

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

Obstrução de gotejadores por interações entre carbonato de cálcio e partículas  
sólidas: laboratório e campo

**Diego José de Sousa Pereira**

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

Piracicaba  
2022

Diego José de Sousa Pereira  
Engenheiro Agrícola e Ambiental

**Obstrução de gotejadores por interações entre carbonato de cálcio e partículas sólidas:  
laboratório e campo**

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador  
Prof. Dr. **JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE**

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

Piracicaba  
2022

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

Pereira, Diego José de Sousa

Obstrução de gotejadores por interações entre carbonato de cálcio e partículas sólidas: laboratório e campo / Diego José de Sousa Pereira. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2022.

79 p.

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

1. Irrigação localizada 2. Obstrução química 3. Obstrução física 4. Qualidade da água I. Título

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, **José Donizeth** e **Silvana Moura**,  
por todo apoio e dedicação.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, pela fé, saúde e oportunidades oferecidas.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade, suporte e infraestrutura para a realização desse trabalho. A todos professores e funcionários desta instituição, que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desse trabalho.

Ao meu orientador, José Antônio Frizzone, pela amizade, dedicação e instruções durante a realização do trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa durante o período do doutorado.

À FAPESP pelo financiamento do Projeto de Pesquisa (nº 2018/20099-5).

Aos meus pais, José Donizeth e Silvana Moura, pela dedicação e apoio durante minha vida, proporcionando o suporte necessário para completar mais essa etapa.

À minha irmã Gabrielle, pela amizade e companheirismo durante toda a vida.

À Raquel Ribeiro, minha namorada e companheira, por todo suporte, carinho e auxílio, inclusive nos momentos de trabalho dessa pesquisa.

Aos meus colegas de pós-graduação, por todo apoio e momentos vividos ao longo dessa jornada, em especial ao José Eustáquio, Rogério Lavanholi, Ailson Almeida, Thaís Charles, Hugo Ricardo e Juliana Martins pelo auxílio durante esse trabalho e pela amizade.

À equipe do LHI da UNICAMP, em especial, Antonio Camargo, Jonesmar Oliveira, Jhonnatan Guarnizo, Gustavo Muniz e Nicolás Cano pela amizade e por toda ajuda nos experimentos. À FEAGRI pela concessão do campo experimental para a realização do trabalho.

A todos colegas de curso, pelo apoio e momentos de descontração ao longo dessa jornada.

Muito obrigado!

## SÚMARIO

RESUMO .....	7
ABSTRACT .....	8
LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE TABELAS .....	10
1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Objetivos.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
2.1. Obstrução causada por partículas sólidas em suspensão .....	13
2.2. Obstrução por carbonato de cálcio .....	15
2.3. Sistema Carbonato.....	16
2.4. Precipitação de CaCO <sub>3</sub> .....	17
2.5. Efeito de partículas minerais na precipitação do CaCO <sub>3</sub> .....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1. Bancada para ensaios de gotejadores comerciais em laboratório.....	23
3.2. Material avaliado .....	25
3.3. Qualidade da água de ensaio em condições controladas .....	27
3.4. Ensaios de obstrução em laboratório .....	27
3.4.1. Ensaios de obstrução com partículas sólidas .....	27
3.4.2. Ensaios de obstrução com carbonato de cálcio .....	29
3.4.3. Ensaios avaliando interações entre partículas sólidas e carbonato de cálcio .....	30
3.4.4. Avaliação do desempenho dos gotejadores .....	32
3.5. Experimentos de obstrução em campo experimental .....	33
3.6. Análise de desempenho dos ensaios em laboratório e em campo .....	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	39
4.1. Ensaios de obstrução com partículas sólidas em laboratório .....	39
4.2. Ensaios em laboratório de obstrução por CaCO <sub>3</sub> e interação de partículas sólidas e CaCO <sub>3</sub> .....	43
4.3. Ensaios de obstrução em campo com águas de diferentes características.....	53
4.3.1. Vazão no início da linha lateral .....	53
4.3.2. Ensaio de uniformidade de aplicação de água.....	57
4.3.3. Processos de obstrução em condições de campo.....	63
4.4. Comparação do desempenho dos emissores em condições controladas e em campo ...	64

5. CONCLUSÕES .....71  
REFERÊNCIAS.....73

## RESUMO

### **Obstrução de gotejadores por interações entre carbonato de cálcio e partículas sólidas: laboratório e campo**

Um dos maiores desafios de manutenção de sistemas de irrigação localizada é a obstrução de gotejadores, afetando a uniformidade de aplicação de água e a produtividade da cultura. Entre os principais responsáveis por esse fenômeno estão agentes físicos, químicos e biológicos. Em condições de campo, esses agentes atuam de forma individual e/ou simultânea promovendo a obstrução dos emissores. Diante disso, essa pesquisa teve como objetivo identificar padrões de obstrução envolvendo partículas sólidas suspensas e precipitados de  $\text{CaCO}_3$ , bem como a interação desses agentes. Além disso, buscou-se identificar emissores mais susceptíveis à obstrução, bem como avaliar se as metodologias de ensaio de obstrução em laboratório representam a realidade do campo. Oito modelos comerciais de tubogotejadores com vazão inferior à  $1,8 \text{ L h}^{-1}$ , foram submetidos a ensaios em laboratório, avaliando a sensibilidade à obstrução quanto à presença de partículas sólidas de pequena granulometria ( $<125 \mu\text{m}$ ), dureza da água em  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$  e a interação entre esses dois agentes. Os tubogotejadores foram submetidos também a um ensaio em condição de campo sob três tratamentos (T1 – água de superfície; T2 – água de superfície + partículas sólidas de pequena granulometria; e T3 – água de superfície + água com dureza de  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ ). Os ensaios em laboratório com partículas sólidas mostraram que emissores de baixa vazão ( $<1,6 \text{ L h}^{-1}$ ) foram mais susceptíveis à obstrução quando comparados à emissores de maior vazão, independentemente da concentração de partículas avaliadas. A nível de campo, os resultados de laboratório se confirmaram, sendo que os emissores de baixa vazão foram mais sensíveis ao processo de obstrução. Emissores de maior vazão ( $1,6$  a  $1,8 \text{ L h}^{-1}$ ) foram resistentes à obstrução, independentemente do tratamento aplicado. A hipótese de que a interação de partículas sólidas de pequena granulometria e precipitados de  $\text{CaCO}_3$  intensificavam os problemas de obstrução não foi confirmada, visto que no ensaio de interação a presença de partículas sólidas retardou a obstrução. O método de acompanhamento de vazão no início da linha lateral e a determinação do coeficiente de uniformidade estatístico apresentaram divergências na avaliação da evolução da obstrução a nível de campo o que pode provocar uma tomada de decisão de substituição do sistema de forma errônea.

Palavras-chave: irrigação localizada, Obstrução química, Obstrução física, Qualidade da água



## ABSTRACT

**Emitter's clogging by interactions between calcium carbonate and solid particles:  
laboratory and field**

One of the biggest maintenance challenges of microirrigation systems is the emitter's clogging, impairing uniformity of water application and crop productivity. This phenomenon is related to physical, chemical, and biological agents. Under field conditions, these agents act individually and/or combined clogging the emitters. Therefore, this research aimed to identify patterns of clogging involving suspended solid particles and  $\text{CaCO}_3$  precipitates, as well as the interaction of these agents. In addition, we sought to identify emitters most susceptible to clogging, as well as to assess whether clogging testing methodologies in the laboratory represent the reality of the field. Eight commercial models of driplines with a flow rate lower than  $1.8 \text{ L h}^{-1}$  were submitted to laboratory tests, evaluating the sensitivity to clogging regarding the presence of solid particles of small granulometry ( $<125 \mu\text{m}$ ), water hardness at  $200 \text{ mg L}^{-1}$  in  $\text{CaCO}_3$  and the interaction between these two agents. The drippers were also subjected to a field test under three treatments (T1 - surface water; T2 - surface water + small particle size solid particles; and T3 - surface water + water hardness at  $200 \text{ mg L}^{-1}$  in  $\text{CaCO}_3$ ). Laboratory tests with solid particles showed that low flow emitters ( $<1.6 \text{ L h}^{-1}$ ) were more susceptible to clogging when compared to higher flow emitters, regardless of the concentration of particles evaluated. At the field level, emitters have confirmed laboratory results, in which low-ratio emitters were more sensitive to the clogging process. Higher flow emitters ( $1.6$  to  $1.8 \text{ L h}^{-1}$ ) were resistant to clogging, regardless of the treatment applied. The hypothesis that the interaction of fine-grained solid particles and  $\text{CaCO}_3$  precipitates intensified the clogging problems was denied, since in the interaction test the presence of solid particles delayed clogging. The flow methods monitoring at the beginning of the lateral line and the statistical uniformity coefficient ( $U_s$ ) showed divergences in the evaluation of the development of clogging at the field level, which can lead to an erroneous decision to replace the system.

Keywords: Micro irrigation, Chemical clogging, Physical clogging, Water quality

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Bancada de ensaios de obstrução de gotejadores.....	23
Figura 2. Design dos emissores avaliados .....	26
Figura 3. Difratoograma do solo.....	31
Figura 4. Esquema básico da estrutura para condução de experimentos em campo .....	35
Figura 5. Vazão média relativa para os modelos avaliados na presença de partículas sólidas .....	40
Figura 6. Processos de obstrução evidenciados nos ensaios com partículas sólidas em laboratório.....	42
Figura 7. Variação de vazão relativa média dos modelos de emissores na presença de $\text{CaCO}_3$ e de interação em ensaio de laboratório .....	45
Figura 8. Processos de obstrução observados no ensaio apenas com $\text{CaCO}_3$ .....	46
Figura 9. Fenômenos de obstrução observados no ensaio de interação.....	47
Figura 10. Características da qualidade de água nos ensaios envolvendo $\text{CaCO}_3$ e interação em condições de laboratório .....	50
Figura 11. Difratoograma da análise dos ensaios a) apenas $\text{CaCO}_3$ b) interação.....	52
Figura 12. Morfologia do material depositado (aumento de 400x) a) ensaio apenas com $\text{CaCO}_3$ b) ensaio com interação .....	53
Figura 13. Variação de vazão no início da linha lateral para os tratamentos T1, T2 e T3 em condições de campo (limite inferior = 90%).....	56
Figura 14. Variação do coeficiente de uniformidade estatístico para os tratamentos T1, T2 e T3 em condições de campo (limite inferior: cue = 70%).....	58
Figura 15. Distribuição da vazão relativa e cue para os tratamentos T1, T2 e T3 em condição de campo (limite inferior: cue = 70%).....	62
Figura 16. Fenômenos de obstrução observados em condição de campo .....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros hidráulicos dos emissores.....	25
Tabela 2. Dimensões do pré-filtro e labirinto dos emissores.....	26
Tabela 3. Peneiras utilizadas para separação e quantidade de partícula a serem adicionadas ao reservatório.....	28
Tabela 4. Parâmetros físicos e químicos do solo .....	31
Tabela 5. Parâmetros da qualidade da água do lago utilizado nos ensaios de campo.....	33
Tabela 6. Resumo dos ensaios realizados indicando a tolerância à obstrução dos emissores .....	65
Tabela 7. Valores de erro total e F1_score dos ensaios realizados em laboratório e em campo .....	68
Tabela 8. Valores de erro total e F1_score dos métodos de acompanhamento em campo.....	69

## 1. INTRODUÇÃO

A irrigação por gotejamento apresenta potencial para ser uma das melhores técnicas de irrigação em termos de eficiência no uso da água. Entretanto, a obstrução de emissores é considerada um dos maiores problemas em microirrigação e pode impedir que os benefícios potenciais desses sistemas de irrigação sejam atingidos. A obstrução parcial ou completa de emissores afeta a uniformidade de aplicação de água (Bralts et al., 1981; Han et al., 2019; Baeza & Contreras, 2020) e de fertilizantes, eleva os custos de manutenção e pode prejudicar a produtividade e a qualidade dos cultivos (Lamm et al., 2006).

A obstrução de emissores é influenciada pela qualidade da água de irrigação (Nakayama & Bucks, 1991; Bounoua et al., 2016; Pinto et al., 2017) e pelas dimensões e geometria do labirinto dos emissores (Zhengying et al., 2012; Feng et al., 2018a; Zhou et al., 2019a; Yu et al., 2019), sendo que a maior parte dos estudos se dedica a aspectos relacionados com a qualidade da água. Nakayama & Bucks (1991) apresentam uma classificação bastante utilizada para estimar o risco de obstrução de emissores em função da qualidade da água. Embora não haja um método infalível para estimar riscos de obstrução, a análise de água permite antecipar possíveis problemas e formular soluções preventivas e de manutenção do sistema de irrigação (Lamm et al., 2006).

De modo geral, problemas de obstrução de emissores estão associados a filtragem insuficiente, tratamento químico inadequado da água ou limpeza pouco frequente ou inapropriada das linhas de irrigação (Lamm et al., 2006), mas nem sempre esses problemas podem ser evitados mediante manejo e por isso, entender o processo de obstrução é o primeiro passo para o desenvolvimento de emissores menos sensíveis à obstrução.

Em condições de campo, observa-se que os agentes físicos, químicos e biológicos atuam em conjunto, formando um composto que obstrui o emissor. Entretanto, esse fenômeno ainda não é entendido completamente (Li et al., 2018). Portanto, entender como esses fatores atuam de maneira individualizada e, posteriormente, de maneira combinada pode auxiliar na identificação, aprimoramento e desenvolvimento de emissores mais resistentes à obstrução. Partindo do pressuposto que os fatores biológicos podem ser satisfatoriamente controlados com cloração (Chauhdary et al., 2015; Song et al., 2017) e que a filtragem mínima utilizada em sistemas de microirrigação é de 120 mesh (125  $\mu\text{m}$ ), espera-se que apenas partículas de pequena granulometria e agentes químicos possam atingir os emissores resultando em risco de obstrução.

Essa pesquisa visou avaliar a hipótese de que processos de acúmulo de sedimentos e de incrustações em labirintos de gotejadores são intensificados por interações entre carbonato de cálcio e partículas sólidas suspensas que atravessam o sistema de filtragem. Pretende-se com essa

proposta compreender melhor os processos de obstrução em labirintos de gotejadores comerciais, causados (i) pelo acúmulo de partículas de pequena granulometria; (ii) pela formação de precipitados, incrustação e deposição de carbonato de cálcio; e (iii) pela interação entre esses agentes.

Como segunda hipótese, acredita-se que emissores que apresentam desempenho satisfatório operando em ensaios de laboratório, também apresentam resistência a obstrução sob condições de campo. A pesquisa incluiu investigações em laboratório e em campo experimental utilizando águas com diferentes características, visando a validação de que ensaios em campo são de grande importância para confirmar se os resultados obtidos em laboratório são suficientemente representativos, ou se as metodologias de laboratório precisam ser melhoradas.

### **1.1. Objetivos**

1. Investigar processos de obstrução em gotejadores comerciais, causados por partículas de pequena granulometria, por precipitados de carbonato de cálcio e pela interação entre esses agentes, a fim de quantificar a severidade dos problemas de obstrução;
2. Confrontar a base de resultados obtida em condições de laboratório, com os resultados obtidos em campo, a fim de verificar se as metodologias de laboratório são suficientemente capazes de produzir resultados que representam condições adversas de campo.
3. Comparar metodologias para avaliação dos processos de obstrução em campo por meio da avaliação de vazão no início da linha lateral e com a avaliação do coeficiente de uniformidade estatístico (CUE).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Obstrução causada por partículas sólidas em suspensão

A obstrução por partículas sólidas em suspensão tem sido apontada como a um dos principais tipos de obstrução (Taylor et al., 1995; Bounoua et al., 2016; Feng et al., 2018b). Esse tipo de problema normalmente é ocasionado pela presença de partículas em suspensão, que podem ser de origem inorgânica (areia, silte, argila, plásticos e outros sedimentos) e orgânica (organismos aquáticos, zooplâncton, caramujos, peixes, larvas de insetos, formigas e aranhas) (Lamm et al., 2006).

Os principais fatores que influenciam na obstrução por partículas em suspensão são o diâmetro e a concentração das partículas (Adin & Sacks, 1991; Oliveira, 2017; Lavanholi et al., 2018). Adin & Sacks (1991) afirmaram que a severidade da obstrução, em muitos casos, depende mais do tamanho do que da concentração de partículas na água de irrigação. No entanto, é possível que o aumento da concentração de partículas, mesmo que de pequenos diâmetros (< 0,01 mm), ocasione efeito significativo na obstrução dos emissores (Niu; Liu; Chen, 2013).

Desse modo, o risco de obstrução por fatores físicos pode ser classificado de acordo com a concentração de partículas sólidas em suspensão. Para concentrações menores do que 50 mg L<sup>-1</sup> o risco de obstrução é baixo, entre 50 e 100 mg L<sup>-1</sup> o risco é moderado e acima de 100 mg L<sup>-1</sup> há alto risco de obstrução (Bucks et al., 1979). A granulometria de partículas não apresenta classificação de risco de obstrução provavelmente porque todo sistema de irrigação por gotejamento requer filtragem com capacidade de retenção de partículas de tamanho menor ou igual a 125 µm (120 mesh).

Lavanholi et al. (2016) avaliando emissores integrados, não regulados e com vazão nominal inferior a 2 L h<sup>-1</sup>, observaram que a obstrução pode ser causada por partículas ou aglomerados de partículas de diâmetro relativamente grande (com dimensões próximas as da seção de escoamento do labirinto), que se depositam no labirinto e favorecem o acúmulo de partículas menores, bloqueando totalmente a seção de passagem do emissor; ou pode ser decorrente do acúmulo lento de partículas finas em zonas de recirculação ou baixa velocidade no interior dos emissores.

Oliveira (2017) avaliou o potencial de formação de agregados e o risco de obstrução provocado por partículas de argila, como agente isolado de obstrução. Em condições controladas e livre de risco de obstrução por agentes biológicos, não foi evidenciada a formação de aglomerados suficientemente grandes para provocar a obstrução de gotejadores, sendo então

suposto que aglomerados são formados por interações entre partículas de argila, silte e areia fina. As partículas de argila acumularam-se nos labirintos e provocaram redução significativa na vazão dos emissores somente em concentrações iguais ou superiores a  $1000 \text{ mg L}^{-1}$ . Observou-se ainda que as partículas de argila estão sujeitas a fenômenos de autolimpeza que ocorrem no interior dos labirintos devido aos ciclos de partida e desligamento do sistema de bombeamento.

Embora as partículas que normalmente atravessam o sistema de filtragem sejam aparentemente pequenas para proporcionar a obstrução dos emissores, sob dadas condições físico-químicas e hidrodinâmicas, é possível que ocorra a aglomeração de partículas após o sistema de filtragem e a consequente obstrução de emissores (Thill et al., 2001; Niu et al., 2013; Bounoua et al., 2016; Oliveira et al., 2017; Lavanholi et al., 2018). Além disso, as interações entre agentes biológicos e sólidos suspensos intensificam os problemas de obstrução.

A formação de agregados em misturas com partículas suspensas e em condição hidrostática depende fortemente da natureza das partículas, concentração de eletrólitos (sais) e pH da mistura (Niu; Liu; Chen, 2013; Bounoua et al., 2016; Oliveira et al., 2017). Quando tais misturas são submetidas à condição hidrodinâmica, a turbulência torna-se mais um fator no processo de agregação (Bounoua et al., 2016; Oliveira, 2017), pois influencia na colisão entre partículas e na formação/quebra de agregados (Thill et al., 2001). Em processos de coagulação e floculação adotados no tratamento de água, a turbulência e a consequente taxa de colisão entre partículas pode ser quantificada pelo gradiente de velocidade (Richter, 2009), sendo que há uma faixa de valores que favorece a formação de flocos ou agregados.

A utilização de sistemas de filtragem é uma das medidas preventivas para a obstrução dos emissores se tratando de partículas sólidas. A filtragem mínima recomendada para vários gotejadores comerciais é de 120 mesh ( $125 \mu\text{m}$ ), no entanto partículas pequenas como as de argila, silte e areia fina, além de químicos dissolvidos, organismos microscópicos, algas e bactérias, não são retidas pelo sistema de filtragem e podem causar obstrução pela formação de aglomerados maiores devido ao acúmulo e/ou agregação, ou ainda por processos de precipitação (Niu; Liu; Chen, 2013; Bounoua et al., 2016). Problemas de obstrução são mais severos nas extremidades finais das linhas laterais (Taylor et al., 1995; Li et al., 2015; Bounoua et al., 2016), pois nesses locais a velocidade de escoamento na tubulação é insuficiente para manter as partículas em suspensão e há acúmulo gradual de sedimentos.

Para a remoção de sedimentos que se acumulam nos finais de linha lateral é comum a execução de rotinas de limpeza das linhas laterais (*flushing*). Esse procedimento consiste na abertura do fim das linhas laterais, possibilitando a remoção de partículas por meio do fluxo de

água. A velocidade, a frequência e a duração são os principais fatores intervenientes nessa prática essencial de manutenção de sistemas de microirrigação (Yu et al., 2018).

## 2.2. Obstrução por carbonato de cálcio

Dentre os agentes causadores de obstrução química, destacam-se nesta pesquisa os precipitados de carbonato de cálcio. No Brasil, problemas de obstrução em sistemas de irrigação devido a precipitados de carbonato de cálcio são relatados em regiões de São Paulo, no norte de Minas Gerais e em parte do nordeste do país (Mélo et al., 2008; Duarte, 2010). Além disso, é comum o uso de águas subterrâneas para irrigação, geralmente provenientes de aquíferos de formação calcária, ricas em carbonato de cálcio e bicarbonato (Goyal et al., 2016).

Além de águas naturais de superfície e subterrâneas, é crescente o interesse no uso de efluentes tratados em áreas irrigadas. Essas águas apresentam diferentes composições e quantidade de material sólido, químico e biológico, que se depositam ou se formam no interior dos labirintos dos emissores e conseqüentemente oferecem risco de obstrução (Rizk et al., 2019). Nesse cenário, rotinas de fertirrigação também contribuem para aumentar o risco de obstrução dos gotejadores por agentes químicos e/ou por agentes biológicos que se alimentam dos nutrientes presentes na água de irrigação. Recomenda-se, portanto, pressurizar o sistema com água, realizar a fertirrigação e encerrar a rotina aplicando água novamente para limpeza dos tubo-emissores (Zhou et al., 2019b; Zhou et al., 2019c).

Utilizando água com altos teores de ferro e cálcio, Hao et al. (2017) observaram aumento na massa de sólidos totais depositados no interior do labirinto, em relação ao tratamento controle. Segundo os autores, o que explica a maior massa depositada nesse caso, foi o desenvolvimento de biofilme causado pelos microrganismos, o que favoreceu a deposição dos cristais precipitados, aumentando o risco de obstrução.

