo Faria (2012), a areia é comumente utilizada para ensaios de obstrução de gotejadores, pela estabilidade física e química que o dióxido de silício apresenta. Ao utilizar partículas de outros materiais pode ocorrer floculação e cimentação entre materiais e consequentemente a expansão de seus volumes com a hidratação, tornando-se particulados de diâmetro superior ao inicial.

Perboni (2016) ao avaliar a influência do tamanho e concentração de partículas de areia e da velocidade de escoamento da água nas linhas laterais na obstrução de um modelo de gotejador do tipo cilíndrico, verificou que em ensaios com faixa granulométrica de 105 a 250 μm , ocorreu a obstrução nas concentrações de 250 e 500 mg L^{-1} , para velocidades de escoamento da água no início das linhas laterais 0,25 m s^{-1} e 0,94 m s^{-1} . Já na faixa granulométrica de 250 a 500 μm , ocorreu obstrução nas concentrações de 100, 250 e 500 mg L^{-1} , para as mesmas velocidades citadas. Constatou-se também que a desobstrução também não ocorria com o avanço do ensaio.

Lavanholi (2016), ao buscar contribuir para a validação de procedimentos de ensaios de obstrução, avaliou quatro modelos de gotejadores submetidos a quatro faixas granulométricas de

frações do solo (< 75 , $75-125$, $125-212$, $212-500 \mu\text{m}$) livre de matéria orgânica, e a quarto concentrações (125 , 250 , 375 e 500 mg L^{-1}). Constatou-se que embora a obstrução tenha ocorrido em uma mesma fase, a variabilidade dos resultados foi elevada, indicado que fatores não controlados podem exercer influência significativa nos processos de obstrução durante os experimentos.

2.4. Velocidade limite de depósito

A velocidade limite de depósito é muitas vezes definida como a velocidade abaixo da qual as primeiras partículas começam a formar e um leito na parte inferior do tubo (Miedema, 2013)

A distribuição vertical de concentração de sedimentos vai tornando-se uniforme com o aumento da velocidade média de escoamento. A uniformidade de escoamento de misturas sólido-líquidas depende do diâmetro das partículas e da velocidade de escoamento do fluxo na tubulação. Os diagramas de regime de Newitt et al. (1995) (Figura 1), dão uma boa impressão dos diferentes regimes e as transições entre os diferentes regimes:

- Para partículas muito pequenas, haverá uma transição de um leito estacionário para fluxo homogêneo diretamente.
- Para partículas pequenas, haverá uma transição de um leito estacionário para o fluxo heterogêneo para o fluxo homogêneo. Para partículas de tamanho médio, haverá uma transição de um leito estacionário para um leito por saltitação, para o fluxo heterogêneo para o fluxo homogêneo.
- Para partículas muito grandes, haverá uma transição de um leito estacionário para um leito turbulento para um fluxo homogêneo diretamente.

No início do escoamento, as partículas do leito são submetidas a forças hidrodinâmicas. Um acréscimo na velocidade acarretará num aumento dessa força hidrodinâmica capaz de movimentar as partículas sólidas do plano estacionário. O início do movimento dos grãos sólidos é denominado condição crítica de escoamento. As misturas sólido-líquidas transportadas por um conduto são classificadas em misturas sedimentáveis e misturas não sedimentáveis.

As velocidades de sedimentação das partículas sólidas das misturas sedimentáveis são maiores que $0,060$ a $0,15 \text{ cm s}^{-1}$ e das misturas não sedimentáveis menores que $0,060$ a $0,15 \text{ cm s}^{-1}$.

Existe uma velocidade denominada velocidade crítica de sedimentação que para maiores valores de velocidade todas as partículas do leito estacionário estarão em suspensão. Para menores valores de velocidade, haverá troca de partículas entre leito e fluxo.

Fonte: (Miedema, 2013), Legenda: D_T – Diâmetro do tubo.

Figura 1. Diagrama de regimes de Newitt et al. (1955)

2.5. Pulso de sujidade

Niu et al (2013), Bounoua (2010) e Nakayama et al (1991) relatam que mesmo após um rigoroso processo de filtragem, muitas vezes são encontradas quantidades significativas de sedimentos nas linhas laterais devido a ocorrência de fenômenos de floculação e agregação de partículas finas, como também, pela precipitação de íons no interior da tubulação e dos gotejadores.

É comum que durante a montagem ou até mesmo a manutenção, ocorram erros por parte dos usuários que possibilitem que partículas de solo adentrem às tubulações. Quando também há rupturas em qualquer ponto de malha hidráulica, ao realizar-se o reparo e após o desligamento do sistema, pode ocorrer um processo de refluxo de água com consequente formação de vácuo, o que pode resultar na de entrada de partículas do solo, após o sistema de

filtragem. (Coelho et al, 2007). Ao ser acionado, essas partículas percorrem o sistema em forma de pulsos.

Coelho et al. (2007) ao avaliar a sensibilidade de cinco modelos de gotejadores ao entupimento de causa física, através da simulação de pulso de sujeira com solo, em função do tempo de operação, da posição de instalação do gotejador na linha terciária e da textura do solo, observaram que o fator posição de instalação do emissor é preponderante em relação aos fatores de textura do solo e tempo de operação. A susceptibilidade da obstrução em função da posição da linha também foi relatada por Faria (2012).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local do experimento

O experimento foi realizado no Instituto Nacional Ciência e Tecnologia em Engenharia de Irrigação, INCT-EI, vinculado ao Laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia de Biosistemas, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- (ESALQ/USP), em Piracicaba, SP.

3.2. Gotejadores

Foram avaliados dois modelos de tubogotejadores com emissores convencionais (não compensantes), integrados, de formato plano (tipo pastilha). Ambos emissores testados foram da marca Drip-Tech, fabricado pela empresa DripPlan, cujas estruturas e dimensões do labirinto são semelhantes, sendo a variação de vazão de cada modelo regulada pela profundidade do canal (Figura 2). Os modelos avaliados foram de vazões de $1,6 \text{ L h}^{-1}$ e $2,3 \text{ L h}^{-1}$. Ambos com espaçamento entre gotejadores de 0,5 m.

Figura 2. Esquema de gotejador Drip-Tech utilizado no experimento

3.3. Bancada de ensaios

Os ensaios foram realizados em uma bancada de estrutura em calhas metálicas. Foi adotado o *mainfold* do tipo bifurcações, com o intuito de obter uma boa distribuição hidráulica de velocidades de fluxo, de modo a evitar fluxo preferencial de algum material sólido em suspensão. (Figura 3)

Figura 3. Estrutura de um manifold do tipo bifurcações

A bancada de comprimento de 10 metros, apresenta um reservatório de polietileno de 250L acoplado a um conjunto motobomba de altura manométrica máxima de 46 mca e vazão máxima de $15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Nos finais de linha foram inseridos bocais de emissores fixos (pivô central) para regular a velocidade de forma padrão, mantendo todas as linhas com velocidade a jusante de

1m.s^{-1} . A pressão de serviço adotada para a realização do experimento foi de 10 mca, monitorada no início da linha por um manômetro digital, conforme representado nas figuras 4 e 5.