Diversos estudos relatam que o carbonato de cálcio é o principal precipitado formado e responsável pela obstrução de gotejadores quando se utiliza água salina (Lili et al., 2016, 2019; Hao et al., 2017; Li et al., 2018; Zhou et al., 2019d). Valores entre 150 e 300 mg L<sup>-1</sup> de dureza na água de irrigação são indicativos que a água oferece moderado risco de obstrução química causada pelo carbonato de cálcio (Nakayama & Bucks, 1991; Goyal et al., 2016). Lili et al. (2016) e Zhangzhong et al. (2018) ao trabalharem com a mesma fonte de água (Distrito de irrigação de Hetao- China), cuja dureza é de 240 mg L<sup>-1</sup>, relatam que dentre os compostos observados no interior dos gotejadores, o carbonato de cálcio foi o principal componente, representando cerca de 36,1% dos componentes responsáveis pela obstrução dos gotejadores.



Mélo et al. (2008) avaliaram a obstrução ocasionada por carbonato de cálcio em oito modelos de emissores distintos, alterando valores do Índice de Saturação de Langelier (ISL). Esperava-se que com o aumento do valor de ISL, aumentasse a severidade à obstrução ocasionada pelo carbonato de cálcio. No entanto, devido à alta deposição de precipitados observada no sistema de filtragem, o que causou obstrução do elemento filtrante, não foi possível observar de modo efetivo como o aumento do ISL interferiu no funcionamento dos emissores. Portanto, em condições controladas de ensaio, deve-se atentar ao funcionamento adequado do sistema.

A deposição de precipitados de  $\text{CaCO}_3$  também é influenciada pelo material e pela rugosidade da superfície sobre a qual ocorrerá a deposição do precipitado (Kukulka, 2005). Quanto maior a rugosidade, maior a tendência de formação de incrustações e maior a força com que incrustações de  $\text{CaCO}_3$  se aderem à superfície, tornando-se mais difícil desprender precipitados nessas situações (Keysar et al., 1994; Alahmad, 2008). Nesse aspecto, a fabricação de tubos e emissores de superfície mais lisa caracteriza uma vantagem construtiva (Muniz, 2022).

### 2.3. Sistema Carbonato

O processo de precipitação de carbonato de cálcio ocorre devido a interação dos íons que formam o sistema carbonato. Esse sistema é composto por água, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), além dos íons cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) e hidroxila ( $\text{OH}^-$ ). A distribuição da concentração das espécies carbônicas, representa a capacidade da água dissolver ou precipitar o  $\text{CaCO}_3$  (Stumm & Morgan, 1996).

Segundo Weichers et al. (1975), para que ocorra a cristalização do carbonato de cálcio, deve ocorrer três equilíbrios químicos: equilíbrio das espécies carbônicas e água (Equações 1 a 4), equilíbrio dos pares-iônicos (Equações 5 a 7) e equilíbrio fase sólido-líquido (Equação 8). Portanto, o aumento das concentrações dos íons reagentes da equação 8, favorece a deposição/precipitação do carbonato de cálcio.





Geralmente, águas naturais apresentam pH com valores entre 6 e 8, o que indica que a espécie carbônica dominante é o bicarbonato, conforme o diagrama de espécies do sistema carbonato em função do pH (Richter, 2009). Ao se utilizar uma água dura com concentração elevada de íons cálcio, torna-se favorável a precipitação do  $\text{CaCO}_3$  se o pH for alcalino.

A formação de precipitados de carbonato de cálcio é fortemente influenciada pela temperatura (Rizk et al., 2017), já que aumentos na temperatura reduzem a solubilidade desse sal (Ghobadi Nia et al., 2010). Além disso, em sistemas de irrigação localizada, o aquecimento das tubulações e, conseqüentemente, da água, devido a incidência de radiação solar reduz a solubilidade do  $\text{CO}_2$ , provocando a liberação de gás carbônico para a atmosfera e o aumento do pH da água. O aumento do pH da água que contém íons cálcio e bicarbonato/carbonato favorece a formação de precipitados de carbonato de cálcio.

#### 2.4. Precipitação de $\text{CaCO}_3$

O processo de cristalização, também denominado de precipitação, apresenta as seguintes fases: supersaturação, nucleação, crescimento do cristal e aglomeração (Zhu et al., 2015). A nucleação é a formação de corpos cristalinos a partir de uma solução supersaturada, que por meio da atração íon-íon formam-se pequenos agregados chamados de “*clusters*” (De Yoreo et al., 2013).

Existem dois tipos de nucleação primária: a homogênea e a heterogênea. Na nucleação homogênea, ocorre formação de novos cristais apenas por colisão de partículas do soluto, originando os *clusters*, que são formados no “*bulk*” da solução. No processo de nucleação heterogênea, uma partícula estranha aos formadores do cristal está presente na solução, a qual pode se comportar como uma catalisadora ou inibidora no processo de cristalização dependendo da sua natureza. Conseqüentemente, a taxa de nucleação em sistemas heterogêneos necessita de um menor valor de supersaturação. Mullin (2001) ainda apresenta a nucleação secundária, a qual é induzida pela já existência de cristais na solução.

Há diferentes teorias sobre o crescimento dos cristais. Energia na superfície, camada de adsorção, difusão, cinemática, entre outras (Mullin, 2001). De acordo com o modelo proposto por Wolthers et al. (2012), a taxa de crescimento dos cristais é dependente da força iônica, pH, supersaturação e a razão entre os íons formadores do  $\text{CaCO}_3$ .

Para que ocorra a precipitação/cristalização do carbonato de cálcio, alguns parâmetros devem estar presentes na solução. A supersaturação do sistema com íons cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) é o principal fator. O pH supersaturação ( $\text{pH}_s$ ) pode ser calculado conforme as equações 9 a 11 (Ghobadi Nia et al., 2010; Zeppenfeld, 2010).

$$\text{pH}_s = \text{p}[\text{Ca}^{2+}] + \text{p}[\text{HCO}_3^-] + \text{pK}_{a2} - \text{pK}_{sp} - \log \gamma_{\text{Ca}^{2+}} - \log \gamma_{\text{HCO}_3^-} \quad (9)$$

$$-\log \gamma_i = \frac{0,51 z_i^2 I^{0,5}}{1 + I^{0,5}} \quad (10)$$

$$I = 0,013 \text{ CE} \quad (11)$$

Em que:  $\text{pH}_s$ - pH de saturação para o carbonato de cálcio;  $[\text{Ca}^{2+}]$  - concentração do íon cálcio;  $[\text{HCO}_3^-]$ - concentração do íon bicarbonato;  $\text{pK}_{a2}$  – constante de equilíbrio para a dissociação de bicarbonato;  $\text{pK}_{sp}$ -constante do produto de solubilidade para a dissociação de carbonato de cálcio;  $\gamma_i$ - coeficiente de atividade do íon  $i$ ;  $z_i$ - carga elétrica do íon  $i$ ;  $I$  – força iônica da solução ( $\text{mol L}^{-1}$ ); CE – condutividade elétrica da água ( $\text{dS m}^{-1}$ )

Os índices mais comuns para a avaliação do risco de precipitação do carbonato de cálcio são o Índice de Saturação de Langelier (ISL) e o Índice de Saturação de Ryznar (ISR), sendo o primeiro mais utilizado. Há ainda aplicativos computacionais, como o PHREEQC, que podem ser utilizados para estimar a formação de precipitados, sendo úteis para a definição de limites de qualidade de água aceitáveis para uso em irrigação (Rizk et al., 2017).

Para se determinar o ISL, deve-se conhecer algumas características da água, tais como o pH, a concentração de sólidos dissolvidos e/ou condutividade elétrica, alcalinidade total e a concentração de íons cálcio. O índice de saturação de Langelier é calculado pela Equação 12. Valores de ISL maiores do que zero, indicam que a água está saturada e há risco de precipitação do  $\text{CaCO}_3$ . Valores inferiores a zero, indicam que a água é corrosiva, ou seja, não oferece risco de precipitação do carbonato de cálcio.

$$\text{ISL} = \text{pH} - \text{pH}_s \quad (1)$$

2)

Em que: pH– pH atual da água;  $\text{pH}_s$  –pH de saturação da água em equilíbrio com o carbonato de cálcio.

Além da condição de supersaturação, o crescimento dos cristais depende das concentrações dos íons cálcio e bicarbonato, bem como a razão entre eles (Van Der Weijden & Van Der Weijden, 2014). Sob condições similares de supersaturação, Zeppenfeld (2010) concluiu que com o aumento da razão entre os íons bicarbonato e cálcio, há aumento na taxa de deposição dos cristais, reforçando que a supersaturação do sistema não é o único fator que rege a

precipitação do  $\text{CaCO}_3$ . Segundo Beck et al. (2013) para que a supersaturação do sistema seja mantida durante o processo de cristalização do  $\text{CaCO}_3$ , devem ser mantidos constantes os valores da alcalinidade total, a concentração das espécies de carbono, a concentração de cálcio e a força iônica da solução.

Em soluções em que há predominância do íon cálcio em relação as espécies carbônicas ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}^-$  e  $\text{CO}_2^{-3}$ ), na razão de 4:1, foi obtida a maior taxa de crescimento dos cristais, quando comparado as razões de 1:1 e 1:4. No entanto, quanto maior essa relação, menor é a taxa de nucleação (Gómez-Morales et al., 1996). Assim diferenças nas concentrações desses reagentes podem conferir ao sistema diferentes tempos de indução, ou seja, tempo para o aparecimento do primeiro precipitado, o que afeta as fases de nucleação e crescimento dos cristais.

Os dois processos, nucleação e crescimento dos cristais, consomem solutos da solução. No entanto, outros dois processos, não consomem os solutos e atuam no processo de cristalização, a aglomeração e quebra dos cristais. A aglomeração ocorre em condições de supersaturação e presenças de pequenos cristais ( $< 20\mu\text{m}$ ), em que a força de coesão é o processo responsável pela junção de dois ou mais cristais. A aglomeração dos cristais apresenta baixos valores no início de um processo de cristalização, devido principalmente a pequena quantidade de *clusters* na solução. Com o decorrer do tempo, esses *clusters* já se apresentam em maior quantidade e tamanho, o que facilita a taxa de aglomeração (Tai & Chen, 1995). A presença de agitação no sistema minimiza os efeitos de aglomeração, devido a quebra dos cristais, que ocorre principalmente pelo atrito com as paredes da superfície de contato onde se encontra a solução. Ainda segundo Tai & Chen (1995), a quebra dos cristais é significativa em condições de regime não estacionário, enquanto em condição de regime estacionário, a aglomeração torna-se mais efetiva.

Os cristais de carbonato de cálcio podem ser classificados quanto a mineralogia, morfologia e tamanho dos cristais. Esses fatores dependem exclusivamente do meio em que ocorre a reação, seja na presença de outros íons, minerais e atividade biológica (Durand et al., 2010). Os precipitados de  $\text{CaCO}_3$  são encontrados nas formas polimorfas e amorfos. Calcita, aragonita e vaterita são os tipos de cristais de  $\text{CaCO}_3$  nas fases polimorfas (Gutjahr et al., 1996; Kralj & Vdović, 2000; Beck et al., 2013), sendo que dentre esses cristais, a calcita é a fase mais estável termodinamicamente e conseqüentemente a mais encontrada em condições de superfícies. Como forma de identificar os precipitados de  $\text{CaCO}_3$  são utilizadas técnicas como a difração de raios-X e a espectroscopia por infravermelho (Li et al., 2014; Rizk et al., 2019).

## 2.5. Efeito de partículas minerais na precipitação do $\text{CaCO}_3$

A presença de partículas minerais no sistema, interfere de diferentes maneiras na precipitação do carbonato de cálcio. Por se tratar de um processo de nucleação heterogênea, a energia livre interfacial presente nas partículas rege a intensidade da nucleação, e consequentemente o crescimento dos cristais (Li et al., 2014). A energia interfacial é decorrente de diferenças de cargas elétricas na superfície dos materiais, ocorridas durante a substituição isomórfica ou polimerização dos minerais (Brigatti et al., 2013).

Segundo Fodor et al. (2020) os clusters se formam preferencialmente na solução, mesmo quando há a presença de partículas estranha. Quando essas partículas estranhas são compostas por argilas, após formados os *clusters*, a natureza da partícula interfere no fenômeno de adsorção.

De acordo com Kralj & Vdović (2000), devido as características morfológicas na presença de água, as argilas 1:1 e 2:1 apresentam comportamentos diferentes. A caulinita (1:1) não sofre expansão, enquanto a montmorilonita (2:1) pode expandir consideravelmente. Outro ponto importante, refere-se a superfície específica desses minerais. A montmorilonita apresenta valores em torno de  $600\text{-}800\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ , enquanto a caulinita apenas  $10\text{-}20\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ . Consequentemente, as argilas 2:1 apresentam maior capacidade de troca catiônica, o que favorece a adsorção de íons, principalmente entre as camadas tetraédricas.

A montmorilonita é mais eficaz no processo de captura dos clusters do precipitado de  $\text{CaCO}_3$  da solução, quando comparada à caulinita. Os clusters são atraídos e depositados entre as camadas da estrutura da argila, e não na superfície. Uma vez depositado, esses clusters favorecem o crescimento dos cristais, portanto, as argilas 2:1 promovem o processo de cristalização. No entanto, a presença do íon sódio em altas concentrações, inibe a deposição dos clusters nas camadas de argila, uma vez que sódio tem uma força de atração maior, fazendo com o que os clusters fiquem dispersos na solução (Fodor et al., 2020).

Liu et al., (2019) analisando o potencial de precipitação de dolomita em condições controladas, relataram que a caulinita, por apresentar carga negativa muito baixa, não expressou impactos positivos na cristalização. Resultados semelhantes foram observados por Kralj & Vdović (2000), no entanto, esses autores reiteram que a caulinita atuou como um inibidor do processo de precipitação.

Já na presença de quartzo, o principal constituinte das areias, Fernandez-Martinez et al. (2013) concluíram que o mineral favoreceu a precipitação do  $\text{CaCO}_3$ , pois apresentou uma redução de energia livre no sistema para o início da nucleação, quando comparado a uma

nucleação homogênea. Por outro lado, Kralj & Vdović (2000) não evidenciaram influência na cristalização do carbonato de cálcio na presença de quartzo.

Portanto, ainda há divergências quanto à atuação de partículas estranhas atuam na precipitação do carbonato de cálcio. Conforme apresentado, há estudos que indicam que a presença de partículas inibe a formação dos clusters, e conseqüentemente, diminui a formação dos cristais. Por outro lado, há evidências de que partículas estranhas em solução atuem como catalisadoras da precipitação. Dessa maneira, o estudo de fatores como concentração e natureza das partículas, supersaturação do sistema são fundamentais para uma análise bem fundamentada, para se definir o efeito de um mineral na precipitação do  $\text{CaCO}_3$ .

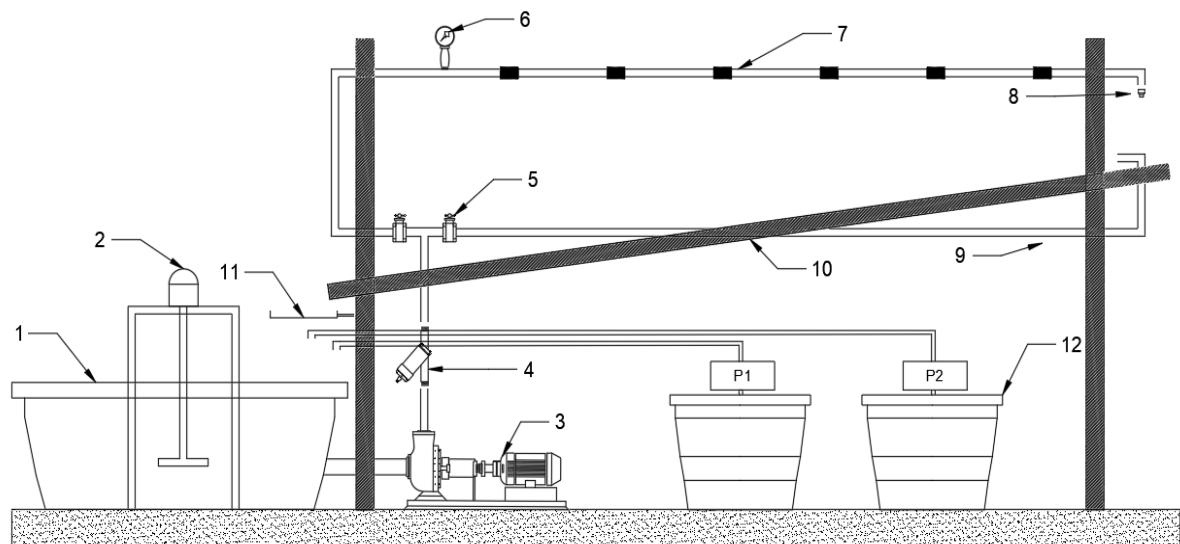


### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Ensaio de Material de Irrigação (LEMI) do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), no Laboratório de Hidráulica e Irrigação (LHI/FEAGRI/UNICAMP) e no campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP).

#### 3.1. Bancada para ensaios de gotejadores comerciais em laboratório

A bancada de ensaios caracterizou-se por um circuito hidráulico fechado, equipado com reservatório de 250L, motobomba com rotor e carcaça em inox, agitador com de hélice, linha de derivação com bifurcações simétricas, conjunto de coletores para medição da vazão dos emissores e calha para coleta e retorno da água para o reservatório (Figura 1). A estrutura da bancada foi a mesma utilizado nos ensaios realizados por (Lavanholi et al., 2018; Pereira et al., 2020), com adaptações que serão apresentadas no decorrer do documento. Bancadas similares foram montadas no LEMI e no LHI.



**Figura 1.** Bancada de ensaios de obstrução de gotejadores: 1- reservatório; 2- agitador; 3- motobomba; 4- filtro; 5- registro para retorno; 6- manômetro; 7- emissores; 8- bocal; 9- tubulação de retorno; 10- calha em declive; 11- peneira e 12- sistema de injeção de químicos.

O uso de motobomba com rotor e carcaça em inox é indispensável para estudos de obstrução, visto que experiências anteriores no laboratório indicaram significativa quantidade de



resíduos metálicos provenientes da oxidação e abrasão de componentes de bombas convencionais com rotor e carcaça de ferro.

A distribuição de vazão entre 8 linhas de fitas gotejadoras, instaladas paralelamente, foi realizada por meio de uma linha de derivação com bifurcações simétricas, sendo essa configuração essencial para que não haja tendências na distribuição de partículas entre as linhas laterais. Lavanholi (2016) comprovou que não houve diferença significativa na concentração de partículas entre linhas laterais alimentadas por linha de derivação com bifurcação simétrica. As linhas laterais apresentavam 5 m de comprimento.

O reservatório foi equipado com um agitador composto por hélice, motor elétrico e inversor de frequência, para garantir que as partículas permanecessem em suspensão. O reservatório de material plástico, com formato de tronco de cone, e a velocidade de rotação do agitador (135 rpm) são importantes para evitar a sedimentação de partículas no fundo do reservatório. Velocidades de rotação excessivas induzem a formação de vórtices que provocam entrada de ar na sucção da bomba.

As bancadas do LEMI e LHI eram equipadas com calhas de poliestireno alumínio composto (ACM), respectivamente, instaladas em declive, que garantia que a água escoada pelos gotejadores e pelos bocais nos finais de linha retornasse ao reservatório. A bancada do LHI era composta por um inversor de frequência, que controlava a pressão no início da linha (100 kPa), enquanto na bancada do LEMI, o ajuste de pressão era realizado por meio de registro de gaveta.

Os diâmetros de todos os segmentos de tubulação entre a bomba e a entrada das linhas laterais foram dimensionados a fim de proporcionar velocidades de escoamento acima de  $1 \text{ m s}^{-1}$ , visando assegurar que a velocidade da água proporcione uma força suficiente para carregar as partículas do reservatório até a entrada das linhas laterais.

O controle da velocidade de escoamento através de cada linha lateral foi feito acoplando-se um bocal no final da respectiva linha lateral, sendo esse um mecanismo eficaz que assegura adequado controle da velocidade na linha e distribuição homogênea de partículas entre as linhas laterais. Os bocais foram selecionados para propiciar uma velocidade de escoamento próxima a  $1 \text{ m s}^{-1}$  em cada linha lateral.

Nos ensaios com partículas sólidas utilizou-se filtro de tela com aberturas de  $125 \mu\text{m}$ , capaz de reter partículas de diâmetro imediatamente superior àquele adotado nas condições de ensaio. Entre o final da calha e o reservatório havia também uma peneira granulométrica de mesma abertura. O filtro e a peneira são essenciais para reter partículas maiores que aquelas pertencentes à condição de ensaio, sendo que tais contaminantes atingem a bancada de ensaios

acidentalmente. Nos ensaios com carbonato de cálcio, o filtro de tela foi removido, devido à ligeira obstrução por precipitados.

Para os ensaios envolvendo o carbonato de cálcio foi elaborado um sistema de injeção contínua, controlado eletronicamente via Arduino®. As soluções concentradas dos reagentes químicos necessários para a precipitação do carbonato de cálcio (cloreto de cálcio e bicarbonato de sódio) eram armazenadas em reservatórios de 20L, e adicionadas ao reservatório de 200L por duas bombas peristálticas.

### 3.2. Material avaliado

Foram avaliados simultaneamente oito modelos comerciais de tubogotejadores com vazão inferior à 2 L h<sup>-1</sup>. Em relação as características construtivas (Figura 2), os emissores são distribuídos entre o tipo pastilha e cilíndrico, autocompensante e não autocompensante, anti sifão e com espaçamento entre emissores inferior à 0,55 m (Tabela 1). Na Tabela 2 são descritos os principais parâmetros construtivos dos emissores: dimensões do labirinto e características do pré-filtro.