Figura 4. Esquema da bancada de ensaios de obstrução

Figura 5. A) Entrada das linhas; B) Saída das linhas; C) Disposição das linhas na bancada; D) Tomada de pressão no início da linha

3.4. Tratamentos de pulso de partículas

A composição dos tratamentos (causas de variação) foi dada pela associação de quatro fatores:

Fator 1 - Posição da linha: caracteriza-se pela posição de montagem do gotejador no interior da linha lateral, pode ser para cima, para baixo e para o lado. (Figura 6). A posição lateral

não tem similar na literatura até o presente momento.

Figura 6. Representação da posição de inserção dos gotejadores

Fator 2 - Diâmetro médio das Partículas ou Granulometria do quartzo: compreende o uso de três faixas granulométricas de partículas de quartzo: 0,05-0,1mm; 0,1-0,25mm e 0,25-0,5mm

Fator 3 – Concentração: Aplicação direta e sem filtragem de três concentrações de pulso de sujidade (5g, 10g e 20g), visando simular a contaminação do sistema na hora da montagem das tubulações no campo

Nas análises iniciais também são utilizados tratamentos de água limpa (sem aplicação de pulso de partículas).

Para auxiliar a discussão dos resultados os tratamentos os fatores receberam uma nomenclatura específica conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Nomenclatura adotada para representação dos fatores.

Posição da linha		Granulometria		Concentração	
Fator	Nomenclatura	Fator	Nomenclatura	Fator	Nomenclatura
Para baixo	PB	0,05 - 0,1mm	G1	5g	C1
Para cima	PC	0,1 - 0,25 mm	G2	10g	C2
Para o lado	PL	0,25 - 0,5 mm	G3	20g	C3

Fator 4 – Posição do gotejador na linha: Utilizado somente para a análise estatística 2, este fator possibilita verificar o efeito do tratamento para cada uma das sete posições de gotejadores em uma mesma linha.

A combinação dos fatores resulta em tratamentos específicos, sendo cada um representado um número conforme demonstrado na tabela 5.

Tabela 5. Classificação adotada para representação dos tratamentos.

Tratamento	Número	Tratamento	Número	Tratamento	Número
PB/Água limpa	1	PC/Água limpa	11	PL/Água limpa	21
PB/G1/C1	2	PC/G1/C1	12	PL/G1/C1	22
PB/G1/C2	3	PC/G1/C2	13	PL/G1/C2	23
PB/G1/C3	4	PC/G1/C3	14	PL/G1/C3	24
PB/G2/C1	5	PC/G2/C1	15	PL/G2/C1	25
PB/G2/C2	6	PC/G2/C2	16	PL/G2/C2	26
PB/G2/C3	7	PC/G2/C3	17	PL/G2/C3	27
PB/G2/C1	8	PC/G2/C1	18	PL/G2/C1	28
PB/G2/C2	9	PC/G2/C2	19	PL/G2/C2	29
PB/G2/C3	10	PC/G2/C3	20	PL/G2/C3	30

3.5. Procedimento de ensaio

Para a imposição adequada dos tratamentos foi adotado um procedimento padrão de introdução de partículas nos tubogotejadores a fim de reduzir possíveis influências nos tratamentos dos pulsos.

Inicialmente, as partículas eram separadas por peneiras, com intuito de obter as faixas granulométricas específicas. Em seguida, pesava-se em um uma balança de precisão a quantidade exata de areia determinada para cada concentração (Figura 7).

Figura 7. A) Agitador mecânico; B) Frações de areia separadas por faixas granulométricas

Antes da aplicação dos tratamentos de pulsos de partículas, a linha de tubo gotejador era inicialmente pressurizada por 5 minutos para verificar alguma obstrução de gotejador oriunda de defeito de fabricação, o que poderia mascarar algum resultado.

Encerrada a pressurização das linhas, aplicavam-se os tratamentos de pulso de partículas. Desacoplando-se a linha do bocal, realizava-se uma pequena dobra a 20 cm do início da linha. Com o auxílio de um funil eram introduzidas as partículas na linha, de modo que no ponto da dobra mencionado elas se concentrassem e assim o pulso em todas as linhas partiriam do mesmo ponto e percorreriam a mesma distância do trajeto.

Acopladas as linhas novamente aos conectores iniciais e aos bocais finais, acionava-se o sistema e durante 20 minutos e coletava-se a vazão dos 7 primeiros emissores de cada linha. Os coletores eram recipientes em alumínio de peso conhecido. Ao término do tempo de coleta, cada recipiente era pesado em balança de precisão e registrava-se pelo método gravimétrico o peso da água coletado. No retorno da água para a caixa, ao final de cada linha a sujeira foi filtrada da água para garantir preservação dos efeitos dos tratamentos e que não houvesse interferência na água do reservatório.

Os tubogotejadores eram substituídos ao final de cada ensaio, em que também era realizada a limpeza da peneira, localizada no tubo de convergência dos finais de linha na bancada, e dos filtros, como garantia das condições adequadas para o ensaio seguinte (Figura 4B).

3.6. Análise estatística

Foi adotado o delineamento de blocos não casualizados para a realização deste experimento. Cada tratamento era constituído de 4 blocos, sendo que cada bloco compreendia uma linha de tubogotejador. Em cada linha eram avaliados 7 gotejadores, o que compreendia para cada bloco, 28 pontos de coleta de vazão. Constituído de 8 saídas, o *mainfold* possibilitava a execução 2 tratamentos simultaneamente.

Para compreender melhor o processo de obstrução, buscou-se por meio da análise estatística estudar o efeito dos tratamentos de pulso de partículas em diferentes condições. Foram feitos três tipos de análises estatísticas nos quais tornou-se possível compreender qual tratamento torna mais susceptível a obstrução, como também, em que ponto da linha ele ocorre.

Inicialmente, os dados de vazão foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e de Bartlett para verificação da normalidade e homocedasticidade residuais, respectivamente. Nos casos em que a variável analisada adequou-se à Distribuição Normal, utilizou-se o teste F para verificação de diferenças entre tratamentos e teste de Tukey para comparação de médias.

Todos os resultados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, por meio do software SAS (SAS/STAT Software, SAS Institute, Cary, NC) sendo as médias de vazão foram submetidas ao teste de Tuckey a 5% e 10% de probabilidade.

3.6.1. Análise Estatística 1 - Tratamentos para cada gotejador

Para cada uma das sete posições de gotejadores na linha, foi feita uma análise de comparação simultânea de todos os tratamentos de pulso de partículas e os tratamentos de água limpa. Utilizou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade (Tabela 6).

Tabela 6. Quadro de análise da variância dos tratamentos para cada gotejador

Fontes de variação	Graus de liberdade
Tratamentos	29
Blocos	3
Resíduo	87
Total	119

3.6.2. Análise Estatística 2 - Interação dos tratamentos e a posição dos gotejadores

Nesta segunda análise, utilizou-se como variáveis a posição do gotejador na linha e os tratamentos (pulso de partículas e água limpa). Pôde-se, a partir disto, identificar que gotejadores são mais susceptíveis a obstrução e que tratamentos são mais severos. Utilizou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade (Tabela 7).