**Tabela 1.** Parâmetros hidráulicos dos emissores

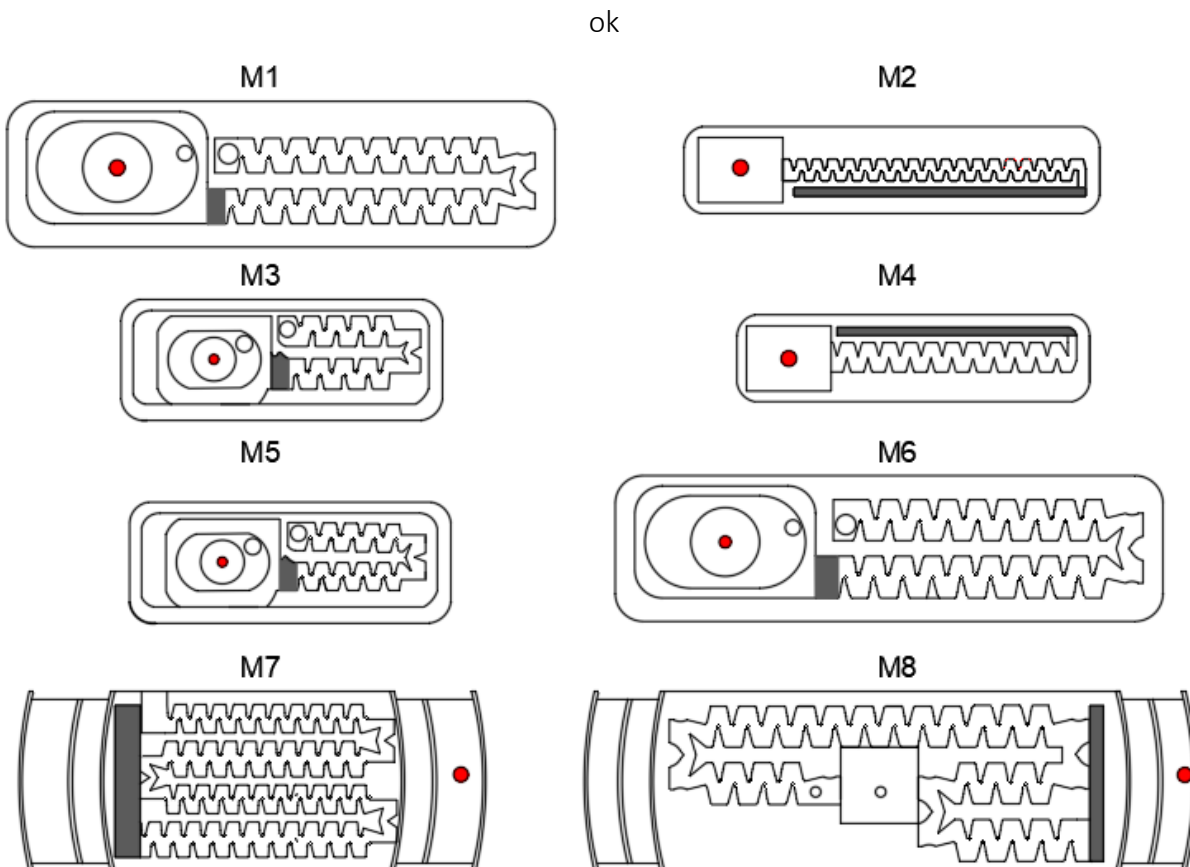
Modelo	Tipo	Vazão nominal à 98,1kPa (L h <sup>-1</sup> )	CVf (%)
M1	PC - Plano	1,1	6,18
M2	NPC - Plano	0,55	2,04
M3	PC/AS - Plano	1,6	1,90
M4	NPC - Plano	1,6	1,24
M5	PC/AS - Plano	1,0	2,22
M6	PC/AS - Plano	1,6	2,69
M7	NPC - Cilíndrico	1,0	3,40
M8	PC- Cilíndrico	1,8	3,39

Nota: PC = auto-compensante; NPC = não auto-compensante; AS = Anti-sifão; CVf – coeficiente de variação de fabricação.

**Tabela 2.** Dimensões do pré-filtro e labirinto dos emissores

Emissor	Pré-filtro		Labirinto				
	Dimensões (mm)	Área total (mm <sup>2</sup> )	W (mm)	D (mm)	A mm <sup>2</sup>	H mm	L mm
M1	0,55 x 2,20	3,12	0,73	0,70	0,511	1,20	70,4
M2	0,30 x 0,54	2,75	0,46	0,42	0,193	0,79	37,5
M3	0,30 x 0,90	2,50	0,72	0,72	0,518	1,06	30,6
M4	0,30 x 0,45	3,51	0,56	0,52	0,291	1,00	31,3
M5	0,30 x 0,90	2,50	0,60	0,45	0,270	0,95	30,6
M6	0,55 x 2,20	3,12	0,86	0,90	0,774	1,43	74,5
M7	0,40 x 1,80	14,4	0,53	1,20	0,636	1,07	128,4
M8	0,42 x 0,80	14,1	0,86	1,15	0,989	1,40	112,0

Nota: W- largura; D -profundidade; A -seção de escoamento; H- altura do defletor; L – comprimento.



Nota: em cinza entrada do emissor e em vermelho saída de água do emissor.

**Figura 2.** Design dos emissores avaliados

### 3.3. Qualidade da água de ensaio em condições controladas

A água utilizada nos ensaios em laboratório era oriunda de um sistema de osmose reversa, como forma de garantir padrão nas características em todos os tratamentos. A osmose reversa é composta por uma sequência dos seguintes filtros: polipropileno (5  $\mu\text{m}$ ), carvão ativado, plissado (1  $\mu\text{m}$ ), osmose reversa e por fim, resina mista. Na saída desse sistema, a água apresentava valores de condutividade elétrica em torno de 10  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

Nos ensaios com apenas partículas sólidas (PS) foram monitorados os parâmetros de pH e condutividade elétrica da água (CE). Para evitar a ação de agentes químicos e biológicos, buscou-se manter o pH entre 5 e 7, por meio da adição de HCl (1  $\text{mol L}^{-1}$ ), além da adição diária de hipoclorito de sódio (NaClO), objetivando uma concentração de 3  $\text{mg L}^{-1}$  de cloro livre no reservatório de ensaio.

Nos ensaios com carbonato de cálcio, além do pH e condutividade elétrica da água, foram realizadas as seguintes análises físico-químicas a cada hora de ensaio: alcalinidade total, dureza, cálcio, bicarbonato e carbonato. Determinou-se, ainda, a concentração de sólidos suspensos totais (SST) a cada 40 horas de operação nos ensaios com carbonato de cálcio e nos ensaios de interação. Todas as análises foram realizadas de acordo com o *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2017).

### 3.4. Ensaios de obstrução em laboratório

Os ensaios de obstrução em condições controladas foram divididos em três fases (1) obstrução causada por partículas sólidas; (2) obstrução causada por carbonato de cálcio e (3) interação entre partículas sólidas e carbonato de cálcio. Dentro de cada fase, foram executados diferentes tratamentos que serão detalhados no decorrer deste documento.

#### 3.4.1. Ensaios de obstrução com partículas sólidas

A filtragem mínima normalmente recomendada por fabricantes de gotejadores é de 120 mesh, que equivale à retenção de partículas de granulometria superior a 125  $\mu\text{m}$ . Dessa forma, para o estudo dos processos de obstrução analisando os gotejadores comerciais foi utilizada uma faixa granulométrica única de partículas com tamanho entre 0 e 125  $\mu\text{m}$ .

Os ensaios de obstrução foram realizados em ciclos de 12 horas, com 10 horas operando e 2 horas em repouso. Cada condição de ensaio durou 20 ciclos, totalizando 200 horas

de operação (10 dias). Esse tempo de ensaio é interessante pois já indica o desempenho dos emissores perante a obstrução, e viabiliza rotinas laboratoriais (Pereira et al., 2020).

Duas concentrações de partículas foram avaliadas: 125 mg L<sup>-1</sup> e 500 mg L<sup>-1</sup>. A concentração menor já representa uma condição severa de risco de obstrução (Nakayama & Bucks, 1991), enquanto a concentração de 500 mg L<sup>-1</sup> tem como objetivo submeter o gotejador a uma condição de operação extrema. Os ensaios foram realizados em triplicatas.

O conjunto de partículas utilizadas nos ensaios foi preparado seguindo uma mistura de argila, silte e areia, oriundas de um solo natural presente na ESALQ. Esse solo apresentava 60,6% de argila, 12,5% de silte e 26,9% de areia, e densidade de partículas de 2,6 g cm<sup>-3</sup>.

As frações menores que 45 µm foram obtidas seguindo requisitos de preparação estabelecidos pela norma ISO 11277 (2009), a partir de solo natural, passando por processos de destruição da matéria orgânica, eliminação dos sais, dispersão e separação das faixas granulométricas do solo. Para as demais frações, foi utilizada areia de construção, o que facilita o processo de obtenção de partículas. Esse material foi selecionado pois apresenta características físicas semelhantes às partículas do solo, com ângulos menos acentuados. Após processo de lavagem e peneiração, a amostra era levada para mufla, em temperatura à 550 °C, para destruição de possíveis resquícios de material orgânico (Lavanholi, 2019).

Após o preparo das partículas sólidas, a quantidade de partículas de cada peneira a ser adicionada em cada tratamento no reservatório, foi proporcional aos limites superior e inferior do conjunto de peneiras (Tabela 3).

**Tabela 3.** Peneiras utilizadas para separação e quantidade de partícula a serem adicionadas ao reservatório

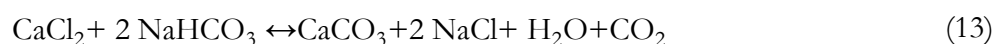
Malha da peneira (ASTM)	Intervalo de diâmetro de partículas retidas por cada peneira (µm)	Contribuição do intervalo na faixa granulométrica (%)	Quantidade necessária para cada tratamento (g)	
			(125 mg L <sup>-1</sup> )	(500 mg L <sup>-1</sup> )
140	106 ≤ int ≤ 125	15,20	11,25	19,00
170	90 ≤ int ≤ 106	12,80	2,00	8,00
200	75 ≤ int ≤ 90	12,00	2,50	10,00
230	63 ≤ int ≤ 75	9,60	3,00	12,00
270	53 ≤ int ≤ 63	8,00	3,75	15,00
325	45 ≤ int ≤ 53	6,40	4,00	16,00
Fundo	0 ≤ int ≤ 45	36,00	4,75	45,00

### 3.4.2. Ensaio de obstrução com carbonato de cálcio

Estabeleceu-se que o valor de dureza da água seria mantido em  $200 \pm 50 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ , valor que oferece risco moderado de obstrução de emissores (Nakayama & Bucks, 1991; Goyal et al., 2016). Águas com dureza de  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ , embora sejam classificadas como moderadas em relação ao risco de precipitação do  $\text{CaCO}_3$ , são consideradas satisfatórias para a realização de ensaios em escala de bancada, uma vez que tal dureza combinada com  $\text{pH} \geq 8$  caracteriza uma condição de supersaturação, facilitando a precipitação e incrustação do  $\text{CaCO}_3$  ( $\text{ISL} \geq 0$  em tais condições).

Valores de dureza acima de  $300 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ , que caracteriza risco severo de obstrução de emissores, não são viáveis para serem estudados em laboratório utilizando-se água sintética, uma vez que a quantidade de produtos requeridos para a realização desses ensaios aumentaria demasiadamente, elevando os custos com reagentes químicos (isso foi comprovado em ensaios preliminares).

Reagentes de pureza analítica (cloreto de cálcio dihidratado e bicarbonato de sódio) foram utilizados no preparo da água com elevada dureza. Partindo-se de cálculos estequiométricos considerando a reação de precipitação do  $\text{CaCO}_3$  (Equação 13), foram obtidas as massas de cada reagente para a obtenção de água com  $200 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ . A massa de cada reagente, calculada em função do volume de água presente no reservatório, era pesada em balança analítica, dissolvida em água deionizada e adicionada no tanque.



Ensaio preliminares evidenciaram decaimento significativo do valor de dureza da água ao longo dos ensaios, sendo necessário um sistema de injeção contínua dos reagentes para manter constante as concentrações iônicas das espécies de interesse. A recirculação contínua da água utilizada nos ensaios, assim como as características construtivas da bancada, promove a saída de  $\text{CO}_2$  da água, favorecendo aumento de  $\text{pH}$  e a precipitação de  $\text{CaCO}_3$ . Além dos fatores supracitados, quando se inicia a fase de nucleação, há o consumo dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$  devido a formação dos cristais de  $\text{CaCO}_3$ , diminuindo a concentração dos reagentes na água.

Devido ao decaimento da dureza observado, ocasionado principalmente pela precipitação do  $\text{CaCO}_3$ , para manter a dureza em níveis próximos ao estabelecido ( $200 \pm 50 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ ), duas bombas peristálticas com vazão de injeção ajustável eletronicamente via Arduino® foram adicionadas ao sistema, promovendo injeção contínua dos reagentes. As soluções dos reagentes foram preparadas em altas concentrações,  $\text{NaHCO}_3$  ( $0,53 \text{ mol L}^{-1}$ ) e  $\text{CaCl}_2$

(0,34 mol L<sup>-1</sup>), respeitando os limites de solubilidade dos reagentes. A vazão de injeção de cada uma das soluções era ajustada com base na taxa de decaimento da dureza. A cada 1h de ensaio, eram realizadas determinação de dureza e alcalinidade, por titulação, para confirmar a estabilidade das condições de ensaio, além das medições de pH e condutividade elétrica da água.

Nos ensaios com o carbonato de cálcio, foram consideradas 200 horas de funcionamento do sistema, com ciclos de operação de 10 horas, totalizando 20 dias de ensaio.

### **3.4.3. Ensaios avaliando interações entre partículas sólidas e carbonato de cálcio**

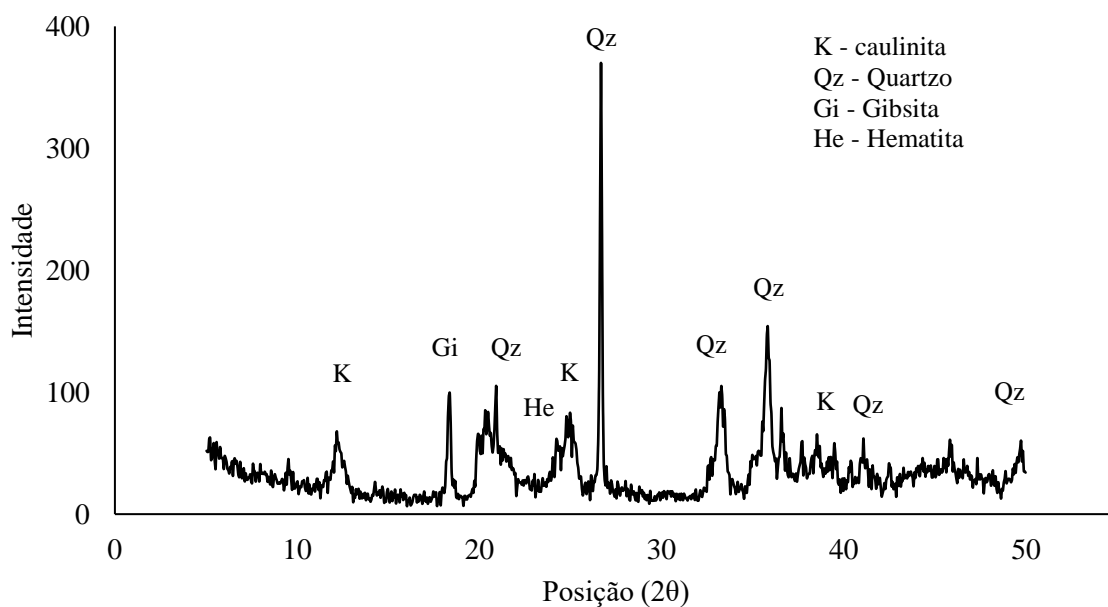
Nessa etapa foi avaliada a seguinte condição: 125 mg L<sup>-1</sup> de partículas sólidas, em água com dureza de 200 ± 50 mg L<sup>-1</sup> em CaCO<sub>3</sub>. O tempo de ensaio foi de 200 horas, com tempo de operação diário de 10 horas. O controle da dureza da água foi realizado conforme apresentado nos ensaios apenas com carbonato de cálcio.

As partículas sólidas utilizadas nesse ensaio foram oriundas de um solo presente no campo experimental da FEAGRI. Esse solo passou apenas pelos processos de secagem ao ar, destorroamento e peneiramento. Optou-se por não passar esse solo pelo procedimento indicado pela ISO 11227 (2009), pois se desejou manter as características químicas desse solo.

As partículas sólidas foram caracterizadas em relação às principais características químicas de interesse (Tabela 4) e, difração de raios-X foi empregada para identificação das frações minerais constituintes. Um difratômetro de raios-x X'Pert-MPD (Philips Analytical X Ray) foi utilizado nas seguintes configurações: radiação K $\alpha$ Cu = 1,54Å, (40 kV, 40 mA), com  $\theta$  variando de 0-50, passo angular de 0,020° e tempo de contagem de 1s por passo. A análise de DRX (Figura 3) revelou as seguintes frações minerais: caulinita (35,6%), quartzo (22,5%), hematita (22,2%), gipsita (19,8%) e goethita (0,5%), o que representa quase 80% das partículas predominantemente, argilas do tipo 1:1, cujas cargas superficiais no valor de pH das condições de ensaio são, predominantemente, negativas.

**Tabela 4.** Parâmetros físicos e químicos do solo

Parâmetros	Unidade	Método	Valores
Argila			580,0
Silte	g. kg <sup>-1</sup>	ISO 11227	280,0
Areia			320,0
Matéria orgânica	g. dm <sup>3</sup>	Colorimétrico	5,0
H <sup>+</sup> +Al	mmol.dm <sup>3</sup>	Tampão SMP	13,0
Fósforo	mmol.dm <sup>3</sup>	Resina	5,0
Potássio	mmol.dm <sup>3</sup>	Resina	0,4
Cálcio	mmol.dm <sup>3</sup>	Resina	9,0
Magnésio	mmol.dm <sup>3</sup>	Resina	3,0
Soma das bases	mmol.dm <sup>3</sup>	Calculado	12,7
Saturação das bases (V)	%	Calculado	49,0
CTC	mmol.dm <sup>3</sup>	Calculado	25,7
Boro	mg.dm <sup>3</sup>	Água quente	0,2
Sódio	mmol.dm <sup>3</sup>	Acetato de amônio pH 7,0	0,3
Cobre	mg.dm <sup>3</sup>	DTPA	1,1
Ferro	mg.dm <sup>3</sup>	DTPA	3,0
Manganês	mg.dm <sup>3</sup>	DTPA	2,6
Zinco	mg.dm <sup>3</sup>	DTPA	0,3

**Figura 3.** Difratoograma do solo



### 3.4.4. Avaliação do desempenho dos gotejadores

A análise da sensibilidade à obstrução dos emissores foi avaliada com base em dois aspectos principais: (1) quantitativo: avaliando a razão entre a vazão atual e vazão inicial de cada emissor e, (2) qualitativo: identificação da causa de obstrução e zonas críticas de acúmulo de sedimentos/precipitados no interior do labirinto, por meio de imagens obtidas no final de cada ensaio.

Quantitativamente, a cada 40 horas de ensaio, foi mensurada a vazão dos emissores por determinações de massa (Equação 14), com um tempo de coleta de 15 minutos e massa específica da água corrigida pela Equação 15 (Tanaka et al., 2001).

$$q = \frac{(m_F - m_I)}{\rho t} 3600 \quad (14)$$

$$\rho = 999,974950 \left[ 1 - \frac{(T - 3,983035)^2 (T + 301,797)}{522528,9 (T + 69,34881)} \right] \quad (15)$$

em que:  $q$ - vazão ( $L h^{-1}$ );  $t$ - tempo de coleta (s);  $m_F$ - massa do coletor + água (g);  $m_I$ - massa do coletor (g);  $\rho$ - massa específica da água ( $kg m^{-3}$ ); e,  $T$ - temperatura da água ( $^{\circ}C$ ).

De acordo com a Equação 16, os modelos que apresentaram valor de  $O_j$  inferior a 75% foram considerados como obstruídos (Wei et al., 2008; Zhang et al., 2017). Após o término dos ensaios, os dados foram plotados em gráficos contendo  $O_j$  em função do tempo de ensaio. Dessa forma, será possível verificar o desempenho dos emissores e identificar a sensibilidade de cada modelo à obstrução.

$$O_j = 100 \frac{q_{a_j}}{q_{0_j}} \quad (16)$$

em que:  $O_j$  – razão entre a vazão atual e a vazão inicial do emissor  $j$  (%);  $q_{a_j}$  – vazão atual do emissor  $j$  ( $L h^{-1}$ ); e  $q_{0_j}$  – vazão inicial do emissor  $j$ , operando sob dada pressão de operação e com água limpa ( $L h^{-1}$ ).

Qualitativamente, os emissores obstruídos foram abertos cuidadosamente para identificação da causa/processo de obstrução. Foram obtidas imagens em um microscópio Mitutoyo TM equipado com uma câmera digital de alta resolução (1080p/2M).

Nos ensaios envolvendo carbonato de cálcio, após a aquisição de imagens, o material depositado no interior do labirinto dos emissores foi recolhido para obtenção de imagens em microscópio eletrônico de varredura (MEV), a fim de verificar mudanças no comportamento morfológico do  $CaCO_3$  atuando de forma individual e na presença de partículas sólidas. O material particulado foi espalhado em um stub de metal e, em seguida, as amostras foram

metalizadas com Au(s) e analisadas através de um microscópio eletrônico de varredura (JEOL SM-5800LV) com um sistema de captura de imagem (SemAfore 5.21), operando a 15kV. A determinação das fases cristalinas do precipitado foi obtida a partir de dados de difração de raios-x com refinamento pelo método de Rietveld. Os difratômetros foram registrados com  $\theta$  variando de 5-70, passo angular de  $^{\circ}2\theta$ , tempo de contagem de 0,5 s por passo e no intervalo de radiação  $K\alpha\text{Cu} = 1,5406\text{\AA}$ , (40 kV, 45 mA).

### 3.5. Experimentos de obstrução em campo experimental

Os ensaios foram conduzidos no campo experimental da FEAGRI/UNICAMP utilizando água superficial proveniente de um lago local com volume de aproximadamente 2500 m<sup>3</sup>. O lago é abastecido por uma pequena represa, na qual ocorre a contribuição hídrica de nascentes próximas. Foram realizadas análises da qualidade da água ao longo dos ensaios, e os resultados são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5.** Parâmetros da qualidade da água do lago utilizado nos ensaios de campo

Parâmetros	Unidade	Média	Risco
Alcalinidade Total	mg/L	26,18	
Bicarbonato (como CaCO <sub>3</sub> )	mg/L	26,10	
Carbonato (como CaCO <sub>3</sub> )	mg/L	1,00	
Cloreto	mg/L	6,28	
Condutividade elétrica da água	$\mu\text{S/cm}$	85,08	Baixo <sup>2</sup>
Contagem Padrão de Bactérias Heterotróficas	UFC/mL	1432,00	Baixo <sup>1</sup>
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	mg/L	14,62	
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg/L	184,60	
Dureza Total	mg/L	23,08	Baixo <sup>3</sup>
Ferro Total	mg/L	1,44	Moderado <sup>1</sup>
Magnésio	mg/L	2,98	
Manganês	mg/L	0,06	Baixo <sup>1</sup>
pH (a 25°C)		8,51	Severo <sup>1</sup>
Sódio	mg/L	3,73	
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	85,80	Moderado <sup>1</sup>
Sulfeto de Hidrogênio	mg/L	0,05	Baixo <sup>1</sup>

Nota: \* Bucks et al., (1979); \*\* Capra & Scicolone (1998); \*\*\* Goyal et al., (2016)

Foram conduzidos experimentos avaliando três tratamentos (T1- água de superfície; T2- água de superfície + partículas sólidas suspensas; T3- água de superfície+ CaCO<sub>3</sub>), sendo que em cada tratamento os 8 modelos de tubogotejadores listados na Tabela 1 foram avaliados. No tratamento T1 os modelos de gotejadores foram submetidos a operação utilizando-se apenas

água proveniente do lago, não sendo realizada alteração na mesma. Nesse tratamento foi realizado apenas a filtragem da água, utilizando-se um filtro de disco de 120 mesh de abertura.

Para o tratamento T2, em um reservatório adicional foi preparada uma mistura concentrada de água + partículas sólidas (aproximadamente  $6 \text{ g L}^{-1}$ ). As partículas utilizadas nesse ensaio foram de origem industrial (sílica moída e areia), sendo que essas partículas foram peneiradas para obtenção de granulometria inferior à  $125 \mu\text{m}$ . Para manter a mistura em suspensão, um agitador mecânico foi utilizado no reservatório contendo a mistura concentrada. Essa mistura foi injetada na linha de derivação do respectivo tratamento utilizando um injetor venturi. Por meio da diferença de pressão no injetor venturi (Irritec®), uma vazão de injeção em torno de  $65 \text{ L h}^{-1}$  foi ajustada para que fosse obtida uma injeção de  $115 \text{ mg L}^{-1}$  de partículas sólidas suspensas. Portanto, o T2 operava em uma concentração de partículas em torno de  $200 \text{ mg L}^{-1}$ , pois a água do lago já apresentava valores de sólidos suspensos próximos de  $85 \text{ mg L}^{-1}$  (Tabela 5).

Para o tratamento T3, a água do lago foi enriquecida a fim de obter dureza de  $200 \pm 50 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$ . Para isso, as concentrações das espécies carbonato e cálcio foram controladas por meio da injeção de solução de bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ) e nitrato de cálcio ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) na água. As soluções dos reagentes foram armazenadas em um reservatório e um sistema de injeção individual por meio de bomba dosadoras (Kobra Tech ®), permitiu a injeção dos químicos na linha de derivação correspondente ao tratamento. A opção pelo uso do  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  nos ensaios de campo deve-se ao menor custo deste produto e ao fato de que este já é um fertilizantes de uso comum em fertirrigação.

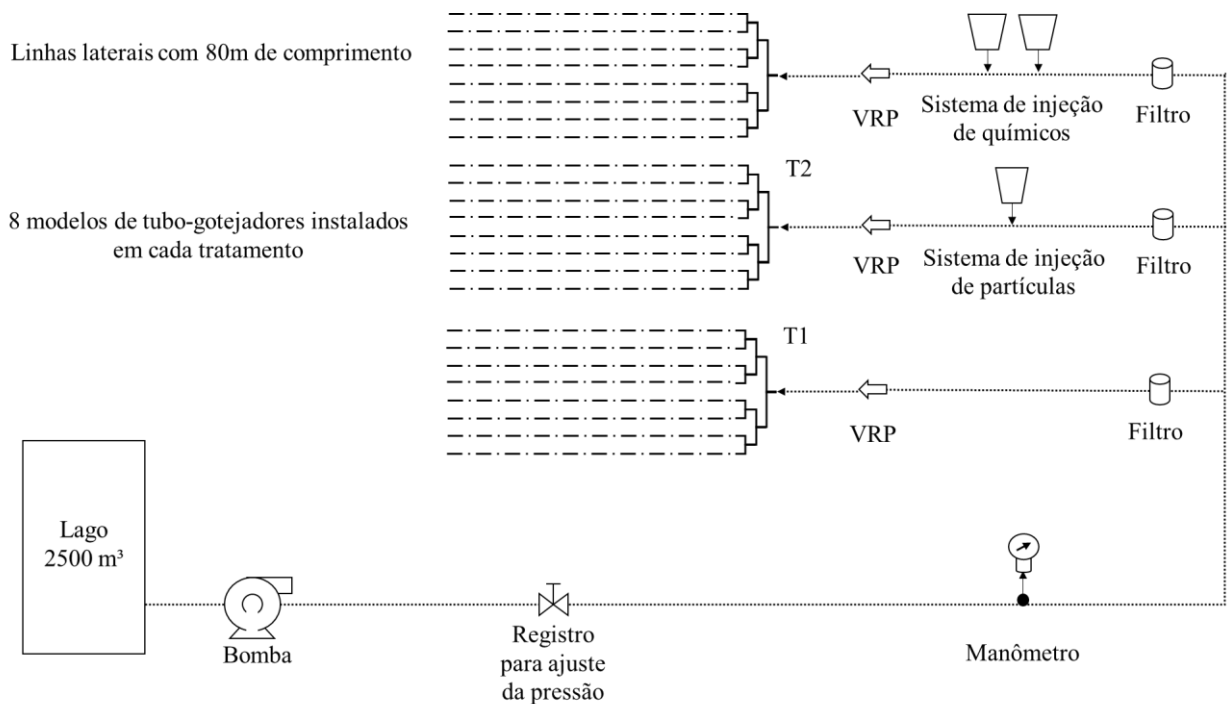
Os experimentos foram conduzidos em estrutura ilustrada na Figura 4. Na linha principal de distribuição de água foi instalado um filtro de disco de 120 mesh para reter eventuais partículas/contaminantes com granulometria superior a  $125 \mu\text{m}$ , seguindo recomendações mínimas do fabricante dos gotejadores. Na entrada das linhas de derivação foram instaladas válvulas reguladoras de pressão (VRP) de 15 PSI, para manter a pressão constante em valores próximos de  $100 \text{ kPa}$  na entrada das laterais. Cada tratamento era composto por uma linha de derivação com bifurcações simétricas que alimentava 8 linhas laterais de aproximadamente  $80 \text{ m}$  de comprimento. Cada linha lateral correspondia a um dos modelos de gotejador descritos na Tabela 1.

O sistema de irrigação operou 2 horas por dia, durante 100 dias, totalizando 200 horas de operação. A cada 20 horas foi realizada medição de vazão na entrada de cada uma das linhas laterais utilizando medidor de vazão portátil. Em condições nas quais a pressão na entrada da linha lateral é mantida constante, Camargo et al. (2014) demonstraram que é possível quantificar a

evolução da obstrução em linhas laterais realizando apenas a medição de vazão na entrada da lateral.

Além disso, a cada 40 horas de operação foi realizado um ensaio de uniformidade estatístico em campo, no qual foi determinada a vazão de um conjunto de 12 gotejadores de cada linha lateral. As determinações foram realizadas sistematicamente, em grupos de 3 gotejadores localizados no início, a 1/3, a 2/3 e no fim de cada linha lateral.

Ao final dos ensaios, os gotejadores obstruídos foram identificados a fim de diagnosticar as causas de obstrução. Amostras do material depositado no interior das linhas laterais (partículas sólidas, precipitados, biofilme, etc) foram coletados para caracterização por difratometria de raio X e microscopia eletrônica de varredura (MEV).



**Figura 4.** Esquema básico da estrutura para condução de experimentos em campo

### 3.6. Análise de desempenho dos ensaios em laboratório e em campo

A avaliação do desempenho dos ensaios realizados em laboratório e em campo foi realizada por meio de métricas de classificação. Em cada um dos ensaios, cada modelo de emissor foi classificado de modo binário (R - resistente ou S - sensível à obstrução). Para os ensaios em laboratório, os modelos de emissor que apresentaram valor de  $O_j < 75\%$  foram classificados como sensíveis à obstrução (S), sendo que os demais foram classificados como resistentes (R).

Para os ensaios em campo baseados na medição de vazão na entrada da lateral, os emissores foram classificados como sensíveis à obstrução quando a vazão na entrada da lateral sofreu redução maior do que 10% em relação a vazão determinada no início do estudo, quando os emissores estavam novos. O limiar de 10%, embora questionável, é baseado no critério usual de dimensionamento hidráulico de subunidades de irrigação, no qual a variação de vazão dos emissores na subunidade ( $q_{var}$ ) não deve superar 10%. Para as condições de campo envolvendo ensaios de uniformidade de vazão dos emissores e determinação de CUE, modelos com CUE < 70% apresentam desempenho insatisfatório e foram classificados como sensíveis a obstrução.

Para o cálculo das métricas de classificação utilizando a metodologia descrita na sequência, foi necessário assumir uma determinada condição de operação como condição de referência para comparação com as demais condições. A partir de cada ensaio de referência, os resultados R e S foram confrontados e se efetuou contagem de: VP – Verdadeiro Positivo (condição de referência = R e condição analisada = R); VN – Verdadeiro Negativo (condição de referência = S e condição analisada = S); FP – Falso Positivo (condição de referência = S e condição analisada = R); e, FN – Falso Negativo (condição de referência = R e condição analisada = S).

Como avaliação entre os ensaios (campo e laboratório) e entre critérios no campo (vazão na entrada da lateral e CUE) foi realizado um comparativo dos resultados através do F1\_score, e Erro total, sendo as equações 17 a 20 apresentadas abaixo:

$$\text{Erro total} = \frac{\text{FP} + \text{FN}}{\text{VP} + \text{VN} + \text{FP} + \text{FN}} \quad (17)$$

$$\text{Precisão} = \frac{\text{VP}}{\text{VP} + \text{FP}} \quad (18)$$

$$\text{Sensibilidade} = \frac{\text{VP}}{\text{VP} + \text{FN}} \quad (19)$$

$$\text{F1\_score} = \frac{2 \cdot \text{VP}}{2 \cdot \text{VP} + \text{FP} + \text{FN}} \quad (20)$$

O Erro total apresenta uma proporção de avaliações incorretas em relação ao total avaliado. Quanto menor o valor do Erro total, mais a condição analisada se aproxima da condição de referência. A métrica F1\_score é definida com a média harmônica entre precisão e sensibilidade, mensurando a performance do modelo/referência. O valor do F1\_score varia de 0 a 1, sendo que valores próximos a 1 indicam semelhança e os valores próximos a zero indicam baixa correlação (Rosa et al., 2020). Os valores de Erro total e F1\_score foram utilizados para

indicar qual das condições de ensaio em laboratório melhor representou o desempenho dos emissores em condições diversas de operação em campo.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

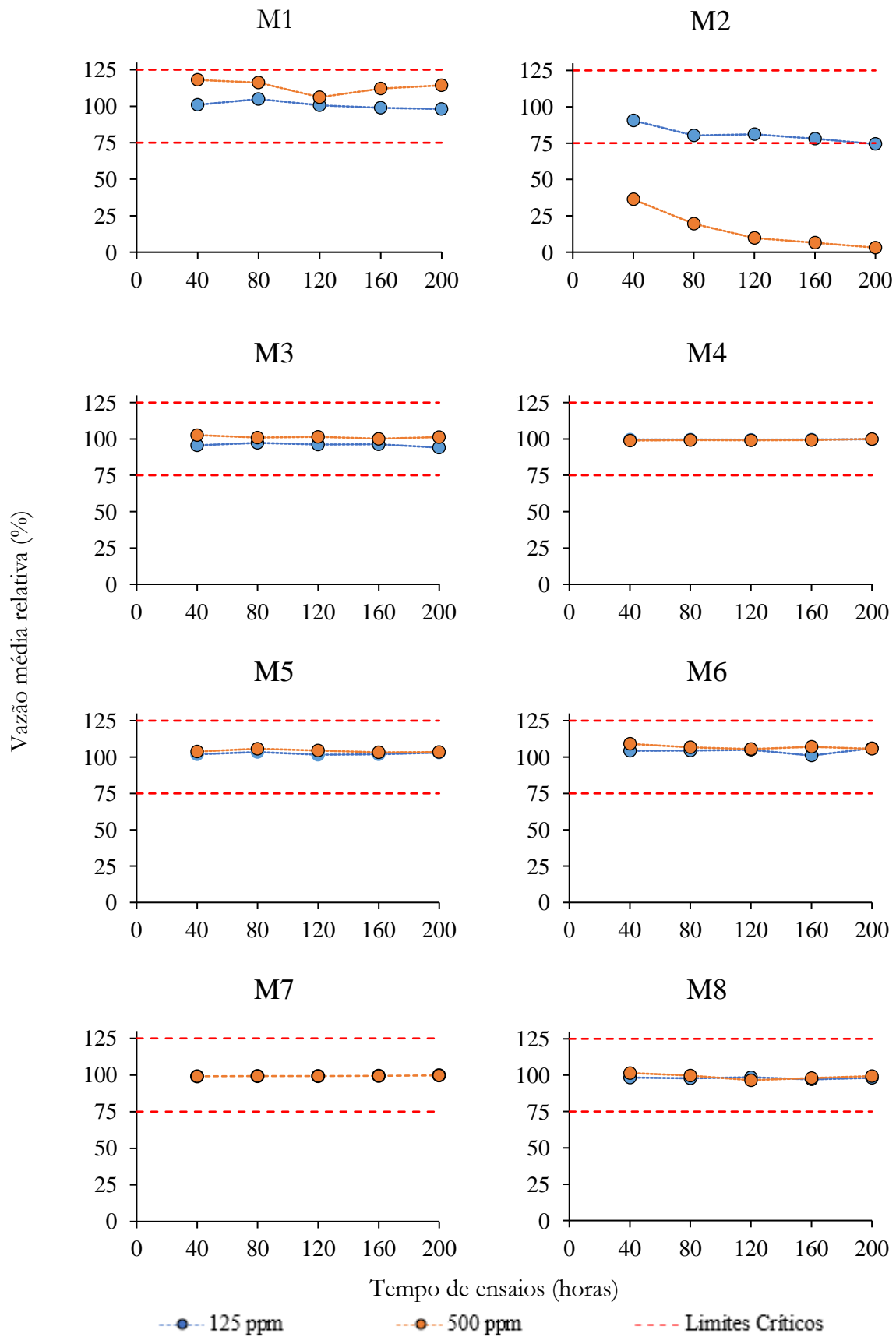
### 4.1. Ensaios de obstrução com partículas sólidas em laboratório

Nesses ensaios foi observado que para os modelos mais sensíveis à obstrução (modelos M1 e M2), o aumento da concentração de partículas de  $125 \text{ mg L}^{-1}$  para  $500 \text{ mg L}^{-1}$  provocou aumento na severidade da obstrução. Os demais modelos avaliados apresentaram-se resistentes à obstrução e não sofreram alterações significativas de vazão ao longo dos experimentos, independente da concentração de partículas no sistema (Figura 5).

Considerando o modelo M1, na maior concentração ( $500 \text{ mg L}^{-1}$ ) foi observado um aumento de ocorrências de variação de vazão, quando comparada a menor concentração avaliada. Nesse modelo foram observados apenas fenômenos de obstrução parcial nos gotejadores (variação de vazão maior do que 25% da vazão inicial). A vazão média relativa ao final do ensaio, para as concentrações de  $125 \text{ mg L}^{-1}$  para  $500 \text{ mg L}^{-1}$ , foi de 99,1% e 114,2%, respectivamente. Aparentemente, o aumento da concentração de partículas, afetou o funcionamento da membrana reguladora de vazão dos emissores, pois houve maior depósito de material sólido no entorno da membrana, quando comparado a menor concentração de partículas (Figura 6C). Para o modelo M2, emissor convencional do tipo pastilha, no final do ensaio na concentração de  $125 \text{ mg L}^{-1}$ , observou-se a vazão relativa média próxima ao limite crítico inferior (LCI), enquanto na concentração de  $500 \text{ mg L}^{-1}$ , todos os emissores foram obstruídos (Figura 5).

Os demais modelos avaliados não sofreram alterações expressivas em suas vazões, independentemente da concentração de partículas avaliadas. Para os modelos M3, M5, M6 e M8 que são autocompensantes, observou-se que apesar de ocorrer deposição de material ao longo da membrana reguladora de pressão (Figura 6D), não houve alterações expressivas na vazão e no funcionamento do emissor (Figura 5).



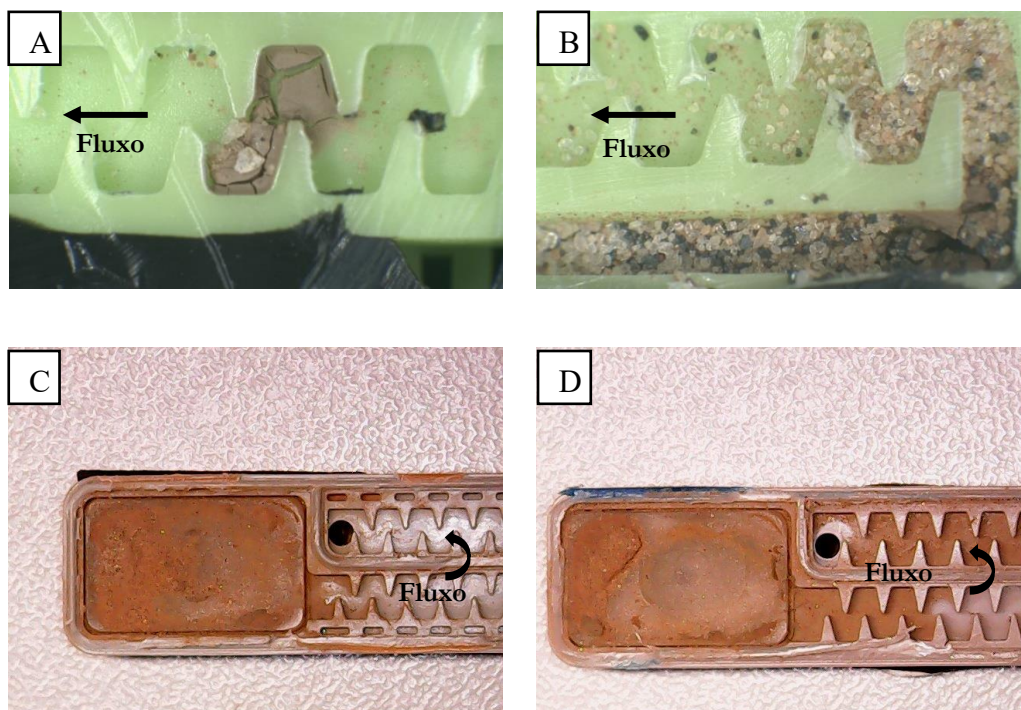


**Figura 5.** Vazão média relativa para os modelos avaliados na presença de partículas sólidas

Uma vez que nesses ensaios havia controle dos agentes químicos e biológicos na água, apenas obstruções causadas por partículas sólidas foram observadas. Todos os emissores do modelo M2 obstruíram na concentração de  $500 \text{ mg L}^{-1}$ , principalmente devido ao acúmulo de partículas no interior do labirinto (Figura 6). Foi observado a deposição de partículas de maior dimensão, que provavelmente se depositaram primeiro, e alteraram as condições de escoamento no labirinto, promovendo a deposição das partículas finas (Lavanholi, 2019) e, obstruindo por completo o labirinto (Figura 6A e 6B). Considerando o diagnóstico realizado, possivelmente a obstrução desse modelo de gotejador seria evitada empregando-se elemento filtrante capaz de reter partículas mais finas do que  $125 \mu\text{m}$ .

Além desse fenômeno, também foi observado acúmulo de partículas na entrada do labirinto e do pré-filtro (Figura 6B). A região de entrada do labirinto é relatada como a principal zona de obstrução dos emissores (Niu, Liu & Chen., 2013; Al-Muhammad et al., 2016). Nessa região, a energia cinética turbulenta é baixa e não há uma região de fluxo principal bem definida, característica dos demais defletores do labirinto. Por isso, a entrada de labirintos costuma ser uma região mais suscetível à deposição de sedimentos e obstrução.

Nas Figuras 6C e 6D verifica-se a deposição de partículas sólidas sob a membrana reguladora de pressão e nos labirintos dos modelos M1 e M6, respectivamente, no entanto, não houve obstrução completa desses emissores. No caso do modelo M1 houve aumento de vazão, corroborando com os resultados obtidos Pinto et al. (2017), avaliando emissores autocompensantes na presença de partículas de pequena dimensão.



**Figura 6.** Processos de obstrução evidenciados nos ensaios com partículas sólidas em laboratório A) deposição de uma partícula de grande dimensão seguida de partículas finas; B) acúmulo de partículas na entrada do labirinto; C e D) deposição de partículas sobre a membrana de emissores autocompensantes.

Conforme já mencionado, o modelo M2 foi o mais sensível à obstrução nesses ensaios. Esse modelo tem a menor vazão  $0,55 \text{ L h}^{-1}$ , que conseqüentemente apresenta seção de escoamento menor do que os outros modelos avaliados (Tabela 2). Os modelos M1, M5 e M7 também apresentam baixa vazão ( $1,1$ ;  $1,0$  e  $1,0 \text{ L h}^{-1}$ ), respectivamente. No entanto, esses modelos se mostraram resistentes à obstrução causada apenas por partículas sólidas, indicando que diferentes geometrias de labirintos interferem na capacidade de transporte de sedimentos e na sensibilidade à obstrução dos emissores. Os modelos M1, M5 e M7 apresentam um aumento na seção de escoamento de 289%, 140% e 329%, respectivamente, quando comparado ao modelo M2.

É esperado que a sensibilidade à obstrução aumente na medida em que a seção de escoamento reduza (Lavanholi et al., 2018). Portanto, partículas que apresentam dimensões próximas a menor dimensão do labirinto se depositam mais facilmente no canal e desencadeiam o processo de obstrução. Para uso do modelo M2, evidencia-se a necessidade de empregar sistema de filtragem com capacidade de reter partículas mais finas do que seria necessário para os demais modelos de tubogotejadores avaliados.

## 4.2. Ensaios em laboratório de obstrução por $\text{CaCO}_3$ e interação de partículas sólidas e $\text{CaCO}_3$

A Figura 7 demonstra a sensibilidade à obstrução dos emissores nas condições avaliadas em laboratório. Em todos os modelos de emissores estudados, o tratamento apenas com carbonato de cálcio foi o mais severo. No tratamento avaliando a interação entre o agente físico (partículas sólidas) e químico (precipitados de  $\text{CaCO}_3$ ) a obstrução completa foi observada apenas para alguns modelos de emissores.

No tratamento apenas com carbonato de cálcio, com exceção dos modelos M4 e M7, após decorridas 40 h de ensaio, todos os modelos atingiram o limite crítico inferior (LCI), demonstrando alta severidade de obstrução. Após 80h de ensaio, apenas o modelo M7 tinha alguns emissores com vazão parcial, o que resultou em uma vazão relativa de 61,6% (abaixo do LCI), enquanto todos os demais modelos estavam completamente obstruídos. Devido à alta severidade, esse ensaio encerrou-se com 80 h (Figura 7).