Tabela 7. Quadro de análise da variância dos tratamentos (Interação tratamentos x posição dos gotejadores)

Fontes de variação	Graus de liberdade
Tratamentos	29
Posição do gotejador	6
Tratamentos	209
Blocos	3
Resíduo	627
Total	839

3.6.3. Análise Estatística 3 –Fatorial

Para ambos modelos de gotejadores testados, verificou-se que os tratamentos de baixa granulometria e baixa concentração de partículas tiveram a mesma resposta aos de água limpa. Para fins de simplificação da análise, eliminou-se os tratamentos de água limpa e admitiu-se a comparação somente entre os tratamentos com pulso. Não se recomenda para esta análise a incorporação do fator “posição do gotejador”, pelo fato do princípio da independência dos tratamentos ser comprometida com o avanço do pulso se partículas na linha. Uma vez obstruído o primeiro gotejador, parte das partículas ficam ali depositadas, dessa forma, o gotejador seguinte não estará sujeito a mesma condição inicial. Por este motivo a análise fatorial foi feita para cada posição de gotejador. Utilizou-se o teste de Tukey a 10% de probabilidade (Tabela 8).

Tabela 8. Quadro de análise de variância dos tratamentos

Fontes de variação	Graus de liberdade
Posição da linha (F1)	2
Granulometria (F2)	2
Concentração (F3)	2
F1 x F2	4
F1 x F3	4
F2 x F3	4
F1 x F2 x F3	8
Tratamentos	26
Blocos	3
Resíduo	78
Total	107

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise do gotejador modelo 1

4.1.1 Análise Estatística 1 - Tratamentos para cada gotejador (Modelo1)

Foi observado diferença significativa entre os tratamentos. Dentre as posições de gotejadores o coeficiente de variação mais elevado foi observado no gotejador 1 dada a susceptibilidade deste a obstrução e o menor coeficiente de variação no gotejador 4 (Tabela 9).

Tabela 9. Análise da variância dos tratamentos para o gotejador modelo 1

Fatores	G.L.	Quadrado médio						
		Got.1	Got.2	Got.3	Got.4	Got.5	Got.6	Got.7
Tratamentos	29	0,53**	5,48**	0,201**	0,23**	0,603**	0,03 ^{ns}	0,043**
Blocos	3	0,077 ^{ns}	0,91 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,018 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,042 ^{ns}
Resíduo	87							
Vazão média (L h ⁻¹)		1,02	1,15	1,19	1,25	1,22	1,22	1,20
C.V. (%)		33,41	21,85	19,36	3,65	9,39	12,63	14,14

^{ns} - não significativo, ** - significativo a 5% de probabilidade

A análise estatística do gotejador 1 demonstrou que os tratamentos de água limpa apresentaram resposta semelhante aos que tinham baixa concentração de partículas e menor granulometria. Foi observado diferença significativa nos tratamentos 10 (PB/G3/C3) e 30(PL/G3/C3) com vazões de 0,02 e 0,12 L h⁻¹, respectivamente (Figura 8).

No gotejador 2, os tratamentos apresentaram respostas estatisticamente semelhantes. Tal resultado pode ser atribuído ao alto coeficiente de variação obtido para este gotejador, uma vez que assim como gotejador 1, também está susceptível a obstrução. O tratamento 7 apresentou diferença significativa dos demais, com vazão de 0,4 L h⁻¹.

O gotejador 3, apresentou diferença significativa dos tratamentos 10 (PB/G3/C3) e 20 (PC/G3/C3), com vazões de 0,65 e 0,31 L h⁻¹, respectivamente. Ambos tratamentos se caracterizavam pela alta concentração e granulometria das partículas presentes no pulso.

No gotejador 5, pode-se observar que as maiores vazões foram obtidas nos tratamentos com a posição da linha voltada para cima. Houve diferença significativa no tratamento 7 (PB/G2/C3), com vazão de 0,96 L h⁻¹. Não houve diferença significativa dos tratamentos para o gotejador 6 (Figura 9).

Para o gotejador 7, observou-se resposta semelhante para a maioria dos tratamentos. Com diferença significativa de redução de vazão para o tratamento 9 (PB/G3/C2), com vazão de 0,83 L h⁻¹. O melhor desempenho foi observado para o tratamento 21 (água limpa), com vazão de 1,36 L h⁻¹(Figura 10).

Nesta análise inicial, constatou-se que os tratamentos de menor concentração e granulometria apresentaram respostas estatisticamente iguais aos tratamentos de água limpa. Para fins de simplificação da

análise e interpretação dos resultados, eliminou-se dos testes seguintes os tratamentos de água limpa, comparando-se somente os tratamentos com pulso de partículas.

Figura 8. Análise conjunta dos tratamentos para os gotejadores 1, 2 e 3 do modelo 1. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador

Figura 9. Análise conjunta dos tratamentos para os gotejadores 4, 5 e 6 do modelo 1. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador

Figura 10. Análise conjunta dos tratamentos para o gotejador 7 do modelo 1. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

4.1.2 Análise Estatística 2 - Interação dos tratamentos e a posição dos gotejadores (Modelo 1)

Não houve diferença significativa entre as posições dos gotejadores para os tratamentos de água limpa, G1/C1, G1/C2, G1/C3 e G3/C1. Os tratamentos G2/C1 e G2/C2, de vazões médias de 0,64 e 0,69 L h⁻¹, apresentaram diferença significativa no primeiro gotejador com posição para baixo, provavelmente como efeito da decantação das partículas e posterior arraste no estabelecimento do fluxo de água na linha (Figura 11).

O tratamento G2/C3 apresentou diferença significativa no segundo gotejador com posição para baixo e o primeiro gotejador com posição para cima, com vazões médias de 0,4 e 0,66 L h⁻¹; respectivamente; o que evidencia problemas de obstrução por efeito de decantação e partículas sobrenadantes.

O tratamento G3/C2 apresentou diferença significativa no primeiro, segundo, terceiro, sexto e sétimo gotejadores na posição para baixo, registrando valores de vazão média iguais a 0,57; 0,79; 0,93; 0,94 e 0,83 L h⁻¹, respectivamente. A concentração e o diâmetro da partícula

podem submeter o arraste de partículas decantadas por mais tempo, tornando susceptível a obstrução em grande parte da linha.

O tratamento G3/C3 apresentou obstrução para o primeiro gotejador em todas as posições de linhas com médias de $0,04 \text{ L h}^{-1}$ (para baixo); $0,65 \text{ L h}^{-1}$ (para cima) e $0,12 \text{ L h}^{-1}$ (para o lado). No segundo gotejador também foram observadas reduções de vazão, com médias $0,85 \text{ L h}^{-1}$ (para baixo) e $0,91 \text{ L h}^{-1}$ (para cima). No terceiro gotejador as médias de vazão reduziram para $0,64 \text{ L h}^{-1}$ e $0,315 \text{ L h}^{-1}$ (para cima).

Nos gotejadores 6 e 7 da posição para baixo houve um decréscimo, com registro de vazões médias de $0,91$ e $0,90 \text{ L h}^{-1}$, respectivamente.

Agrupados os tratamentos por posição da linha, pôde-se observar que a posição da linha para baixo é mais vulnerável à obstrução seguido da posição para cima e para o lado.