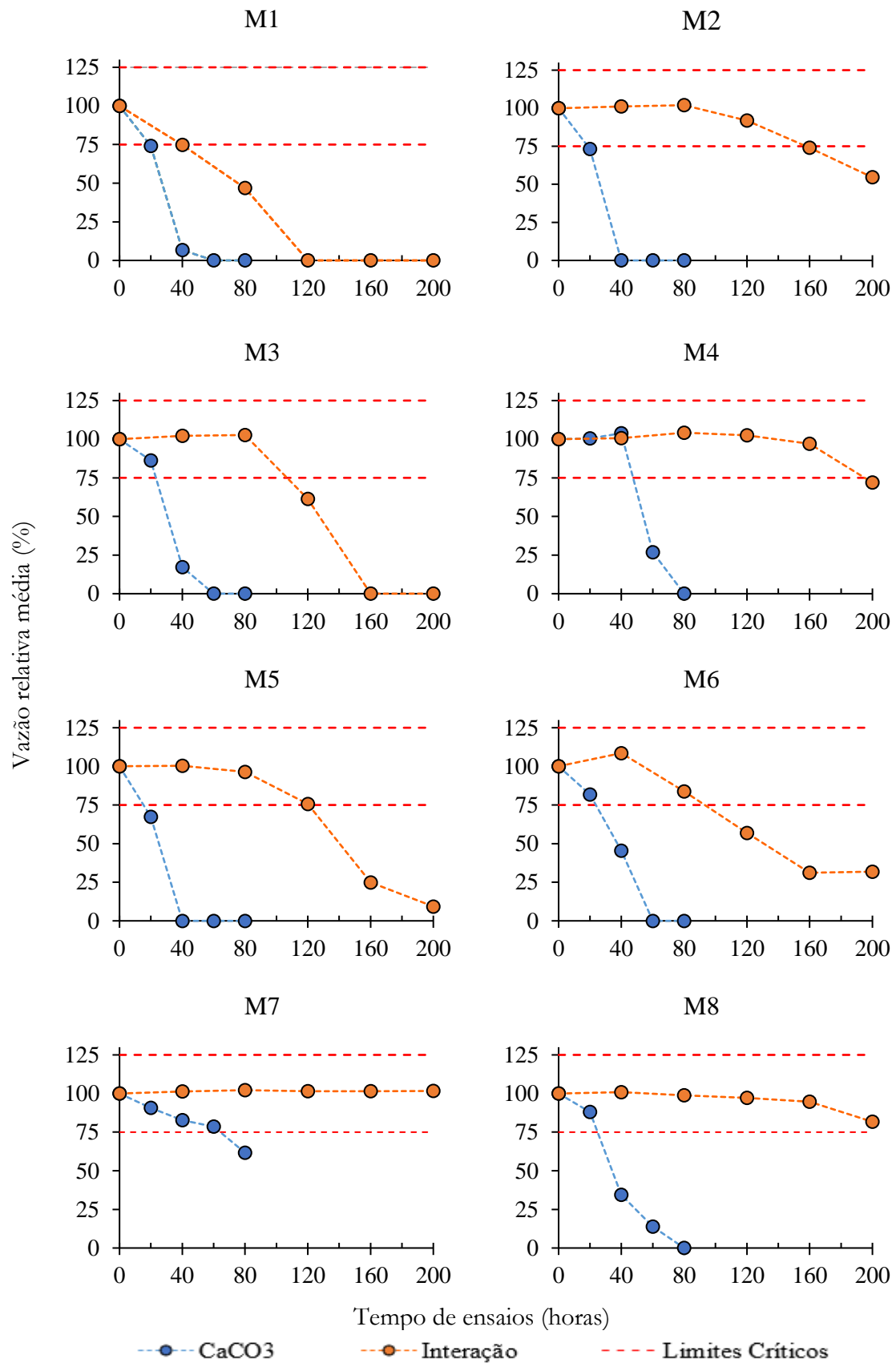
No tratamento com interação, a obstrução foi menos intensa, no entanto, com exceção dos modelos M7 e M8, todos os demais atingiram o LCI. Ao final do ensaio, os modelos M7 e M8 apresentaram uma vazão relativa de 101,6% e 81,7%, respectivamente. Os modelos M2, M4, M5 e M6 apresentavam, no final do ensaio vazão relativa de 48,6%; 71,9%; 9,3% e 31,8%, respectivamente. Os demais modelos (M1 e M3) estavam completamente obstruídos.

O modelo M1, no tratamento apenas com  $\text{CaCO}_3$  apresentou elevada sensibilidade à obstrução com apenas 20 h de ensaio. Após 60 h, todos os emissores estavam obstruídos completamente. No tratamento com interação após 40 h de ensaio, observou-se vazão relativa média de 75% e com 120 h, todos os emissores do modelo M1 estavam obstruídos (Figura 7). O modelo M2 apresentou obstrução completa dos emissores no tratamento apenas com  $\text{CaCO}_3$  com 40 h de ensaio. No tratamento com interação, os emissores demonstraram resistência ao entupimento até 80 h, entretanto, atingiram o LCI com 160 h de ensaio.

Os emissores M3, M5 e M6, os quais apresentam semelhanças construtivas, tiveram desempenho anti-obstrução similares. Com apenas 40h de ensaio, todos os modelos já apresentavam valores de vazão relativa abaixo do LCI no ensaio apenas com  $\text{CaCO}_3$ . No tratamento com interação, após 120 horas de ensaio esses modelos ultrapassaram o LCI. O modelo M4 (tipo pastilha e não autocompensante) foi sensível ao ensaio apenas com  $\text{CaCO}_3$ . Por outro lado, no ensaio da interação, o modelo apresentou um dos melhores desempenhos, ultrapassando o LCI apenas próximo a 200h de ensaio. No final do ensaio, apenas 26% dos emissores do modelo M4 estavam obstruídos.

Os modelos M7 e M8, emissores do tipo cilíndrico, foram os únicos modelos que não atingiram o LCI nos ensaios com interação. O modelo M7 destacou-se dos demais, já que em 200 h de ensaio não apresentou nenhuma tendência de alteração de vazão. Já o modelo M8, embora não tenha atingido o LCI, apresentou tendência de queda de vazão entre 160 e 200 h, indicando que, em condições de ensaio mais longo provavelmente seria obstruído. No entanto, no ensaio apenas com carbonato de cálcio, com 80h decorridas, ambos os modelos obstruíram em 80 h.

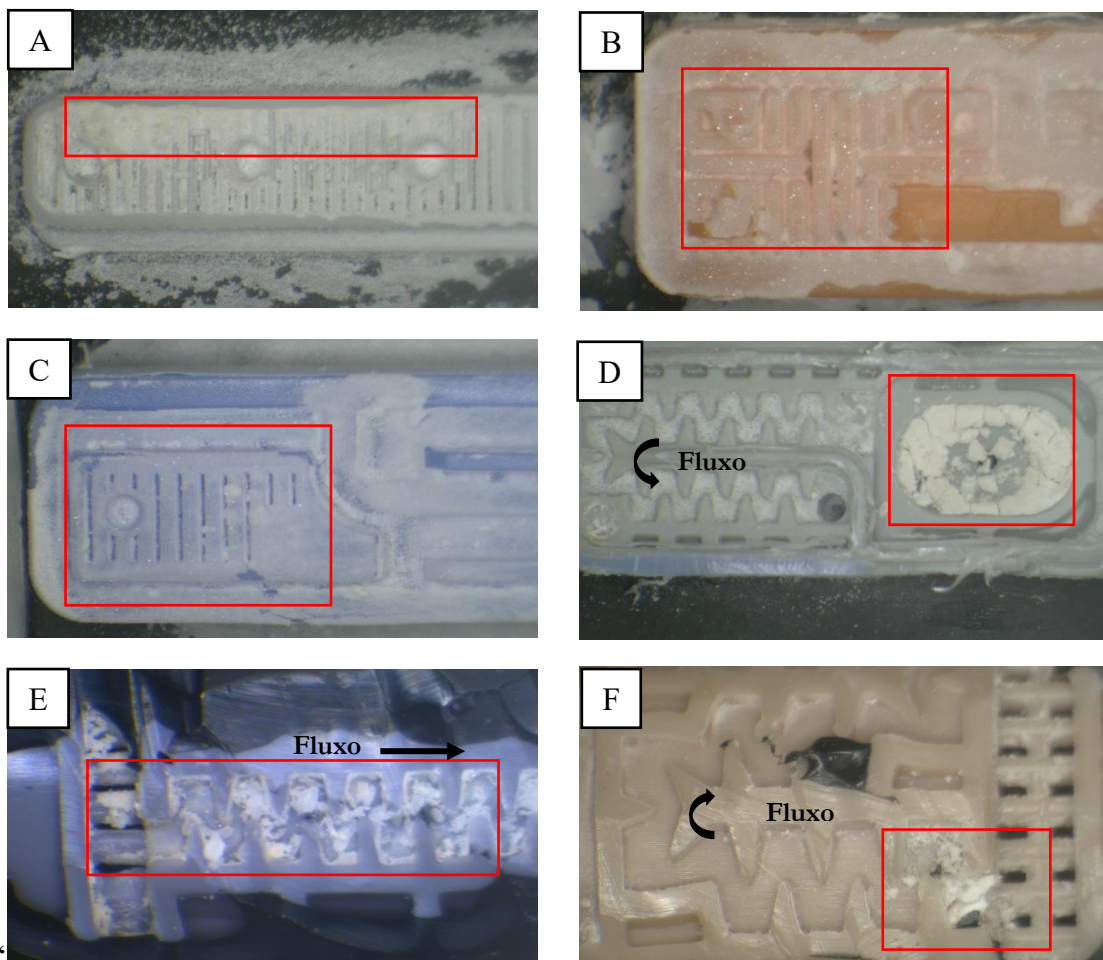
Os resultados de ambos os ensaios em laboratório, demonstraram um comportamento muito severo e rápido na deposição de  $\text{CaCO}_3$  no interior dos labirintos dos emissores, o que pode não representar uma condição de campo. Em relação às características geométricas nesses ensaios, é difícil indicar alguma tendência de obstrução, diante da severidade observada e rapidez dos processos de obstrução.



**Figura 7.** Variação de vazão relativa média dos modelos de emissores na presença de CaCO<sub>3</sub> e de interação (PS+ CaCO<sub>3</sub>) ensaio em laboratório

O principal fenômeno observado nesses ensaios foi a deposição de precipitados principalmente na região de pré-filtro dos emissores, nos labirintos e abaixo da membrana reguladora de pressão nos emissores autocompensantes (Figura 8). Nos ensaios apenas com  $\text{CaCO}_3$  a deposição e incrustação de precipitados foi extremamente agressiva, sendo observada em todo o exterior da pastilha dos emissores e no pré-filtro.

Nos emissores do tipo pastilha e não autocompensantes (modelos M2 e M4) evidenciou-se a formação de precipitados especialmente no pré-filtro (Figura 8A). A deposição nessa área pode ser ocasionada pelo pequeno espaço entre as paredes do pré-filtro, que servem como superfície favorável à formação da incrustação de  $\text{CaCO}_3$ . Para os emissores M1, M3, M5 e M6 (modelos tipo pastilha e autocompensantes) observa-se a deposição no entorno do pré-filtro e nos labirintos dos emissores, e em maior quantidade, abaixo da membrana reguladora de pressão (Figura 8B, 8C e 8D). O fenômeno de deposição de precipitados pode ser observado nos labirintos dos modelos M7 e M8, conforme Figuras 8E e 8F.

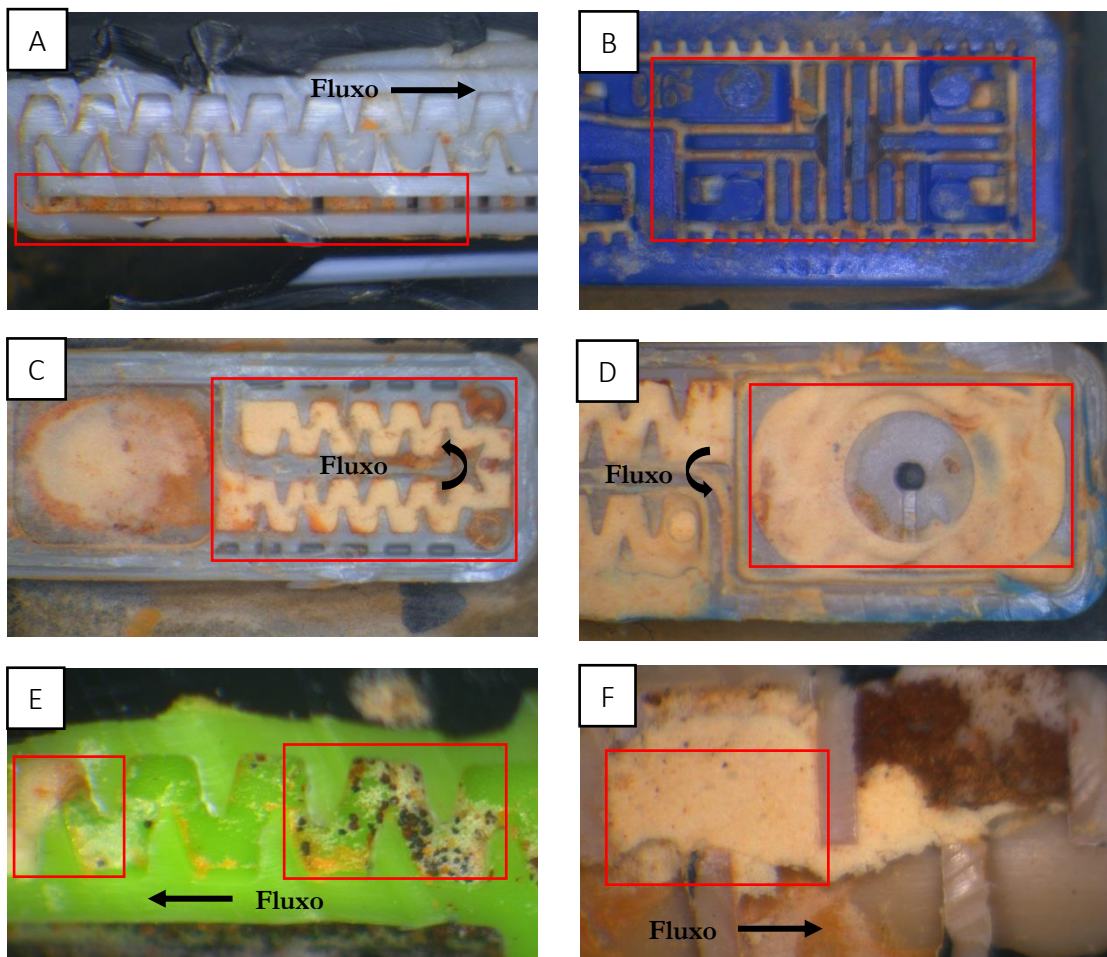


**Figura 8.** Processos de obstrução observados no ensaio apenas com  $\text{CaCO}_3$ . A, B e C) deposição de precipitados na região do pré-filtro; D) deposição de precipitados abaixo da membrana reguladora de pressão; E e F) deposição de precipitados no labirinto dos modelos cilíndricos.



Na Figura 9 observa-se o processo de deposição ocorridos nos ensaios com interação. Percebe-se a diferente coloração dos cristais formados, devido a presença de partículas sólidas. Observou ainda a obstrução na região do pré-filtro (Figura 9A), ainda que esta não tenha sido a principal causa de obstrução. Na Figura 9B é possível verificar um pré-filtro limpo, indicando que a obstrução ocorreu no interior do labirinto.

Analisando a obstrução causada no ensaio de interação, claramente pode-se verificar que o processo de obstrução foi diferente, quando comparado ao ensaio apenas com  $\text{CaCO}_3$ . O processo de obstrução mais recorrente nesses ensaios, foi o acúmulo de  $\text{CaCO}_3$  nos labirintos e na câmara abaixo da membrana reguladora de pressão nos emissores autocompensantes (Figuras 9C e 9D). Houve também deposição de sedimentos de forma parcial no interior do labirinto do modelo M2 (Figura 9E), e na câmara de saída do modelo M8 (Figura 9F).



**Figura 9.** Fenômenos de obstrução observados no ensaio de interação. A e B) deposição na região de pré-filtro; C e D) obstrução completa do labirinto e abaixo da membrana reguladora de pressão; E e F) deposição de precipitados e partículas sólidas.



A Figura 10 apresenta os dados da qualidade da água de ensaio para ambos os tratamentos estudados. O menor valor de pH da solução na condição apenas com  $\text{CaCO}_3$  observado foi de 8,3, enquanto o maior valor observado foi de 9,0. No ensaio de interação, os valores observados de pH foram menores ao longo de todo ensaio, com valores mínimo e máximo de 7,71 e 8,54, respectivamente (Figura 10A).

Em relação a condutividade elétrica da água, devido ao circuito hidraulicamente fechado e a injeção contínua de reagentes químicos destinada a precipitação do  $\text{CaCO}_3$ , o aumento dos valores foi expressivo, apresentando valores não esperados em água de irrigação, mesmo considerando fertirrigação. Em ambos os ensaios, o aumento da CE foi linear, o que indica uma taxa de injeção contínua. No ensaio apenas com  $\text{CaCO}_3$  ao final do ensaio a CE foi de  $8 \text{ mS.cm}^{-1}$  e no ensaio de interação o valor foi de  $20 \text{ mS.cm}^{-1}$  (Figura 10B). A diferença de CE observada nesses experimentos pode ser explicada por dois motivos: i) devido a presença da agitação do sistema no tratamento da interação, o que promovia a saída de  $\text{CO}_2$  mais acentuada, o equilíbrio do sistema era deslocado para a formação dos precipitados (Equação 13), com consequente aumento da concentração de NaCl na água; e, ii) no ensaio de interação, a taxa de decaimento de dureza era maior do que no ensaio apenas com  $\text{CaCO}_3$ , provavelmente pelo fato das partículas atuarem como um possível agente catalisador da precipitação, consequentemente, a taxa de formação de  $\text{CaCO}_3$  foi maior, resultando em maior consumo de reagentes e formação de NaCl, que contribuiu para o aumento da CE. O aumento da CE da água promove um retardamento ou até mesmo a inibição da precipitação de  $\text{CaCO}_3$  (El Housse et al., 2021).

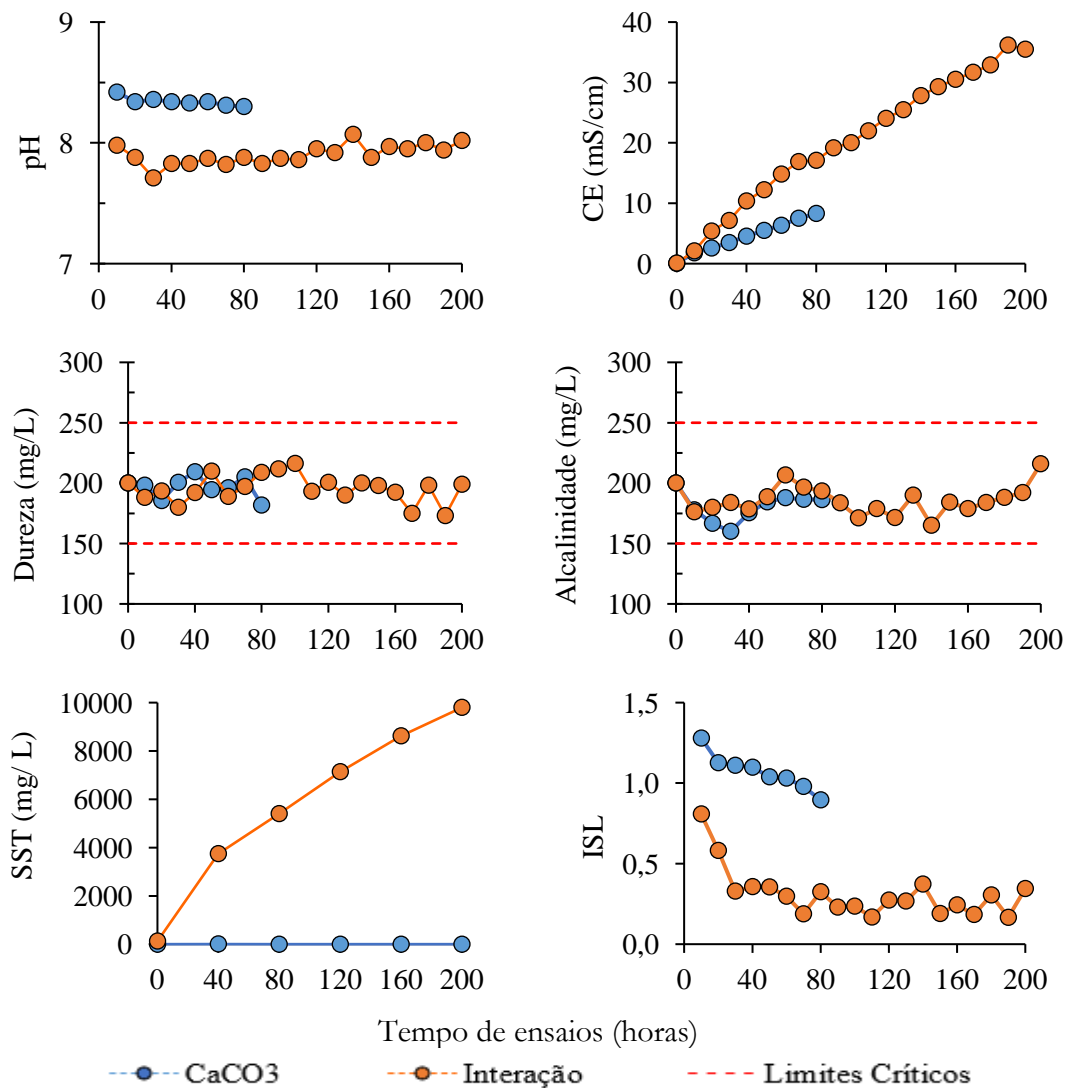
Em relação à dureza e à alcalinidade da água, os valores observados ficaram dentro da faixa desejada, valores entre  $150$  e  $250 \text{ mg L}^{-1}$  em  $\text{CaCO}_3$  (Figura 10C e 10D). Esse controle, permitiu uma taxa de precipitação de  $\text{CaCO}_3$  adequada, evitando o desequilíbrio químico do sistema, o que levaria a valores extremos de dureza e/ou alcalinidade da água.

Na Figura 10E, observa-se a concentração de sólidos suspensos totais (SST) na água. No ensaio apenas com  $\text{CaCO}_3$ , a quantidade de SST foi de  $8 \text{ mg L}^{-1}$ , enquanto no ensaio com interação, o valor observado foi de  $10.000 \text{ mg L}^{-1}$  no final do experimento. Conforme metodologia da APHA (2017), os SST são partículas com diâmetro superior a  $2 \mu\text{m}$ , o que comprova a presença de cristais de carbonato de cálcio no sistema com granulometria superior a esse valor.

O Índice de Saturação de Langelier (ISL) nos ensaios foi sempre maior do que zero, indicando supersaturação do sistema com consequente formação do carbonato de cálcio (Ghobadi Nia et al., 2010). No ensaio apenas com carbonato de cálcio, esse valor atingiu seu máximo nas primeiras horas, devido à fase de supersaturação e aumento do pH, e foi diminuindo

conforme o decorrer do tempo (Figura 10F). Os valores máximo e mínimo desse ensaio foram de 1,34 e 0,89, respectivamente. No ensaio com interação, os valores do ISL foram menores, apresentando valor máximo de 0,89 e mínimo de 0,18 (Figura 10F).

O menor valor do ISL observado no tratamento com interação pode ser explicado por dois motivos: i) a adição de partículas na água supostamente liberou resquícios de substâncias com características ácidas, que provocaram uma leve diminuição do pH; e ii) aumento da CE do sistema. Quanto maior a diferença entre o pH da solução e o pH de saturação, maior é o ISL, portanto, como o tratamento com interação apresentou menor pH do que o tratamento apenas com carbonato de cálcio, conseqüentemente, menor foi o valor ISL. Além disso, o aumento da CE da água, proporcionada pela adição contínua de reagentes, aumentou a força iônica da solução, resultando em menor condição de supersaturação do sistema, diminuindo o potencial de precipitação e incrustação do carbonato de cálcio nos emissores.



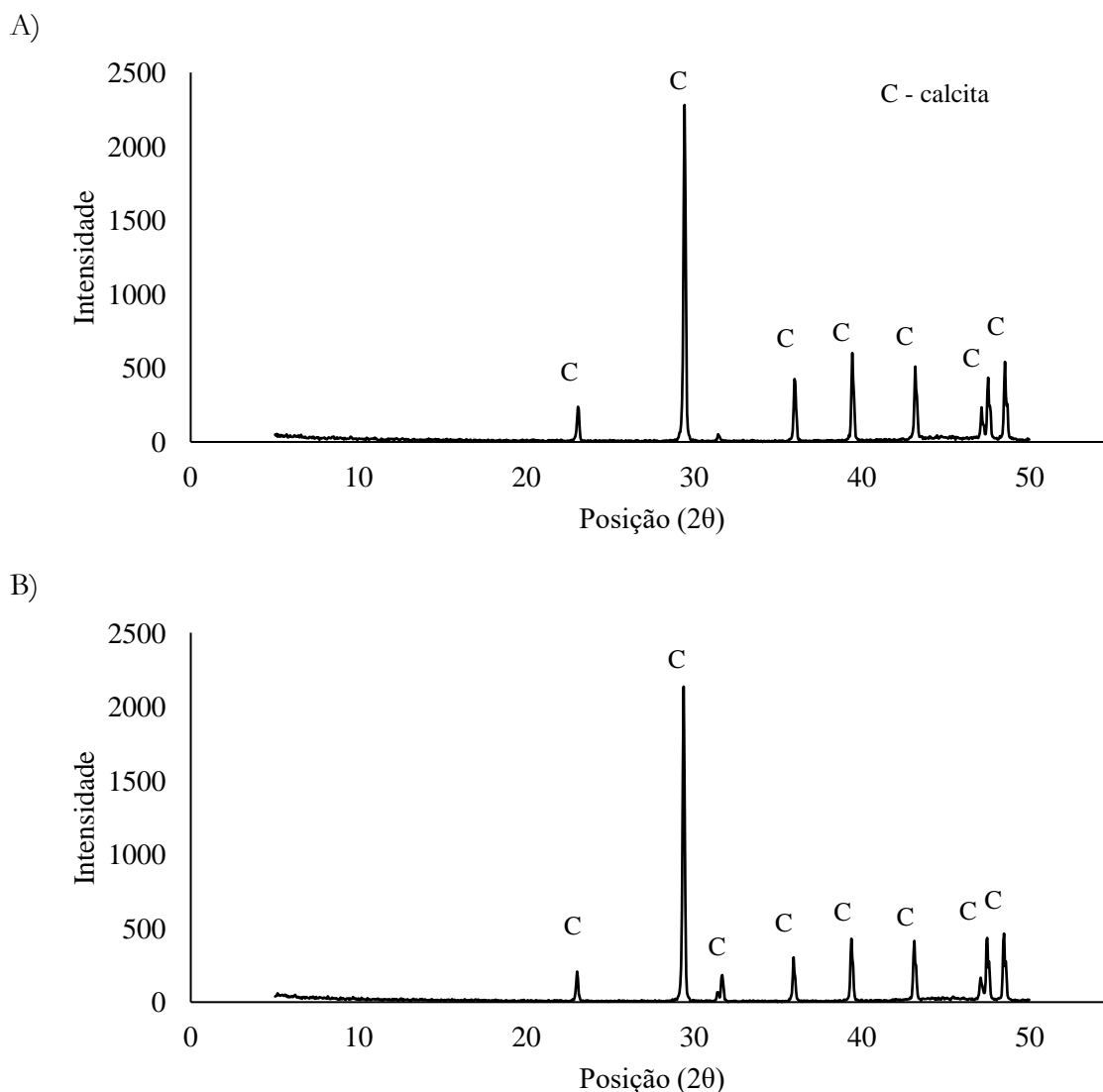
**Figura 10.** Características da qualidade de água nos ensaios envolvendo CaCO<sub>3</sub> e interação em condições de laboratório

A severidade da obstrução evidenciada no ensaio apenas com carbonato de cálcio pode ser explicada em função dos locais preferenciais de nucleação do cristal na presença e na ausência de partículas no sistema. Na ausência de partículas, a nucleação heterogênea ocorre diretamente na parede dos emissores, formando uma crosta, que cresce com o tempo, interrompendo o fluxo de água. No ensaio com adição de partículas, a nucleação heterogênea ocorreu preferencialmente na superfície das partículas e, em menor quantidade, na parede do emissor (Muniz, 2022). Uma vez que as partículas são pequenas o suficiente para serem arrastadas com o fluxo, os cristais formados na superfície das partículas também foram eliminados pelo gotejador. De acordo com Teng et al. (2017), o material no qual ocorre a deposição do CaCO<sub>3</sub>, interfere diretamente na capacidade de aderência do carbonato de cálcio. Nos ensaios apenas com CaCO<sub>3</sub>, como na solução não havia nenhuma “partícula estranha”, após formada as primeiras camadas de CaCO<sub>3</sub>

sobre a superfície dos tubogotejadores e emissores, a fase de crescimento dos cristais foi acelerada obstruindo rapidamente os emissores.

Nos ensaios com interação, sob agitação mecânica, o processo de formação de precipitados de  $\text{CaCO}_3$  foi mais acentuado, requerendo maior taxa de injeção de químicos. Como consequência, a quantidade de cristais formados foi maior do que nos ensaios apenas com carbonato de cálcio, aumentando consideravelmente a quantidade de precipitados no sistema. Esses cristais, no final do ensaio de interação, totalizaram cerca de  $10.000 \text{ mg L}^{-1}$ , o que promoveu uma condição extrema aos emissores em termos de concentração de precipitado no sistema. Essa concentração de cristais de  $\text{CaCO}_3$  supostamente foi superior à capacidade de transporte dos labirintos, o que proporcionou a deposição dos cristais ao longo de todo o labirinto dos emissores.

A presença de partículas sólidas reduziu a formação de incrustações e a capacidade de aderência dos cristais de  $\text{CaCO}_3$  na parede dos tubogotejadores e emissores. Devido a presença de cargas elétricas na superfície das argilas do solo, no caso da caulinita, cargas elétricas negativas, o  $\text{CaCO}_3$  foi nucleado na superfície das partículas e, com isso, observou-se redução da deposição dos cristais de  $\text{CaCO}_3$ . Esse fenômeno pode ser confirmado nas análises de DR-x e de MEV. Conforme a análise DR-x (Figura 11) ambas as amostras apresentam unanimidade em calcita, a forma mais estável e menos solúvel do cristal de  $\text{CaCO}_3$ . Portanto, devido à alta concentração de cristais de  $\text{CaCO}_3$ , supõem-se que os cristais aderiram toda a superfície das partículas sólidas, não sendo detectada a presença de partículas na análise de DR-x, mesmo a amostra apresentando coloração típica de partículas de solo.

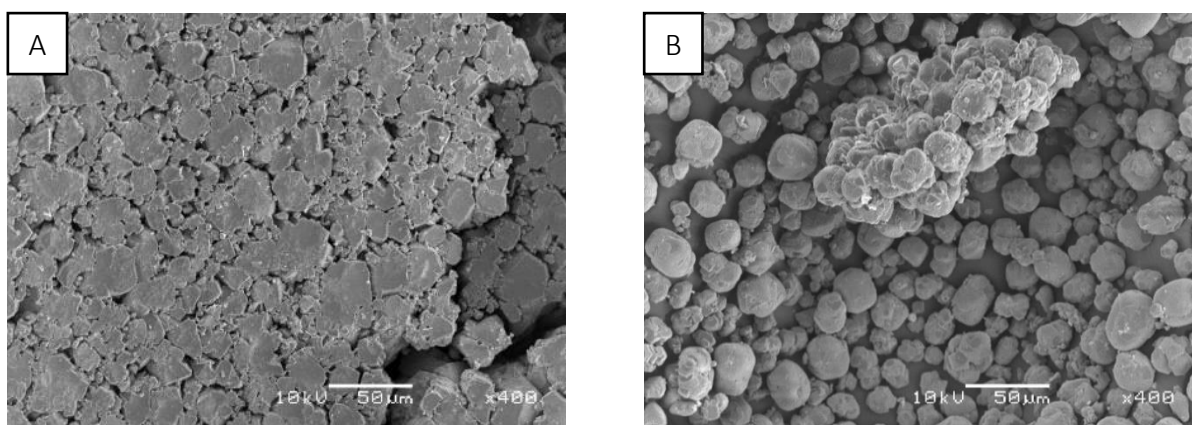


**Figura 11.** Difratoograma da análise dos ensaios A) apenas  $\text{CaCO}_3$  B) interação

Na Figura 12 é apresentada a morfologia dos cristais depositados nos ensaios em laboratório. No ensaio apenas com carbonato de cálcio (Figura 12A), os cristais apresentam morfologia romboédrica em forma de cubos, estrutura principal da calcita, confirmando os resultados obtidos na difração de raios-X. Devido à ausência de partículas estranhas no sistema os cristais formados apresentaram uma morfologia homogênea, o que favorece crescimento dos cristais de forma alinhada.

Com a adição das partículas sólidas, o formato e o tamanho dos cristais foram alterados (Figura 12B). Apesar da calcita ainda ser o cristal preponderante (Figura 11A), a presença de partículas impediu um arranjo e crescimento dos cristais. Os *clusters* formados foram nucleados às partículas sólidas, formando cristais dispersos, com formato arredondado, diferente da morfologia observada no ensaio apenas com carbonato de cálcio. O formato dos cristais no

ensaio com interação favorece para que eles apresentem um comportamento hidrodinâmico similar a uma partícula sólida. Desse modo, pode-se supor que na região do escoamento principal (altas velocidades) esses cristais são facilmente carregados para fora do gotejador junto com o fluxo. Portanto, a presença de partículas, mesmo em baixa concentração, minimizou a deposição e/ou incrustação do  $\text{CaCO}_3$  nas superfícies dos emissores e reduziu a obstrução, corroborando com os resultados observados por Kralj & Vdović (2000). A presença de impurezas na precipitação de carbonato de cálcio afeta o formato dos cristais de  $\text{CaCO}_3$ , além de em alguns casos, promoverem uma camada de deposição e/ou proteção sobre o material, evitando a deposição/incrustação de  $\text{CaCO}_3$  e, conseqüentemente o crescimento dos cristais (Xu et al., 2019).



**Figura 12.** Morfologia do material depositado (aumento de 400x) A) ensaio apenas com  $\text{CaCO}_3$  B) ensaio com interação

### 4.3. Ensaios de obstrução em campo com águas de diferentes características

#### 4.3.1. Vazão no início da linha lateral

As variações de vazão no início da linha lateral para cada modelo são apresentadas na Figura 13. Como a vazão no início da subunidade foi mantida constante ao longo de todo o ensaio (15 PSI), a redução de vazão observada foi consequência do processo de obstrução. De forma geral, os modelos M1, M2 e M7 evidenciaram as maiores reduções de vazão ao longo do ensaio, independentemente do tratamento adotado. Para os modelos M3, M4, M5, M6 e M8 as variações de vazão foram menores, indicando que independentemente da qualidade da água, esses emissores apresentam maior resistência à obstrução.

O modelo M1 apresentou oscilações na vazão da linha lateral nos três tratamentos, com maior magnitude no tratamento T1. Essas oscilações atingiram vazão relativa máxima de 112%

no tratamento T1, e vazão relativa mínima em torno de 68%. No entanto ao final do ensaio, a vazão relativa foi de 96%. Para os tratamentos T2 e T3, a vazão ao final do ensaio foi de 84% e 92%, respectivamente (Figura 13). A variabilidade na vazão desse modelo, corrobora com os resultados obtidos em laboratório. Além de apresentar um coeficiente de variação de fabricação (CVf) de 6,80 %, modelo que apresenta o maior valor de CVf nessa pesquisa, acredita-se que a deposição de partículas na membrana reguladora de pressão, interfere no funcionamento adequado, promovendo variabilidade de vazão.

O modelo M2, o de menor vazão entre os modelos avaliados, apresentou redução de vazão na ordem de 29% para o tratamento T1, 11% para o tratamento T2 e de 22% para o tratamento T3 (Figura 13). Conforme as características das águas utilizadas nos ensaios de campo, a água do tratamento T1 é a que oferece menor risco de obstrução aos emissores, no entanto, foi a que apresentou maior redução de vazão para o modelo M2. O tratamento T2 estava operando em uma concentração de partículas em torno de  $250 \text{ mg L}^{-1}$ , condição intermediária aos ensaios realizados em condições controladas em laboratório. Operando a uma concentração de  $125 \text{ mg L}^{-1}$ , esse modelo não mostrou sensibilidade à obstrução, quando expostos as partículas de mesmo diâmetro. No entanto, quando houve aumento da concentração para  $500 \text{ mg L}^{-1}$ , todos os emissores foram obstruídos. Portanto, acredita-se que a capacidade de transporte de sedimentos desse modelo suporta valores próximos ao tratamento T2 em campo ( $250 \text{ mg L}^{-1}$ ). Concentrações maiores comprometem o correto funcionamento desse modelo de emissor. Convém destacar que o modelo M2 foi o mais sensível à obstrução nas condições avaliadas em laboratório.

O modelo M7 foi o que mais apresentou redução de vazão relativa nos experimentos em campo. No tratamento T1 apresentou vazão relativa igual a 92% no final do ensaio. No entanto, nos tratamentos T2 e T3, a vazão relativa foi de 63% e 88%, respectivamente (Figura 13). Ao contrário dos resultados obtidos em laboratório, em que esse modelo se mostrou muito resistente à obstrução, na condição de campo, foi bem sensível, especialmente na presença de partículas sólidas. Em condições controladas em laboratório, no final da linha lateral havia um bocal, o qual era responsável pelo controle da velocidade de escoamento, mantendo-a próxima a  $1 \text{ m s}^{-1}$ , portanto, não havia deposição de partículas no interior da tubulação. Nos ensaios em campo, apesar da realização de rotinas de limpeza das linhas laterais a cada 20 horas de ensaio, houve acúmulo de partículas no interior da linha, o que pode ter contribuído para a obstrução do emissor. Além disso, em campo, esses emissores estavam sujeitos a desenvolvimento de biofilme, uma vez que nos ensaios em laboratório o desenvolvimento de biofilme foi controlado através da adição de hipoclorito de sódio na água. Nos ensaios de campo, os emissores estavam expostos a

condições extremas, considerando que o cenário era favorável a entupimento provocado por agentes de quaisquer naturezas, especialmente agentes biológicos, uma vez que a condição de elevada temperatura da água, advinda da exposição das tubulações à radiação solar, somada à disponibilidade de nutrientes e matéria orgânica na água do lago, era propícia para a proliferação de agentes de natureza biológica nos labirintos. Desse modo, é esperado que o desempenho dos emissores em campo possa ser modificado conforme as características da água varie.

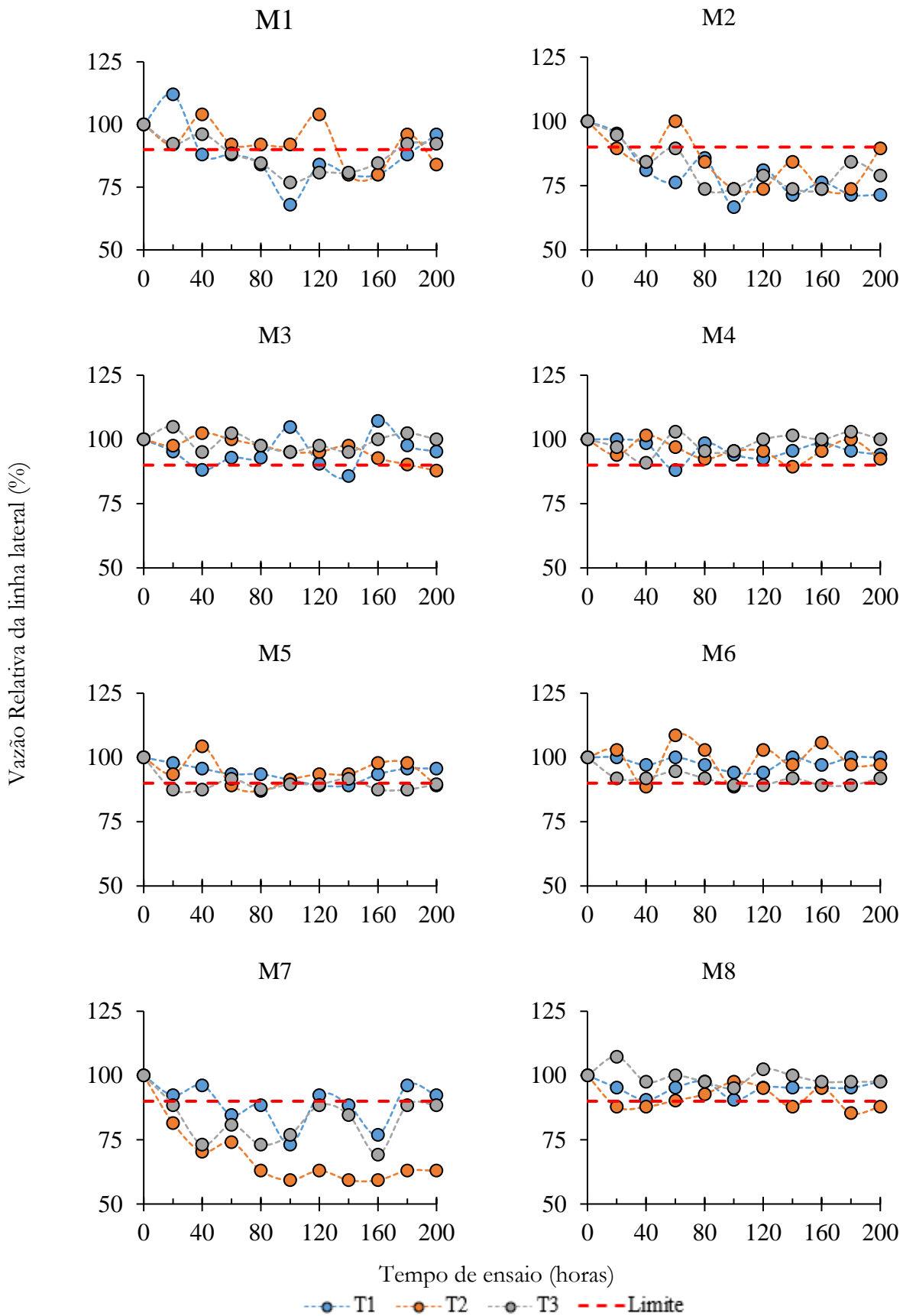
Os modelos M3, M4, M5, M6 e M8 apresentaram valores de vazão relativa no início da linha lateral superiores à 87,8% independentemente da qualidade de água (Figura 13), indicando uma maior resistência à obstrução. Esses resultados, são similares aos ensaios realizados em laboratório na presença de partículas sólidas de pequena granulometria, indicando que esses modelos apresentam características construtivas que podem conferir resistência ao entupimento.

De acordo com o critério de dimensionamento de projetos de irrigação localizada, a variação de vazão permitida em uma subunidade é de 10%. Analisando os resultados obtidos pela variação de vazão no início da linha lateral, os modelos M1, M2 e M7 estariam com um nível de obstrução avançado, sendo necessária uma ação de recuperação dos emissores ou até mesmo a substituição dos tubogotejadores.

Na literatura poucos casos de acompanhamento de vazão foram relatados, o que dificulta o entendimento e a adoção de critérios para tomada de decisão. Nos estudos de Lamm & Rodgers (2017), mesmo diante de rotinas de flushing, tratamentos químicos como acidificação e cloração, ao acompanharem a variação de vazão no início das linhas de irrigação durante 27 anos, os autores verificaram que emissores de menor vazão ( $0,51 \text{ L h}^{-1}$  e  $0,97 \text{ L h}^{-1}$ ) apresentaram redução de vazão, o que corrobora com os resultados dessa pesquisa. Resultados similares foram obtidos por Trooein et al. (2000), em que o emissor de menor vazão ( $0,51 \text{ L h}^{-1}$ ) apresentou uma redução de vazão relativa de 25%. Emissores com vazões entre  $1,5$  e  $3,5 \text{ L h}^{-1}$  foram mais resistentes à obstrução, apresentando uma redução máxima de vazão relativa de 15%, valores próximos aos 10% de variação permitida no dimensionamento de sistemas de irrigação localizada.

As flutuações de vazão no início da linha lateral (Figura 13) podem ser resultantes de processos de desobstrução de emissores decorrentes de fenômenos de autolimpeza, principalmente durante o acionamento do conjunto motobomba e/ou durante abertura dos finais de linhas (flushing), o qual era realizado a cada 20 horas de ensaio.