Figura 11. Análise da interação dos tratamentos com a posição do gotejador na linha para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam médias dos tratamentos para cada posição do gotejador.

4.1.3 Análise Estatística 3 – Fatorial (Modelo 1)

O quadro de análise da variância revelou que o efeito dos blocos foi significativo aos gotejadores 2 e 4. O fator “posição da linha” apresentou diferença significativa para os gotejadores 2, 3 e 4; não sendo significativo para as demais posições de gotejadores (Tabela 10).

Tabela 10. Quadro de análise da variância dos tratamentos para o modelo 1

Fatores	G.L.	Quadrado médio						
		Got.1	Got.2	Got.3	Got.4	Got.5	Got.6	Got.7
Bloco	3	0,103 ^{ns}	0,334*	0,063 ^{ns}	0,006*	0,021 ^{ns}	0,070*	0,043 ^{ns}
Posição da linha (F ₁)	2	0,065 ^{ns}	0,201*	0,146*	0,006*	0,003 ^{ns}	0,038 ^{ns}	0,053 ^{ns}
Granulometria (F ₂)	2	2,228*	0,598*	0,793*	0,025*	0,049*	0,168*	0,129*
Concentração (F ₃)	2	0,555*	0,186*	0,204*	0,010*	0,003 ^{ns}	0,003 ^{ns}	0,029 ^{ns}
F ₁ x F ₂	4	0,236*	0,106*	0,197*	0,002*	0,038*	0,050*	0,085 ^{ns}
F ₁ x F ₃	4	0,221 ^{ns}	0,232*	0,075 ^{ns}	0,006*	0,017 ^{ns}	0,030 ^{ns}	0,032 ^{ns}
F ₂ x F ₃	4	0,856*	0,116*	0,318*	0,012*	0,014 ^{ns}	0,01*	0,019*
F ₁ x F ₂ x F ₃	8	0,384*	0,153*	0,116*	0,005*	0,019 ^{ns}	0,009 ^{ns}	0,018 ^{ns}
Resíduo	78							
Vazão média (L.h ⁻¹)		0,99	1,13	1,17	1,25	1,22	1,2	1,19
C.V. (%)		36,43	23,30	20,67	3,05	9,8	13,34	15,01

ns - não significativo; * - significativo a 10% de probabilidade; Got. - Gotejador

O fator granulometria foi o fator que apresentou diferença significativa para a todas as posições de gotejadores. Niu et al. (2013), concluíram que a concentração de sedimentos e os tamanhos de partículas são fatores primários que afetam a obstrução do emissor.

O fator concentração apresentou diferença significativa para os gotejadores 1,2,3 e 4. Na análise das interações, pôde-se observar que na interação “posição da linha x granulometria”, a diferença significativa dos tratamentos foi expressa nos gotejadores 3, 5 e 7.

Na interação “posição da linha x concentração”, observou-se diferença significativa dos tratamentos nos gotejadores 1,2,3,4 e 6. Enquanto que na interação “concentração x granulometria” o efeito significativo dos tratamentos foi observado em todos os gotejadores exceto o 5.

Na interação tripla “posição da linha x concentração x granulometria” os gotejadores de 1 a 4 apresentaram diferença significativa dos tratamentos.

Verificou-se que as vazões médias mais baixas se encontram nos primeiros gotejadores, como também os maiores coeficientes de variação. Isto pode ser justificado pela maior susceptibilidade destes gotejadores aos efeitos da obstrução pelo pulso de partículas sólidas.

4.1.3.1 Interação Posição da linha x Granulometria

Nesta interação os gotejadores 5, 6 e 7 não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos.

Na interação “posição para baixo” com as diferentes faixas granulométricas, verificou-se que não houve diferenças significativas para todas as posições de gotejadores a exceção do gotejador 2 que sofreu redução da vazão média na faixa granulométrica de 0,25-0,5mm; com vazão média de 0,831 L h⁻¹. (Figura 12)

Figura 12. Análise da interação Posição da linha para baixo x Granulometria para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

Na interação “posição para cima” com as diferentes faixas granulométricas, foi observada diferença significativa dos tratamentos no gotejador 3 com redução de vazão na faixa de 0,25 - 0,5mm; com vazão média de 0,96 L h⁻¹. Enquanto o gotejador 4 sofreu redução de vazão nas faixas granulométricas de 0,05-0,1mm e 0,1-0,25mm com valores médios de 1,23 e 1,22 L h⁻¹(Figura 12).

Figura 13. Análise da interação Posição da linha para cima x Granulometria para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

O gotejador 1 apresentou diferença significativa dos tratamentos na interação da posição “para o lado” com as diferentes faixas granulométricas. A redução de vazão foi observada na faixa de 0,25-0,5 mm com registro de 0,76 L h⁻¹. Enquanto o gotejador 4 sofreu decréscimos na faixa granulométrica de 0,1 - 0,25 mm, com registro de 1,22L h⁻¹(Figura 14).

Figura 14. Análise da interação Posição da linha para o lado x Granulometria para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

4.1.3.2 Interação Posição da linha x Concentração

Não houve diferença significativa dos tratamentos para todas as posições de gotejadores na interação das posições de linha com a concentração de 5g (Figura 15).

Figura 15. Análise da interação Posição da linha x Concentração de 5g para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

Na interação das posições de linha a concentração de 10g, pôde-se observar que não houve diferença significativa dos tratamentos para os gotejadores 2, 3, 5, 6 e 7. Para o gotejador 1, houve registro de redução da vazão média para a posição voltada para baixo com valor de 0,85 L h⁻¹. O gotejador 4 sofreu redução de vazão para as posições “para cima” e “para o lado”, com médias de 1,23 e 1,22L h⁻¹, respectivamente (Figura 16).

Figura 16. Análise da interação Posição da linha x Concentração de 10g para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

Não foi observada diferença significativa da interação para os gotejadores 1, 4, 5 e 7. Os gotejadores 2 e 6 foram sensíveis a obstrução na posição da linha “para baixo”, com médias de vazão de 0,83 e 1,12 L h⁻¹, respectivamente. O gotejador 3 apresentou redução de vazão na posição “para cima”, com média de 0,96 L h⁻¹ (Figura 17).

Figura 17. Análise da interação Posição da linha x Concentração de 20g para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

4.1.3.3 Interação Concentração x Granulometria

Não foi encontrado diferença significativa na interação das diferentes faixas granulométricas a concentração de 5g para os gotejadores 1, 2, 3, 5, 6 e 7. O gotejador 4 foi sensível a obstrução nas faixas granulométricas de 0,1-0,25 mm e 0,25-0,5 mm; com vazões médias de 1,12 e 1,23 L.h⁻¹, respectivamente (Figura 18).

Figura 18. Análise da interação Granulometria x Concentração de 5g para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

Diferentemente das demais posições de gotejadores, o gotejador 4 foi o único que não apresentou diferença significativa na interação das diferentes faixas granulométricas a concentração de 10g. Os gotejadores 1, 2, 3, 5, 6 e 7 foram sensíveis a obstrução na faixa granulométrica de 0,25-0,5 mm; com registros de vazões médias de 0,85, 1,05, 1,03, 1,19, 1,09 e 1,06 L h⁻¹; respectivamente (Figura 19).