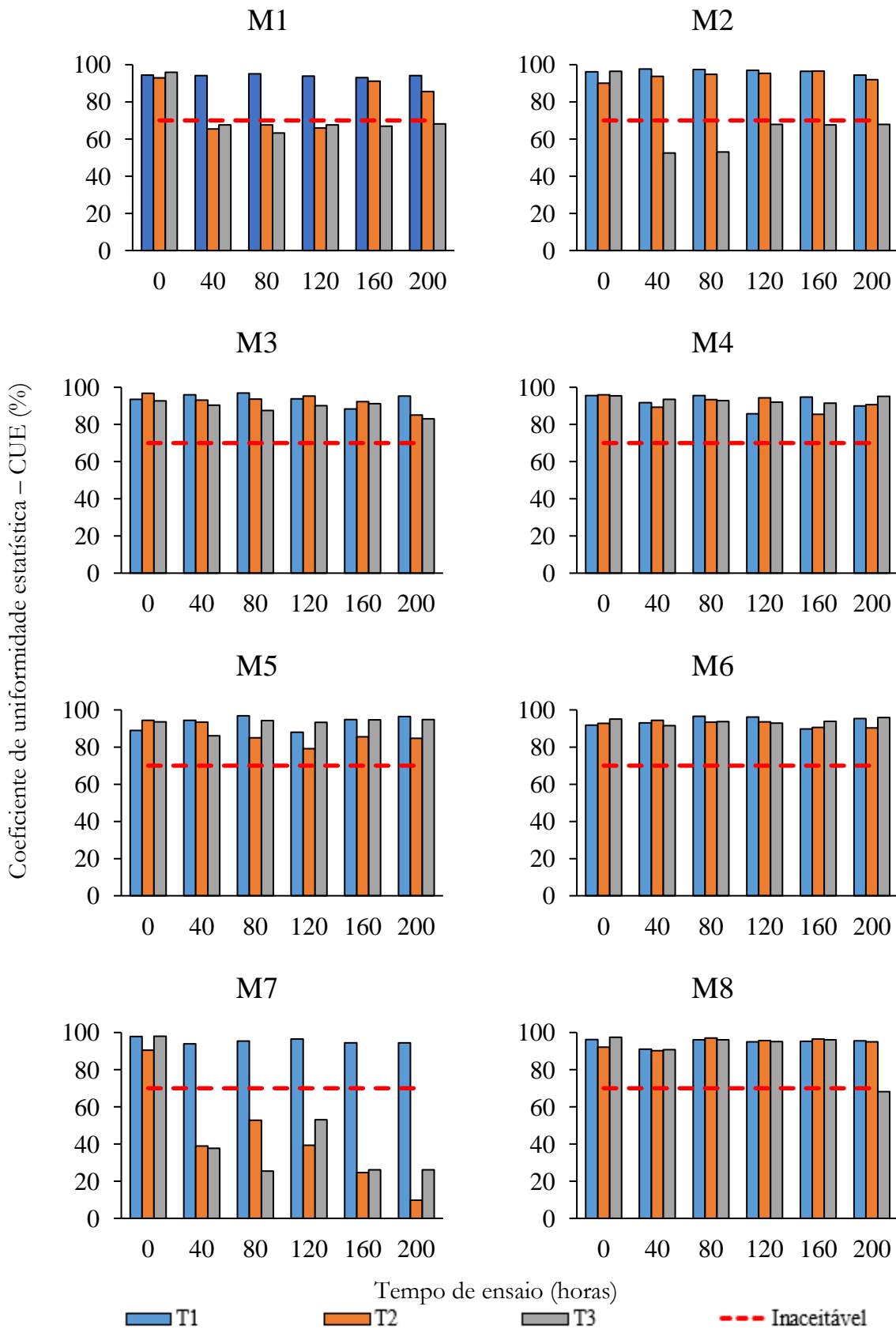
**Figura 13.** Variação de vazão no início da linha lateral para os tratamentos T1, T2 e T3 em condições de campo (limite inferior = 90%)

### 4.3.2. Ensaio de uniformidade de aplicação de água

Os valores do coeficiente de uniformidade estatístico (CUE) ao longo do experimento para os oito modelos avaliados em cada tratamento são apresentados na Figura 14. Na avaliação inicial, logo após a instalação dos tubogotejadores em campo, todos os modelos apresentaram excelente uniformidade de aplicação, com CUE acima de 90% (Frizzone et al., 2012), indicando que o sistema hidráulico foi dimensionado corretamente.

Os modelos M1, M2 e M7 apresentaram valores de CUE inferior a 70%, considerado como inaceitável (Frizzone et al., 2012) no tratamento T3 logo após 40 horas de ensaio. Ou seja, com um pequeno tempo de operação, essas linhas laterais já estavam operando em condições insatisfatórias de uniformidade. No entanto ao avaliar o tratamento T1, esses modelos demonstraram excelente desempenho, com valores de CUE próximos a 94% após 200 horas de ensaio. Ao analisar o tratamento T2, o modelo M1 indicou oscilações na uniformidade, atingindo os valores mínimo e máximo de 65,4% e 91,1% com 40 e 160 horas de operação, respectivamente. Os modelos M2 e M7, após decorridas 40 horas de ensaio já indicaram valores abaixo do recomendado (70%).

Os modelos M3, M4, M5, M6 e M8 apresentaram adequada uniformidade de aplicação em todos os tratamentos. Ocorreram pequenas oscilações ao longo do ensaio entre tratamentos ao avaliar de forma individual o modelo de emissor. No entanto, essas oscilações foram pequenas, sendo difícil indicar qual tratamento ofereceu maior risco de obstrução para esses modelos. Houve um único momento em que se observou uma redução do CUE para esses modelos. O modelo M8, no tratamento T3 apresentou um CUE de 68,2% após 200 horas de operação. Essa queda abrupta do valor CUE ocorreu devido a obstrução completa de um emissor contido na amostra avaliada.



**Figura 14.** Variação do coeficiente de uniformidade estatístico para os tratamentos T1, T2 e T3 em condições de campo (limite inferior: CUE = 70%)

O coeficiente de uniformidade estatístico é afetado pela vazão dos emissores, conforme indicado na Figura 15. Para os modelos que apresentaram emissores com vazões relativas entre 75% e 125% (azul), ou seja, emissores não obstruídos, observa-se que o CUE é sempre alto. No entanto, quando há presença de emissores completamente obstruídos (verde), o CUE cai abruptamente. A presença de um único emissor completamente obstruído, o que indica 8,33% dos emissores avaliados, proporciona uma queda do CUE para valores próximos a 70%. Claramente pode-se observar o efeito de um emissor completamente obstruído nos valores do CUE, como no caso dos emissores M1, M2, M7 e M8.

Os emissores avaliados tiveram a vazão mensurada ao longo de todo o ensaio, as quais foram classificadas em três classes de vazão relativa. A classe 1 compreende os emissores com comportamento normal, ou seja, vazão relativa entre 75% e 125%, a classe 2 emissores com vazão relativa >125% ou <75% (parcialmente obstruídos) e por fim, a classe 3, os emissores com vazão relativa de 0% (completamente obstruídos).

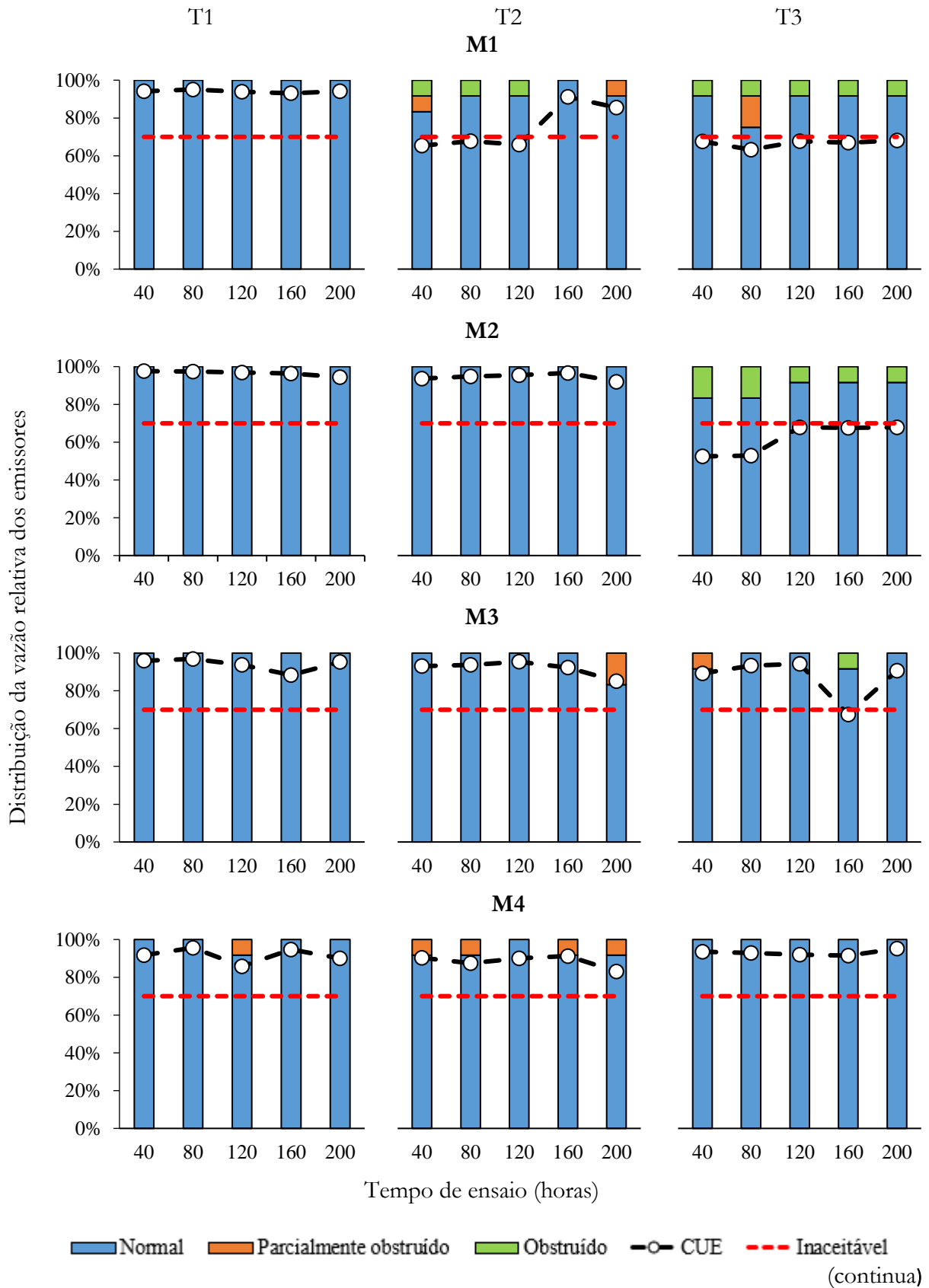
Deve-se ter cautela com a análise fundamentada no CUE considerando as amostras pequenas usualmente recomendadas. A presença de um único emissor completamente obstruído na análise, promove uma redução significativa nos valores do CUE (Wu, 1997), o que pode fornecer uma análise errônea para tomada de decisão sobre a manutenção do sistema, ou até mesmo a troca dos tubogotejadores. Nesses ensaios foram avaliados 12 emissores ao longo da linha lateral, o que corresponde 7,5% ao número total de emissores na linha lateral dos modelos M1, M3, M6, M7 e M8 (espaçamento de 0,5 metros) e a 4,5% do número total de emissores na linha lateral dos modelos M2, M4 e M5. O baixo percentual da amostra pode conduzir a tomada de decisão incorreta sobre a necessidade de manutenção do sistema.

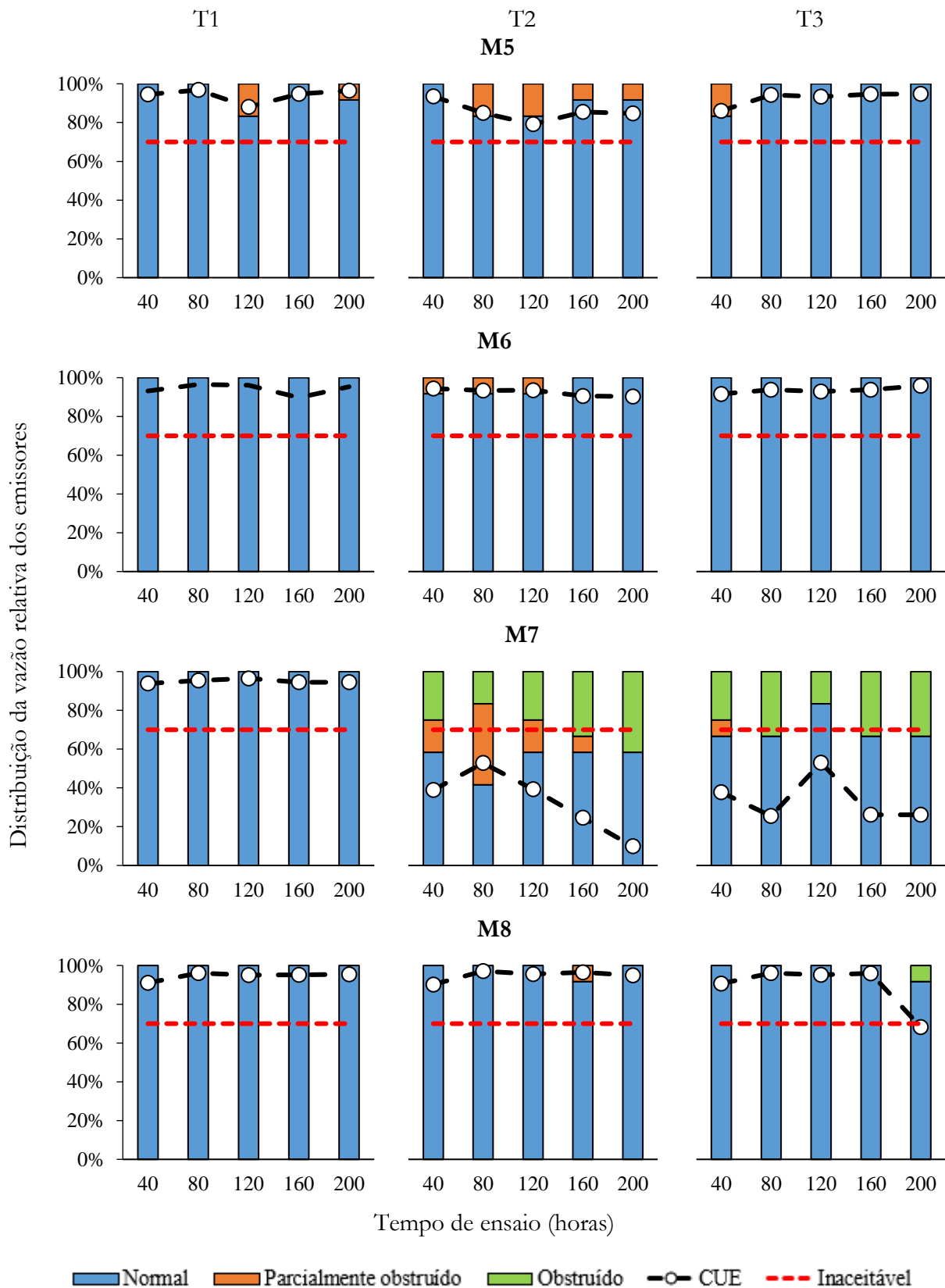
Ao comparar os resultados obtidos avaliando a análise de vazão no início da linha lateral com o ensaio de uniformidade de aplicação de água, evidenciou-se algumas discrepâncias. No caso do modelo M1, o tratamento T2 apresenta uma redução de vazão no início da linha lateral de 10%, e o CUE apresenta valores em torno de 60%. Comportamento semelhante observa-se para o modelo M7 no tratamento T3. Observou-se uma redução de vazão de 13% no início da linha lateral, e o valor de CUE foi extremamente baixo (20%). Nesses dois casos, durante o ensaio de uniformidade, dentro do número amostral estava presente um emissor completamente obstruído, reduzindo o valor do CUE. No entanto, a realidade das linhas laterais em questão era outra, com poucos emissores obstruídos.

Por outro lado, o modelo M2 sob os tratamentos T1 e T2, apresentou uma redução de vazão no início da linha de 28,6% e 12,8%, respectivamente, indicando obstrução. No entanto, ao analisar os resultados do ensaio de uniformidade, os valores de CUE foram de acima de 90%,

indicando excelente desempenho. Assim como a presença de um emissor obstruído, a ausência de um emissor obstruído, caso seja representativo na linha lateral, pode provocar uma análise tendenciosa.

Outro ponto importante que merece destaque ao comparar as duas metodologias de avaliação é o tempo gasto para a avaliação. Os ensaios de uniformidade apresentam maior demanda de tempo e equipe para a realização, enquanto a análise baseada na variação de vazão no início da linha lateral/ subunidade pode ser mais eficaz, rápida e passível de automação. Cuidados com a qualidade do medidor de vazão e a garantia de que a pressão ao longo do tempo seja constante no ponto de leitura, são os princípios básicos para uma correta análise fundamentada no acompanhamento da vazão da linha lateral/ subunidade de irrigação (Camargo et al., 2014).





**Figura 15.** Distribuição da vazão relativa e CUE para os tratamentos T1, T2 e T3 em condição de campo (limite inferior: CUE = 70%)

### 4.3.3. Processos de obstrução em condições de campo

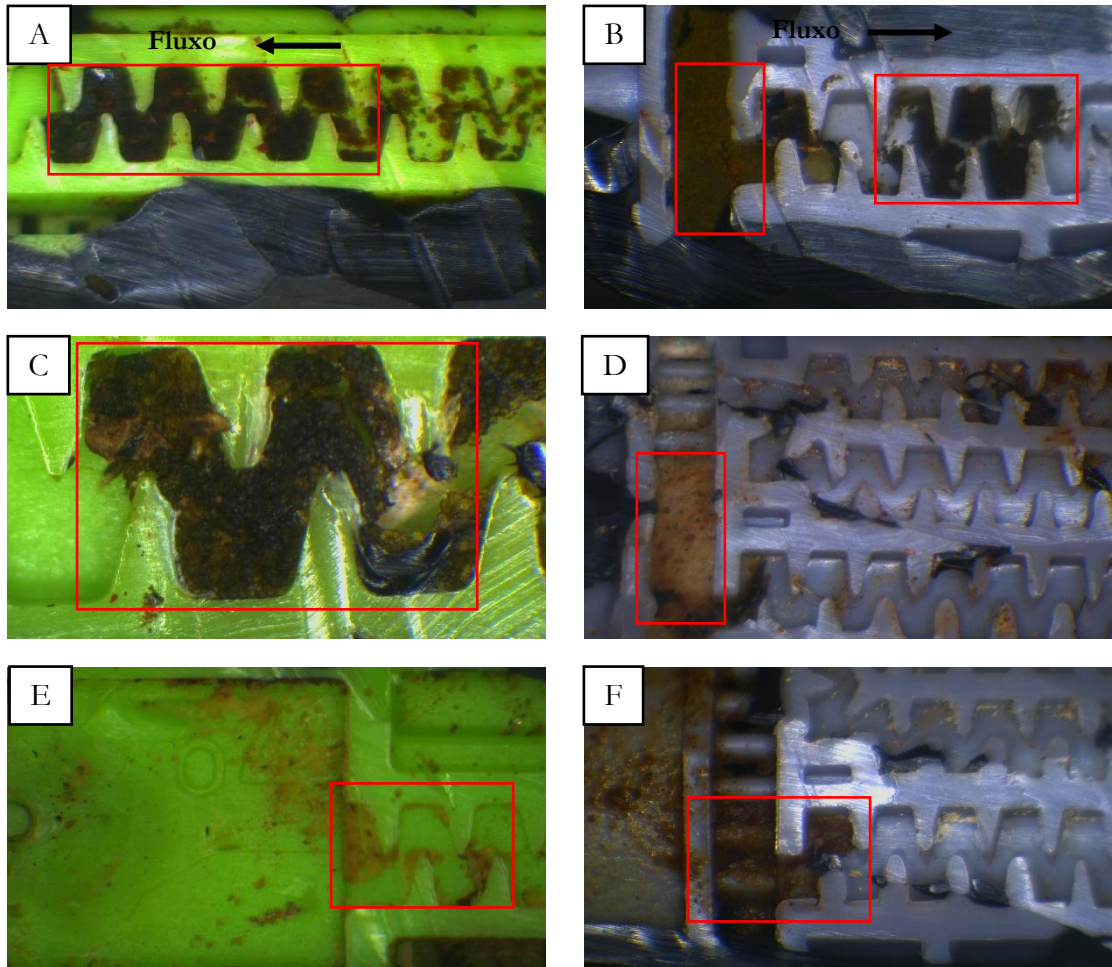
Conforme apresentado no item anterior, os principais modelos de emissores obstruídos em campo, foram os modelos M2 e M7, sendo que a maioria dos emissores obstruídos estavam localizados no terço final das linhas de irrigação. Nesses ensaios foram observados como principais responsáveis pela obstrução dos emissores o depósito de material orgânico (evidenciado no tratamento T1); a deposição de partículas sólidas acompanhadas de matéria orgânica (tratamento T2); e um leve índice de incrustação de  $\text{CaCO}_3$  seguidos de matéria orgânica (tratamento T3), conforme apresentado na Figura 16.

Nas Figuras 16A e 16B observa-se o fenômeno de obstrução ocorrido no tratamento T1, em que houve um grande depósito de uma mistura de partículas sólidas e material orgânico (coloração escura). Esse material depositou em grande parte do labirinto do modelo M2 (Figura 16A) e na entrada do labirinto no caso do modelo M7 (Figura 16B). No tratamento T2, para o modelo M2 (Figura 16C) percebe-se a deposição de uma partícula de grande dimensão, a qual se depositou primeiro, e desencadeou a obstrução do emissor. Na Figura 16D, o pré-filtro do modelo M7 foi completamente obstruído pelo acúmulo de partículas sólidas. Por fim, nas Figuras 16E e 16F é possível verificar a incrustação e deposição de cristais de  $\text{CaCO}_3$  nos defletores dos emissores.

Esses modelos, M2 e M7, como apresentavam uma menor vazão ( $0,55$  e  $1,0 \text{ L h}^{-1}$ , respectivamente) perante os demais modelos avaliados, a velocidade de escoamento no final das linhas de irrigação era menor, facilitando a deposição de partículas e a formação de biofilme. Menores velocidades de escoamento favorecem a fixação do biofilme nas paredes dos tubogotejadores e emissores (Zhou et al., 2013; Gamri et al., 2014). Ainda segundo Gamri et al., (2014), emissores autocompensantes são mais sensíveis à obstrução causada por biofilme, contradizendo os resultados obtidos nesse estudo, visto que os modelos M2 e M7 são não autocompensantes.