Figura 19. Análise da interação Granulometria x Concentração de 10g para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

Na interação da concentração de 20g as diferentes faixas granulométricas, pôde-se observar que os gotejadores 4,5 e 7 não apresentaram diferença significativa para esta interação. Os gotejadores 1, 3 e 6 apresentaram baixo desempenho na faixa granulométrica de 0,25 - 0,5mm; com vazões médias de 0,27, 0,74 e 1,12 Lh⁻¹; respectivamente. O gotejador 3 foi sensível a obstrução nas faixas granulométricas de 0,1-0,25 mm e 0,25-0,5 mm; com vazões médias de 0,98 e 0,89 L h⁻¹; respectivamente (Figura 20).

Figura 20. Análise da interação Granulometria x Concentração de 20g para o modelo 1. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

4.1.3.4 Fatores isolados

4.1.3.4.1 Posição da linha

A posição da linha não apresentou diferença significativa para os gotejadores 5,6 e 7. Contudo a diferença significativa ($p < 0,1$) foi observado para os gotejadores 2,3 e 4. O gotejador dois sofreu efeito negativo para a posição “para baixo” com vazão média de $1,06 \text{ Lh}^{-1}$. O gotejador 3 apresentou redução da vazão na posição “para cima” com vazão média de $1,12 \text{ L h}^{-1}$. Enquanto que o gotejador 4 apresentou diferença significativa nas posições “para cima” e “para o lado”, com vazões médias $1,25$ e $1,24 \text{ Lh}^{-1}$, respectivamente (Figura 21).

Figura 21. Análise do efeito da posição da linha para diferentes posições de gotejador do modelo 1. Letras maiúsculas comparam médias dos tratamentos para cada posição do gotejador.

4.1.3.4.2 Granulometria

A faixa granulométrica das partículas foi um fator determinante para a obstrução dos gotejadores. Ocorre uma progressão da obstrução, conforme o aumento do diâmetro da partícula presente no pulso. O gotejador 1 sofreu decréscimos consecutivos de redução de vazão com o aumento da partícula, foram registradas vazões médias de 0,98 e 0,74 Lh⁻¹, para faixas granulométricas de 0,1 – 0,25 mm e 0,25 – 0,5 mm; respectivamente. Nessa mesma perspectiva, o gotejador 2 apresentou reduções de vazão, com vazões médias de 1,12 L h⁻¹ para faixa de 0,1 – 0,25 mm e 1,01Lh⁻¹ para faixa- de 0,25-0,5 mm (Figura 22).

Figura 22. Análise do efeito da granulometria para diferentes posições de gotejador do moledo 1. Letras maiúsculas comparam médias dos tratamentos para cada posição do gotejador.

Qingsong et al. (2008) verificaram em seus ensaios de simulação de modelos de obstrução de gotejadores, que os emissores tendem a ser obstruídos com o aumento do tamanho de partículas e a concentração de suspensão de sólidos.

4.1.3.4.3 Concentração

O fator concentração apresentou diferença significativa para os gotejadores 1, 2, 3 e 4. Os gotejadores 1, 2 e 3 sofreram redução de vazões para a concentração de 20g, com médias de 0,84; 1,05 e 1,09 L h⁻¹; respectivamente. O gotejador 4 apresentou reduções de vazão para as concentrações de 5g e 10g, com médias de 1,25 e 1,24 L h⁻¹, respectivamente (Figura 23).

Observa-se que o efeito negativo do aumento da concentração de partículas se manifesta, principalmente, nos gotejadores iniciais, uma vez que não foram observadas diferença significativa dos tratamentos de concentração para os gotejadores 5, 6 e 7.

Figura 23. Análise do efeito da concentração para diferentes posições de gotejador do moledo 1. Letras maiúsculas comparam médias dos tratamentos para cada posição do gotejador.

4.2 Análise do gotejador modelo 2

4.2.1 Análise Estatística 1 - Tratamentos para cada gotejador (Modelo 2)

Foi observado diferença significativa dos tratamentos para todos os gotejadores exceto para o número 4 (Tabela 11).

Tabela 11. Análise da variância dos tratamentos para o gotejador modelo 2

Fatores	G.L.	Quadrado médio						
		Got.1	Got.2	Got.3	Got.4	Got.5	Got.6	Got.7
Tratamentos	29	0,72**	6,65**	0,06**	0,15 ^{ns}	0,09**	0,03**	0,04**
Blocos	3	0,19	0,27	0,30	0,23	0,11	0,0008	0,02
Resíduo	87							
Vazão média (L.h ⁻¹)		2,02	2,09	2,12	2,09	2,12	2,13	2,12
C.V. (%)		18,46	15,62	9,11	15,59	11,52	2,04	7,32

ns - não significativo, ** - significativo a 5% de probabilidade

No gotejador 1 foi observado diferença significativa entre os tratamentos. Verificou-se redução da vazão nos tratamentos 8,9 e 10; com médias de 0,63; 1,5 e 0,62 L h⁻¹; respectivamente. Tais tratamentos são caracterizados pela elevada granulometria das partículas utilizadas no pulso, que aliados a posição da linha para baixo podem facilitar obstrução dada decantação das partículas em uma fase inicial da pressurização da linha. Verificou-se também que o tratamento 19 apresentou uma redução da vazão, com média de 1,61L h⁻¹; podendo haver influência de partículas sobrenadantes do pulso, que facilitaram a obstrução para cima (Figura 24).

O gotejador 2 apresentou susceptibilidade a obstrução para os tratamentos 4, 5, 6, 7 e 8 (posição para baixo); 14, 17, 19, 20 (posição para cima) e 24, 27 e 28 (posição para o lado). Tal resposta pode ser atribuída ao regime turbulento da água assumido dentro da tubulação que conforme avança na linha, que em um primeiro momento, dada a alta concentração gera resíduos

por decantação e levanta partículas sobrenadantes que possibilitam a obstrução. Tratamentos com granulometria de partículas elevadas aparentam ter maior influência na obstrução nesta posição de gotejador (Figura 25).

O gotejador 3 não apresentou diferença significativa para a maioria dos tratamentos a exceção do 1, 2, 10 e 30 com médias de vazões de 2,25; 2,26; 2,32 e 2,26 Lh⁻¹, respectivamente; que apresentaram melhor desempenho. Contudo, o tratamento 5 com vazão média de 1,72 L h⁻¹, apresentou baixo desempenho (Figura 24).

No gotejador 4 não foi observado diferença significativa entre os tratamentos. Tal resposta pode ser atribuída a imprevisibilidade deste gotejador estar sobre influência ou não da alta concentração do arraste partículas no pulso (Figura 25).

O gotejador 5 não apresentou diferença significativa na maioria dos tratamentos. Contudo, observando-se os tratamentos 3 e 30, com vazões médias de 2,28 e 2,27 Lh⁻¹; respectivamente, verificou-se um alto desempenho de um tratamento de água limpa a um de alta concentração de partículas. Tal observação indica que determinada posição de gotejador pode estar menos susceptível a obstrução comparada as primeiras, uma vez que com avanço do pulso na linha, a solução de água e partículas assumem dentro da tubulação uma condição de maior homogeneidade, reduzindo o efeito do sobrenadante e a decantação. É possível que a estabilização da velocidade da água facilite a redução da obstrução. A resposta do tratamento 8, de vazão média de 1,6 Lh⁻¹; indica que os riscos de obstrução ainda podem ocorrer (Figura 25).

Resposta semelhante do gotejador 5 podemos observar no gotejador 6, pelo fato de não haver diferença estatística na maioria dos tratamentos. Para esta análise, tratamentos de água limpa tiveram resposta semelhante aos de grande concentração de partículas. É possível que o distanciamento do gotejador do início da linha, reduza as chances de obstrução, contudo não os isenta desta ocorrência. Os tratamentos 1, 3, 10, 11, 20 e 30 tiveram alto desempenho, comparado aos tratamentos 8, 9, 17, 19 e 26 que tiveram uma vazão menor (Figura 25).

O gotejador 7 também não apresentou diferença estatística na maioria dos tratamentos. Tiveram alto desempenho os tratamentos 2, 10 e 30, com vazões médias 2,26; 2,27 e 2,75 L.h⁻¹; respectivamente; e um baixo desempenho o tratamento 3 com vazão média de 1,83 L h⁻¹ (Figura 26).

Figura 24. Análise conjunta dos tratamentos para os gotejadores 1,2 e 3 do modelo 2. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador

Figura 25. Análise conjunta dos tratamentos para os gotejadores 4,5 e 6 do modelo 2. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador

Figura 26. Análise conjunta dos tratamentos para o gotejador 7 do modelo 2. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador

4.2.2 Análise Estatística 2 - Interação dos tratamentos e a posição dos gotejadores (Modelo 2)

Ao agruparmos as respostas dos tratamentos por posição da linha, podemos observar que o tratamento G3/C3 foi o mais severo na obstrução dos gotejadores, especialmente aqueles em que a posição da linha está para baixo, ocorreram reduções de vazão nos gotejadores 1, 4, 5, 6 e 7; com médias de 0,62; 1,75; 1,70; 2,22 e 2,26 L.h⁻¹; respectivamente. Observa-se a partir disto que o efeito da granulometria favorece a decantação das partículas durante a descarga do pulso e estando os gotejadores voltados para baixo, a susceptibilidade destes a obstrução fica maior (Figura 27).

Carvalho (2009) evidencia em seu trabalho de obstrução com ferro solúvel, sólidos suspensos e fitoplâncton, que o posicionamento dos emissores voltado para baixo demonstraram maior susceptibilidade ao entupimento.

O tratamento G3/C3 também apresentou evidências da susceptibilidade dos gotejadores iniciais ao pulso de partículas, dado que na posição de linha voltada para cima, os

gotejadores 1 e 2 também sofreram redução de vazão com média de 1,74 e 1,67 L.h⁻¹; respectivamente.

O tratamento G3/C2 também demonstrou ser favorável a obstrução, seu efeito foi observado nos gotejadores 1 e 2 na posição voltada para baixo, com médias de vazão de 0,63 e 1,24 L.h⁻¹; respectivamente. Dessa forma, pôde-se observar que a posição da linha para baixo é mais vulnerável a obstrução seguido da posição para cima e para o lado.

Não houve diferença significativa para os demais tratamentos em interação com a posição dos gotejadores.

Figura 27. Análise da interação dos fatores com a posição do gotejador na linha para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam médias dos tratamentos para cada posição do gotejador.

4.2.3 Análise Estatística 3 – Fatorial (Modelo 2)

O quadro de análise da variância revelou que o efeito dos blocos foi significativo aos gotejadores 3 e 4. O fator “posição da linha” apresentou diferença significativa para os gotejadores 1, 2, 5 e 6; não sendo significativo para as demais posições de gotejadores (Tabela 12).

Tabela 12. Quadro de análise da variância dos tratamentos para o modelo 2.

Fatores	G.L.	Quadrado médio						
		Got.1	Got.2	Got.3	Got.4	Got.5	Got.6	Got.7
Bloco	3	0,22 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,12*	0,27*	0,12 ^{ns}	0,0009 ^{ns}	0,02 ^{ns}
Posição da linha (F ₁)	2	1,95*	0,33*	0,05 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,21*	0,01*	0,06 ^{ns}
Granulometria (F ₂)	2	3,33*	0,60*	0,17*	0,30*	0,18*	0,03 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Concentração (F ₃)	2	0,19 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,03 ^{ns}
F ₁ x F ₂	4	1,68*	0,32*	0,05*	0,12 ^{ns}	0,21*	0,03*	0,02*
F ₁ x F ₃	4	0,24*	0,27*	0,06*	0,11 ^{ns}	0,04*	0,01*	0,03*
F ₂ x F ₃	4	0,05*	0,18*	0,11*	0,09*	0,07*	0,11*	0,15*
F ₁ x F ₂ x F ₃	8	0,19 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,23*	0,05 ^{ns}	0,02*	0,04 ^{ns}
Resíduo	78							
Vazão média (L h ⁻¹)		2,00	2,08	2,11	2,08	2,11	2,13	2,12
C. V. (%)		19,66	16,58	9,59	16,48	12,17	2,09	7,72

ns - não significativo; * - significativo a 10% de probabilidade; Got. - Gotejador

O fator granulometria apresentou efeito significativo a todas as posições de gotejadores, a exceção dos gotejadores 6 e 7. Enquanto que para o fator concentração, não houve efeito significativo dos tratamentos a nenhuma posição dos gotejadores.

Na interação do fator “posição da linha” com o fator granulometria, houve efeito significativo para todas as posições de gotejadores a exceção do gotejador 4. A mesma resposta também foi observada na interação do fator “posição da linha” com o fator concentração.

Na análise da interação dos fatores granulometria e concentração foi observado efeito significativo para todas as posições de gotejadores.

Para a interação tripla, somente os gotejadores 4 e 6 obtiveram resposta significativa.

Comparado ao modelo 1, pôde-se observar que o coeficiente variação da análise de variância para o modelo 2 foi bem menor. Outro aspecto importante é que a média de vazão por gotejador também é baixa para os gotejadores iniciais.

4.2.3.1 Interação Posição da linha x Granulometria

Na figura 28, pode-se observar que a faixa granulométrica de 0,25-0,5mm afetou negativamente os gotejadores 1, 2 e 5; com vazões médias de 0,91; 1,66 e 1,79 L h⁻¹; respectivamente. O gotejador 3 foi sensível a obstrução na faixa de 0,1- 0,25 mm, com registro de vazão média de 1,96 L h⁻¹. O gotejador 6 sofreu decréscimos nas faixas de 0,1- 0,25 mm e 0,25- 0,5mm, com registros de vazão média de 2,08 e 2,06 L h⁻¹. Não houve diferença significativa da interação para os gotejadores 4 e 7.

A posição da linha estando voltada para baixo pode favorecer a obstrução dos gotejadores quando estes estão expostos a pulsos de partículas de diâmetro maiores.

Figura 28. Análise da interação Posição da linha para baixo x Granulometria para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

Na posição da linha voltada para cima, verificou-se que não houve diferença significativa nas interações com as diferentes faixas granulométricas para os gotejadores 2, 3, 4, 5 e 7. Os gotejadores 1 e 6 sofreram redução na faixa granulométrica de 0,25-0,5mm com vazão de 1,83 e 2,09L h⁻¹, respectivamente (Figura 29).

Figura 29. Análise da interação Posição da linha para cima x Granulometria para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

Na figura 30, pode-se observar que não houve diferença significativa dos tratamentos na interação das diferentes faixas granulométricas com a posição da linha voltada para o lado, para a maioria das posições de gotejadores a exceção do gotejador 6 que sofreu redução de vazão nas faixas granulométricas de 0,05-0,1mm e 0,1-0,25 mm, com médias de vazão de 2,13 e 2,10 Lh⁻¹, respectivamente. Dentre as posições de linha analisadas, a posição da linha voltada para o lado parece reduzir a ocorrência de obstrução por partículas decantadas ou sobrenadantes presentes no pulso.

Figura 30. Análise da interação Posição da linha para o lado x Granulometria para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

4.2.3.2 Interação Posição da linha x Concentração

Na figura 31, pode-se observar que a interação das diferentes posições de linha com a concentração de 5g não apresentou efeito significativo para os gotejadores 2,4,5 e 7. Os gotejadores 1 e 3 foram sensíveis a obstrução na posição voltada para baixo, apresentando vazões médias de 1,68 e 1,96 L h⁻¹, respectivamente.

O gotejador 6, por sua vez, sofreu diferença significativa na interação em duas posições. Na posição para baixo, obteve vazão média de 2,08 L h⁻¹ enquanto que na posição para o lado a média de vazão encontrada foi de 2,12 L h⁻¹.

Figura 31. Análise da interação Posição da linha x Concentração de 5g para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

Não foi observado diferença significativa da interação das posições de linha a concentração de 10g para os gotejadores 1, 3, 4, 5 e 6.

Os gotejadores 2 e 7 sofreram reduções de vazões quando submetidos a posição voltada para baixo, no qual registrou-se médias de 1,86 e 1,97 L h⁻¹, respectivamente (Figura 32).

Figura 32. Análise da interação Posição da linha x Concentração de 10g para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

Na figura 33, pôde-se observar que não houve diferença significativa da interação das posições de linha à concentração de 20g para os gotejadores 2, 3, 4 e 7. Enquanto que para os gotejadores 1 e 5, a diferença foi expressa na interação com a posição voltada para baixo, registrando-se vazões médias de 1,6 e 1,94 L h⁻¹, respectivamente. O gotejador 6, por sua vez, sofreu redução de vazão foi observada na interação com a posição da linha voltada “para cima”, com média de 2,10 L h⁻¹ (Figura 32).

Figura 33. Análise da interação Posição da linha x Concentração de 20g para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

A posição da linha voltada para o lado demonstrou nas diferentes interações o melhor desempenho, apresentando as maiores médias de vazão.

4.2.3.3 Interação Concentração x Granulometria

Na interação das diferentes faixas granulométricas a concentração de 5g, verificou-se que houve diferença significativa entre os tratamentos para toadas as posições de gotejadores a exceção do gotejador 4. Os gotejadores 1, 2, 5, 6 e 7; apresentaram decréscimos nas médias de vazão para a faixa granulométrica de 0,25 – 0,5 mm com valores de 1,62; 1,91; 1,94; 2,01; 1,99 L h⁻¹, respectivamente. O gotejador 3 apresentou decréscimos de vazão nas faixas de 0,1 – 0,25 mm e 0,25-0,5 mm, com vazões médias de 2,01 e 2,04 L h⁻¹, respectivamente (Figura 34).

Figura 34. Análise da interação Granulometria x Concentração de 5g para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

Na figura 35, pode-se observar como reposta da interação das faixas granulométricas a concentração de 10g que os gotejadores 1, 2 e 4 sofreram redução de vazão na faixa granulométrica de 0,25-0,5 mm, apresentando vazões de 1,78; 1,81 e 1,93 L h⁻¹. O gotejador 3 foi sensível a obstrução para a faixa granulométrica de 0,1-0,25mm, com vazão de 2,03 L h⁻¹. O gotejador 6 apresentou redução da vazão média nas faixas de 0,1-0,25 e 0,25-0,5 mm, com vazões de 2,10 e 2,08 L h⁻¹, respectivamente. Não houve diferença significativa dos tratamentos para os gotejadores 5 e 7.

Figura 35. Análise da interação Granulometria x Concentração de 10g para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

Na interação das faixas granulométricas a concentração de 20 g, não foi observado diferença significativa entre os tratamentos para os gotejadores 2,4 e 5. Contudo, para o gotejador 1, houve decréscimo da vazão para a faixa granulométrica de 0,25-0,5 mm com registro de 1,55 L h⁻¹. O gotejador 3 sofreu decréscimo nas faixas granulométricas de 0,05-0,1 mm e 0,1-0,25 mm, com vazões de 2,09 e 2,07 L h⁻¹, respectivamente (Figura 36).

Os gotejadores 6 e 7 foram sensíveis a obstrução na combinação da concentração de 20 g as faixas granulométricas de 0,05-0,1mm e 0,1-0,25mm. Na primeira faixa, ambos os gotejadores 6 e 7 apresentaram vazões de 2,09 L h⁻¹. Na segunda faixa, os gotejadores 6 e 7 apresentaram redução de vazão, com registros de 2,06 e 2,05 L h⁻¹, respectivamente.

Figura 36. Análise da interação Granulometria x Concentração de 20g para o modelo 2. Letras maiúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

4.2.3.4 Fatores isolados

4.2.3.4.1 Posição da linha

A posição da linha é um fator que pode contribuir para obstrução de gotejadores sujeito a pulsos de partículas sólidas. Evidências de obstrução podem ser observadas nas médias de vazões obtidas na posição da linha para baixo. O processo de decantação das partículas e o arrastes destas dentro da linha tornou susceptível a obstrução dos gotejadores 1,2,4 e 5 posicionados para baixo, registrando-se vazões médias de 1,75; 1,98; 2,02 e 2,14 L.h⁻¹, respectivamente. Faria (2013), testando emissores do tipo pastilha com posições de linha voltado para cima e para baixo, verificou que maiores níveis de obstrução em gotejadores voltados baixo (Figura 37).

Figura 37. Análise do efeito da posição da linha para diferentes posições de gotejador do moledo 2. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

4.2.3.4.2 Granulometria

O diâmetro da partícula foi um fator determinante para a obstrução dos gotejadores. A faixa granulométrica de 0,25 - 0,5 mm contribuiu para obstrução dos gotejadores 1, 2, 3, 4 e 5; com registros de vazões médias de 1,65; 1,93; 2,01; 2,03 e 2,11 L.h⁻¹. A redução de vazão também foi observada no gotejador 5 quando exposto a partículas de areia de faixa granulométrica de 0,1 - 0,25mm, com média de 2,11 L.h⁻¹ (Figura 38). Segundo Adin et al (1991), a severidade do entupimento depende mais do tamanho do que a quantidade de partículas presentes na água de irrigação.

Figura 38. Análise do efeito do diâmetro de partícula para diferentes posições de gotejador do moledo 2. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

4.2.3.4.3 Concentração

Não houve diferença significativa entre os tratamentos de concentração para as sete posições de gotejadores analisadas (Figura 39).

Figura 39. Análise do efeito da concentração para diferentes posições de gotejador do moledo 2. Letras minúsculas comparam média dos tratamentos para cada posição do gotejador.

5 CONCLUSÕES

Considerando as condições experimentais, como também, a análise dos resultados obtidos, foi possível concluir que:

- 1) A posição da linha voltada para o lado apresentou melhor desempenho, confirmando-se a hipótese inicial de que esta posição pode contribuir para a redução da obstrução.
- 2) Gotejadores de mesmo modelo, mas de vazões distintas, podem apresentar respostas diferentes quando expostos a pulsos de partículas de diferentes granulometrias.
- 3) Os gotejadores do início da linha estão mais propensos a obstrução por pulsos de partículas.
- 4) A posição da linha é um fator que pode contribuir para a susceptibilidade dos gotejadores a obstrução. A posição da linha voltada para baixo torna mais propensa a obstrução dos gotejadores, por um possível efeito de decantação de partículas durante a passagem do pulso, principalmente quando a faixa granulométrica é elevada.
- 5) A granulometria da partícula é o fator dominante para a obstrução física de gotejadores.

REFERÊNCIAS

- Adim, A.; Sacks, M. Dripper-clogging factors in wastewater irrigation. **Journal of irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v.117, n.6, p. 813 – 826, 1991.
- Bernardo, S. Soares, A.A.; Mantovani, E.C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.
- Boman, B.J. Effects of orifice size on microsprinkler clogging rates. **Appl. Eng. Agric.** v.11, n.6, p. 839–843, 1995.
- Bounoua S.; Tomas S.; Labille J.; Molle B.; Granier J.; Haldenwang P.; Izzati S. Understanding physical clogging in drip irrigation: in situ, in-lab and numerical approaches. **Irrigation Science**. v.34, n.4 p.327–342, 2016.
- Bounoua, S. **Etude du colmatage des systemes s'irrigation localisse**. 2010. 116 p. Thèse (Doucteur d'aix marseille universite I Especialité Mécanique et physique des fluides) - Universite de Provence Aix-Marseille I, Aix-em-Provence, 2010.
- Bralts, V.F., Wu, I.P., Gitlin, H.M. Manufacturing variation and drip uniformity. **Transactions of the ASAE**. v 24, n. 1, p. 113–119, 1981
- Bucks, D.A.; Nakayama, F.S.; Gilbert, R.G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenace. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.2, p. 149 -62, 1979.
- Carvalho, L. C. C. **Dinâmica do entupimento de tubos gotejadores sob aplicação de ferro solúvel, sólidos em suspensão e fitoplâncton**. 2009. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- Capra, A.; Scicolone, B. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Amsterdam, v. 70, p.355-365, 1998
- Chiang, S.; Ghaemi, A. Uniformity in a microirrigation with partially clogged emitters. **ASAE Annual International Meeting**; St. Joseph, 2003 (Paper No. 032097)
- Coelho, R. D.; Vilela, L. A. A.; Resende, R. S.; Teixeira, M. B.; Sá, J. S. Entupimento de gotejadores em decorrência de pulsos de partículas sólidas na malha hidráulica. **Irriga**, v.12, p.108-122, 2007.
- Coiado, E. M. **Estado da arte do transporte solido em conduto forçado**. Bragança Paulista. Sepata- Revista das Faculdades Franciscanas, 1984. v.2. 55p.
- Faria, L. A. **Proposta de norma técnica de ensaio para tubogotejadores de irrigação: resistência ao entupimento por particulados sólidos em suspensão**. 2012. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- Gilbert, R.G.; Ford, H.W. Operational principles/emitter clogging. In: Nakayama, F.S.; Bucks, D.A. **Trickle irrigation for crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p.142-63.
- Gilbert, R G.; Nakayama, F.S.;Bucks, D.A.; French, O.F. Adamson, k.C. Trickle irrigation: emitter clogging ando other flow problems. **Agricultural Water Management**, v.3, n.3, p.159-178, 1981
- Kulick, J; Fessler, J.; Eaton, J. Particle response and turbulence modification in fully developed channel flow. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 277, p. 109–134, 1994.
- Lavanholi, R. **Avaliação de procedimento de ensaio para determinação da sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas sólidas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- Miedema, S.A. An Overview of Theories Describing Head Losses in Slurry Transport: A Tribute to Some of the Early Researchers, **ASME 2013 - 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**. Nantes, v. 14, 2013.

- Nakayama, F. S., Boman, B. J., Pitts, D. J. Maintenance. In: LAMM, F. R.; AYARS J. E.; Nakayama, F. S. (Ed.), **Microirrigation for Crop Production**. Design, Operation, and Management, Amsterdam, 2007. p. 389-430.
- Nakayama, F.S.; Bucks, D.A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. **Irrigation Science**, Amsterdam, v.12, n.4, p. 187 -192, 1991.
- Newitt, D. M.; Richardson, M. C.; Abbott, M.; Turtle, R. B. Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**. v. 33., p. 93-110, 1955.
- Niu W. ; Liu L. ; Chen X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. **Irrigation Science**. v. 31, n. 4, p 545–555, 2013
- Oron, G.; Demalach, J.; Hoffman, Z.; Cibotaru, R. Subsurface microirrigation with effluent. **J. Irrig. Drain. Eng. ASCE**. v.117, n.1, p. 25–36, 1991.
- Perboni, A. **Sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas de areia**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- Pitts, D.J.; Haman, D.Z.; Smajstla, A.G. **Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems**. Gainesville: University of Florida, Florida Cooperative Extension Service, 2003. (Bulletin, 258).
- Pizarro, F. **Riegos localizados de alta frecuencia**. 3 ed. Madrid: Mundi Prensa, 1996. 513p
- Qingsong, W.; Gang, L.; Jie L.; Yusheng, S.; Wenchu, D.; Shuhuai, H. Evaluations of emitter clogging in drip irrigation by two-phase flow simulations and laboratory experiments. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 63, n. 2, p. 294-303, 2008.
- Ravina, I.; Paz, E.; Sofer, Z.; Marcu, A.; Sagi, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. **Irrigation Science**, Amstersam, v. 13, p. 129-139, 1992.
- Vekariya, P.B.; Subbaiah, R.; Marhru, H. H. Hydraulics of microtube emitters: a dimensional analysis approach. **Irrigation Science**, Amsterdam, v. 29, n. 4, p. 341 -350, 2011.
- Vreman, A. W. Turbulence characteristics of particle-laden pipe flow. **Journal of Fluid Mechanics**, v.584, p. 235–279, 2007.
- Yuan, Z.; Michaenidies, E. Turbulence modulation in particle flows—a theoretical approach. **International Journal of Multiphase Flow**, v.18, n.5, p.779–785, 1992.
- Zhai, G.L.; Lv, M.C.; Wang, H.; Xiang, H.A. Plugging of microirrigation system and its prevention. **Trans. Chin. Soc. Agric.Eng**, v.15, n.1, p. 144–147,1999.
- Zhu, L.Y.; Cui, C.L. Discussion on problem of block-up in drip irrigation underground and its treatment. **Res. Soil Water Conserv**, v.12, n.2, p.111–112, 2005.