Apesar das rotinas de flushing a cada 20h de ensaio, houve a obstrução dos emissores por acúmulo de material orgânico, associado a fatores físicos e químicos presentes em cada tratamento. Portanto a realização de rotinas com maior frequência pode retardar a obstrução (Li et al., 2015).





**Figura 16.** Fenômenos de obstrução observados em condição de campo. A e B) deposição de biofilme no tratamento T1; C) deposição de partículas sólidas e biofilme (T2); D) deposição de partículas na entrada do labirinto; E e F) deposição de precipitados de  $\text{CaCO}_3$  nos labirintos.

#### 4.4. Comparação do desempenho dos emissores em condições controladas e em campo

Espera-se que os ensaios em laboratório indiquem tendências do desempenho dos emissores operados em condições adversas de campo. Por permitir o controle de diversos parâmetros da qualidade de água, a possibilidade de isolar um único agente causador de obstrução e compreender o processo em si, e a realização dos ensaios em condições aceleradas, os ensaios em laboratório podem auxiliar na identificação e desenvolvimento de emissores resistentes à obstrução, reduzindo o tempo e recursos para o desenvolvimento ou aprimoramento de geometrias de gotejadores.

Nas condições controladas em laboratório, os emissores foram submetidos a ensaios com águas que ofereciam riscos à obstrução por agentes físicos e, químicos isoladamente, e a

interação entre esses agentes. Agentes biológicos não foram avaliados em condições controladas, o que pode representar uma grande diferença, nos resultados em relação aos ensaios em campo. A água utilizada no campo, apresentava os fatores biológicos, o que promoveu o desenvolvimento de biofilme no interior dos tubogotejadores.

A Tabela 6 apresenta um resumo de todos os ensaios realizados nessa pesquisa (laboratório e campo). Para o efeito de complementar a análise, foi adicionado o estudo de Oliveira et al (2019), que avaliaram o mesmo conjunto de emissores conforme um protocolo de ensaio francês utilizado como base da proposta de norma ISO/DTR 21540. Tal protocolo indica a obstrução de emissores causada por partículas sólidas, sendo composto por 4 fases de ensaio, com o tamanho e concentração de partículas aumentando conforme a mudança de fase.

**Tabela 6.** Resumo dos ensaios realizados indicando a tolerância à obstrução dos emissores

Ambiente	Critério	Condição do ensaio	Modelo de emissor							
			M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
			Sensibilidade do emissor à obstrução							
Laboratório	Vazão relativa	PS 125 mg L <sup>-1</sup>	R	R	R	R	R	R	R	R
		PS 500 mg L <sup>-1</sup>	R	S	R	R	R	R	R	R
		Oliveira et al., 2019	S	S	R	R	R	S	R	R
		CaCO <sub>3</sub>	S	S	S	S	S	S	S	S
		Interação	S	S	S	S	S	S	R	R
Campo	Vazão na entrada da lateral	T1	R	S	R	R	R	R	R	R
		T2	S	S	S	R	R	R	S	S
		T3	R	S	R	R	R	R	S	R
	CUE	T1	R	R	R	R	R	R	R	R
		T2	R	R	R	R	R	R	S	R
		T3	S	S	R	R	R	R	S	S

Nota: S- sensível à obstrução; R- resistente à obstrução

Os ensaios em laboratório envolvendo CaCO<sub>3</sub> e a interação foram retirados das análises seguintes, pois foram tratamentos muito agressivos, não condizendo com águas que normalmente ocorrem em condições de campo. Processos de obstrução foram demasiadamente acelerados nessas condições de laboratório devido ao circuito hidráulicamente fechado adotado e aumento contínuo da condutividade elétrica e concentração de sólidos totais suspensos.

Pesquisas futuras envolvendo agentes químicos de obstrução devem ser conduzidas com circuitos hidráulicamente abertos a fim de reproduzir condições de campo.

O modelo M1 apresentou flutuações de vazão em todos os ensaios, o que pode indicar uma deficiência no funcionamento da membrana reguladora de pressão. Nos ensaios em laboratório apesar de flutuações de vazão na ordem de 18%, o emissor foi resistente aos ensaios. No ensaio de Oliveira et. al (2019), esse modelo foi sensível ao ensaio na fase 3 do ensaio (com concentração de partículas em  $375 \text{ mg L}^{-1}$  e diâmetro máximo de partículas de  $212 \mu\text{m}$ , o que corresponde a aproximadamente 30% da menor dimensão do labirinto (profundidade do canal). Em campo, o modelo M1 foi sensível à obstrução em apenas duas situações: no T2 no critério da vazão na entrada lateral, e no T3 quando se utilizou o CUE como critério (Tabela 6).

O modelo M2 mostrou-se muito sensível a presença de partículas na água de irrigação em condições laboratoriais. Quando submetido ao ensaio em condições de campo, mostrou sensibilidade a obstrução, no entanto em menor intensidade quando comparado ao laboratório (Tabela 6). Acredita-se que o efeito do agente biológico teve um papel importante na obstrução causada nesse emissor. De certa forma, os ensaios em laboratório foram um pouco mais agressivos para esse emissor do que em condições de campo (obstrução ocorreu em menor tempo), no entanto, indicando boa tendência. Um fator importante a se destacar, é a posição do orifício de saída de água dos emissores. Em laboratório, o orifício de saída de água ficou voltada para baixo, proporcionando uma condição desfavorável ao emissor. No campo, o tubogotejador foi colocado com o orifício voltado para cima, o que pode ter favorecido o emissor (Faria, 2017). Outro ponto de destaque, é que no tratamento T2, a concentração de partículas na água de irrigação apresentou uma condição intermediária em relação aos ensaios de laboratório. Em relação ao CUE, o emissor M2 mostrou sensibilidade apenas no T3.

O modelo M3 foi sensível apenas em um único ensaio (tratamento T2 em campo, quando o critério foi vazão na entrada da linha lateral) com vazão relativa de 87,8%, ou seja, bem próximo do limite. Os modelos M4 e M5 foram resistentes a todos os ensaios em laboratório e em campo. O modelo M6 apresentou sensibilidade à obstrução apenas nos ensaios de Oliveira et al., (2019).

O modelo M7 apresentou grande disparidade entre os resultados obtidos em laboratório e em campo. Em laboratório, esse emissor mostrou um bom desempenho, até mesmo nos ensaios agressivos na presença de  $\text{CaCO}_3$  e na interação (partículas sólidas +  $\text{CaCO}_3$ ), com retardo de obstrução quando comparado aos demais modelos. No entanto, em condições de campo, nos tratamentos T2 e T3, independentemente do critério analisado, esse modelo apresentou alta sensibilidade à obstrução. A grande diferença nesses resultados deve-se a

presença de biofilme em campo e da alta concentração de partículas acumuladas no interior da tubulação, causando obstrução principalmente no final de linha (baixa velocidade de escoamento), apesar de rotinas de flushing periódicas. Esse modelo de emissor, apresenta um labirinto com maiores dimensões quando comparados aos demais modelos, que associada a menor vazão, resulta em baixa velocidade de escoamento, facilitando a deposição de partículas e biofilme.

E por fim, o modelo M8 não apresentou sensibilidade à obstrução em laboratório, porém nas condições de campo, esse modelo de emissor foi sensível aos tratamentos T2 no critério de vazão na entrada da linha lateral e no T3 no critério do CUE.

Os modelos M3, M4, M5, M6 e M8 apresentaram os melhores desempenhos em condições laboratoriais e em campo. Em poucos ensaios esses emissores apresentaram sensibilidade à obstrução (Tabela 6). Com exceção do modelo M5, esse conjunto de modelos apresentam vazão de 1,6 à 1,8 L h<sup>-1</sup>, vazões superiores aos modelos que apresentaram em algum momento sensibilidade à obstrução (M1, M2 e M7) que tem vazão entre 0,55 L h<sup>-1</sup> e 1,1 L h<sup>-1</sup>. O modelo M5 merece destaque nesse item, pois foi um modelo extremamente resistente à obstrução e tem vazão de 1,0 L h<sup>-1</sup>.

A Tabela 7 apresenta os valores das métricas Erro total e F1\_score como indicadores de desempenho entre os ensaios de laboratório e os ensaios em campo. Tomando como referência os ensaios de campo (com o critério de vazão na entrada da lateral) e os ensaios em laboratório como condição analisada, o ensaio de laboratório que melhor representou as condições de campo foi o PS 500 mg L<sup>-1</sup>, apresentando os menores valores de Erro total e maiores valores de F1\_score (Tabela 7), quando comparados com os ensaios PS 125 mg L<sup>-1</sup> e o de Oliveira et al. (2019). O resultado dessa análise de desempenho indica que o ensaio em laboratório PS 500 mg L<sup>-1</sup> foi o que conduziu a resultados de sensibilidade dos emissores à obstrução mais próximos daqueles obtidos nas condições de campo estudadas (T1, T2 e T3).

Em condições de campo, existem inúmeras águas utilizadas para a irrigação, cada uma com suas características. Diante desse cenário, é possível que cada condição de campo exija um método de laboratório com condições particulares para estimativa da sensibilidade de emissores à obstrução, sendo que isso dificulta a elaboração de uma norma de ensaios em laboratório.

**Tabela 7.** Valores de Erro total e F1\_score dos ensaios realizados em laboratório e em campo

Análise	Referência	Condição Analisada	VP	VN	FP	FN	Erro total	F1_score
I	Campo, vazão na entrada da lateral, T1	PS 125 mg L <sup>-1</sup>	7	0	1	0	0,125	0,933
		PS 500 mg L <sup>-1</sup>	7	0	0	1	0,125	0,933
		Oliveira et al., (2019)	5	0	0	3	0,375	0,769
II	Campo, vazão na entrada da lateral, T2	PS 125 mg L <sup>-1</sup>	3	0	5	0	0,625	0,545
		PS 500 mg L <sup>-1</sup>	3	1	4	0	0,500	0,600
		Oliveira et al., (2019)	2	2	3	1	0,500	0,600
III	Campo, vazão na entrada da lateral, T3	PS 125 mg L <sup>-1</sup>	6	0	2	0	0,250	0,857
		PS 500 mg L <sup>-1</sup>	6	1	1	0	0,125	0,923
		Oliveira et al., (2019)	4	1	1	2	0,375	0,727

Nos ensaios em campo, o diagnóstico da obstrução foi realizado com base em dois métodos de monitoramento da vazão dos emissores: (1) monitoramento da vazão na entrada das linhas laterais. (2) ensaios de uniformidade e cálculo do CUE. Ao comparar os dois métodos de monitoramento em cada um dos respectivos tratamentos (T1, T2 e T3) espera-se que ambas as análises conduzam ao mesmo resultado, o que facilitaria a tomada de decisão para iniciar um tratamento químico adequado ou até mesmo, a substituição dos tubogotejadores. De acordo com os resultados da análise de desempenho (Tabela 8), o tratamento T1 apresentou a menor Erro total (0,125), com o maior F1\_score (0,933), indicando a mesma resposta (VP) para os métodos de monitoramento em 7 dos 8 modelos de emissores avaliados. Para o T2 houve uma maior discrepância nos resultados dos dois métodos, sendo que houve apenas 50% de acertos (VP e VN), o que indica diagnósticos diferentes para esse tratamento conforme o critério de tomada de decisão adotado. Já o T3 apresentou um erro total de 0,250 e F1\_score de 0,800, conduzindo ao mesmo diagnóstico em 6 dos 8 modelos avaliados.

A diferença entre os diagnósticos observado no T2, envolvendo os dois métodos de monitoramento de obstrução na condição de campo pode ter ocorrido devido a maneira de coleta de informações para as determinações de obstrução. No método de análise de vazão na entrada da linha lateral, toda a linha de irrigação está sendo analisada. No método de coleta de vazão e determinação do CUE, apenas 12 emissores foram avaliados, o que representa uma pequena porcentagem do número total de emissores na linha lateral. Sabendo que apenas um zero na amostra para cálculo do CUE impacta significativamente no valor deste indicador, a investigação do tamanho amostral requerido em ensaios de uniformidade para diagnóstico de obstrução de emissores deve ser objeto de estudos futuros.

**Tabela 8.** Valores de Erro total e F1\_score dos métodos de acompanhamento em campo

Análise	Referência	Condição Analisada	VP	VN	FP	FN	Erro total	F1_score
IV	Campo, vazão na entrada da lateral, T1	T1 CUE	7	0	1	0	0,125	0,933
V	Campo, vazão na entrada da lateral, T2	T2 CUE	3	1	4	0	0,500	0,600
VI	Campo, vazão na entrada da lateral, T3	T3 CUE	4	2	0	2	0,250	0,800

Apesar dos emissores avaliados estarem operando em águas que ofereçam risco de obstrução, em condições de campo, ou seja, em condições desfavoráveis, foi possível identificar padrões nos emissores que oferecem resistência ao processo de obstrução. As metodologias propostas em laboratório representaram as condições de campo para quase todos os modelos, com exceção do modelo M7. Portanto, os ensaios em laboratório envolvendo apenas partículas sólidas de pequena granulometria ( $<125 \mu\text{m}$ ) e concentração de  $500 \text{ mg L}^{-1}$  (PS  $500 \text{ mg L}^{-1}$ ) podem indicar tendências de desempenho de emissores em condições de campo.

A respeito das características do ensaio em condições de campo, notoriamente, observa-se que o processo envolvendo o tratamento T3 (com adição de químicos para a precipitação do  $\text{CaCO}_3$ ) foi diferente, quando comparado aos ensaios envolvendo o  $\text{CaCO}_3$ . Nas condições avaliadas em laboratório, atuando de forma isolada, o  $\text{CaCO}_3$  foi altamente rigoroso na obstrução dos emissores, enquanto na presença de partículas, o processo observado foi de inibição da incrustação dos cristais de carbonato de cálcio. Em campo, o processo foi diferente. Como não havia recirculação da água, os íons formadores do  $\text{CaCO}_3$  em sua maioria, eram expulsos pelos orifícios de saída dos emissores. Como segundo fator, a presença de outros compostos (partículas de solo, íons dissolvidos e matéria orgânica) agiram como inibidores da formação dos cristais de  $\text{CaCO}_3$  (Kralj & Vdović, 2000; Liu et al., 2019; Ramachandrupa & Kasa, 2020). Os ensaios em laboratório envolvendo  $\text{CaCO}_3$  não representaram a realidade e necessitam de muitos esforços para manter o sistema em equilíbrio. Estudos futuros devem considerar sistemas hidráulicamente abertos.



## 5. CONCLUSÕES

A hipótese de que a interação entre os agentes físicos e químicos intensificam os processos de obstrução foi rejeitada. Em laboratório, a adição de partículas sólidas reduziu a incrustação de carbonato de cálcio nos emissores, retardando o processo de obstrução. Em campo, a ação conjunta dos fatores físicos, químicos e biológicos (água que oferece risco de obstrução) conduziu ao mesmo fenômeno, atenuando os processos de obstrução por agentes químicos.

Emissores que apresentam as menores vazões (0,55 a 1,1 Lh<sup>-1</sup>) foram mais susceptíveis à obstrução, quando comparados a emissores com vazões superiores (1,6 a 1,8 Lh<sup>-1</sup>). Dessa forma, emissores com menor seção e/ou velocidade de escoamento no labirinto, necessitam de maior atenção para o sistema de filtragem e rotinas de manutenção no sistema de irrigação por gotejamento.

O ensaio em laboratório com partículas sólidas foi capaz de indicar tendências no desempenho dos emissores em condições de campo, com exceção do modelo M7. Esse modelo de emissor mostrou-se sensível a obstrução nas condições de campo devido a agentes biológicos de obstrução. Os ensaios em laboratório contendo apenas carbonato de cálcio foram demasiadamente rigorosos devido as condições de ensaio em circuito hidraulicamente fechado, não sendo representativo de condições de campo.

De modo geral, os ensaios em campo com águas de diferentes características apresentaram similaridades com os resultados obtidos em laboratório. O ensaio em laboratório que apresentou melhor desempenho em relação as diferentes características de água no campo foi o PS 500 mg L<sup>-1</sup>.

Deve-se ter cautela com os critérios para o monitoramento da evolução da obstrução dos tubogotejadores a nível de campo. Procedimentos utilizando a vazão no início da linha lateral e o coeficiente de uniformidade estatístico (CUE) podem proporcionar resultados e diagnósticos diferentes sobre a obstrução dos emissores. Recomenda-se estudo mais aprofundado sobre esse aspecto, avaliando métodos de monitoramento de vazão e um número maior de gotejadores amostrados nos ensaios de uniformidade. A recomendação típica de que se avalie apenas 18 emissores em cada subunidade de irrigação é insuficiente para o diagnóstico de problemas de obstrução e para a tomada de decisão sobre a execução de rotinas de manutenção do sistema. Rotinas de monitoramento baseadas na medição de vazão na entrada das laterais ou em pontos estratégicos da subunidade são mais rápidas, requerem menos mão-de-obra e tempo. e provavelmente são mais apropriadas para o diagnóstico da severidade de obstrução e tomada de



decisão sobre a necessidade de rotinas de manutenção do sistema. Entretanto, destaca-se que o monitoramento da vazão na entrada das laterais requer que a pressão na entrada da lateral seja sempre a mesma, caso contrário o diagnóstico é inválido.

## REFERÊNCIAS

- Adin A, Sacks M. Dripper clogging factors in wastewater irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1991;117:813-26.
- Alahmad M. Factors affecting scale formation in sea water environments - An experimental approach. *Chemical Engineering and Technology*. 2008; 31:149-56.
- Al-Muhammad J, Tomas S, Anselmet F. Modeling a weak turbulent flow in a narrow and wavy channel: case of micro-irrigation. *Irrigation Science*. 2016; 34:361-77
- APHA. *Standart Methods for the Examination of Water & Wastewater*. 23 ed. New York: American Public Health Association, 2017.
- Baeza R, Contreras JI. Evaluation of thirty-eight models of drippers using reclaimed water: Effect on distribution uniformity and emitter clogging. *Water (Switzerland)*. 2020; 12:1-20.
- Beck R, Seiersten M, Andreassen JP. The constant composition method for crystallization of calcium carbonate at constant supersaturation. *Journal of Crystal Growth*. 2013; 380:187-96.
- Bounoua S, Tomas S, Labille J, Molle B, Granier J, Haldenwang P, Izzati SN. Understanding physical clogging in drip irrigation: in situ, in-lab and numerical approaches. *Irrigation Science*. 2016; 34:1-16.
- Bralts VF, Wu IP, Gitlin HM. Drip irrigation uniformity considering emitter plugging. *Transactions of the ASAE*. 1981; 24:1234-40.
- Brigatti MF, Galán E, Theng BKG. *Structure and Mineralogy of Clay Minerals*. *Developments in Clay Science*, vol. 5. Elsevier; 2013. p. 21-81.
- Bucks DA, Nakayama FS, Gilbert RG. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. *Agricultural Water Management*. 1979; 2:149-62.
- Camargo AP, Molle B, Tomas S, Frizzzone JA. Assessment of clogging effects on lateral hydraulics: Proposing a monitoring and detection protocol. *Irrigation Science*. 2014; 32:181-91.
- Capra A, Scicolone B. Water Quality and Distribution Uniformity in Drip/Trickle Irrigation Systems. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1998; 70:355–365.
- Chauhdary JN, Bakhsh A, Ahmad N, Mehmood K. Optimizing chlorine use for improving performance of drip irrigation system under biologically contaminated water source. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 2015; 52:829-35
- De Yoreo JJ, Waychunas GA, Jun Y-S, Fernandez-Martinez A. In situ investigations of carbonate nucleation on mineral and organic surfaces. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2013; 77:229-57.

- Duarte FV. Influência da aplicação de gás carbônico na redução de precipitação de carbonatos em sistema de irrigação localizada. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais; 2010.
- Durand N, Monger HC, Canti MG. Calcium carbonate features. Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Elsevier; 2010. p. 149-94.
- El Housse M, Hadfi A, Karmal I, Ben-aazza S, Belattar M 'barek, Errami M, Mohareb S, Driouiche A. Study of the effect of inorganic inhibitor on the calcium carbonate precipitation in the localized irrigation systems. *Nanotechnology for Environmental Engineering*. 2021; 6:13.
- Faria LA. Proposta de norma técnica de ensaio para tubogotejadores de irrigação: resistência ao entupimento por particulados sólidos em suspensão. Dissertação de mestrado. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Univesidade de São Paulo (ESALQ/USP), 2013.
- Feng J, Li Y, Liu Z, Muhammad T, Wu R. Composite clogging characteristics of emitters in drip irrigation systems. *Irrigation Science*. 2018a; 37:105-22.
- Feng J, Li Y, Wang W, Xue S. Effect of optimization forms of flow path on emitter hydraulic and anti-clogging performance in drip irrigation system. *Irrigation Science*. 2018b; 36:37-47.
- Fernandez-Martinez A, Hu Y, Lee B, Jun YS, Waychunas GA. In situ determination of interfacial energies between heterogeneously nucleated CaCO<sub>3</sub> and quartz substrates: Thermodynamics of CO<sub>2</sub> mineral trapping. *Environmental Science and Technology*. 2013; 47:102-9.
- Fodor MA, Ható Z, Kristóf T, Pósfai M. The role of clay surfaces in the heterogeneous nucleation of calcite: Molecular dynamics simulations of cluster formation and attachment. *Chemical Geology*. 2020; 538:119497.
- Frizzone JA, Freitas PSL, Rezende R, Faria M. Microirrigação gotejamento e microaspersão. Maringá: Eduem, 2012. p.356
- Gamri S, Soric A, Tomas S, Molle B, Roche N. Biofilm development in micro-irrigation emitters for wastewater reuse. *Irrigation Science*. 2014; 32:77-85.
- Ghobadi Nia M, Rahimi H, Sohrabi T, Naseri A, Tofighi H. Potential risk of calcium carbonate precipitation in agricultural drain envelopes in arid and semi-arid areas. *Agricultural Water Management*. 2010; 97:1602-8.
- Gómez-Morales J, Torrent-Burgués J, López-Macipe A, Rodríguez-Clemente R. Precipitation of calcium carbonate from solutions with varying Ca<sup>2+</sup>/carbonate ratios. *Journal of Crystal Growth*. 1996; 166:1020-6.
- Goyal MR, Chavan VK, Tripathi VK. Principles and management of clogging in micro irrigation. Apple Academic Press, Inc; 2016. p. 267.

- Gutjahr A, Dabringhaus H, Lacmann R. Studies of the growth and dissolution kinetics of the CaCO<sub>3</sub> polymorphs calcite and aragonite I. Growth and dissolution rates in water. *Journal of Crystal Growth*. 1996; 158:296-309.
- Han S, Li Y, Zhou B, Liu Z, Feng J, Xiao Y. An in-situ accelerated experimental testing method for drip irrigation emitter clogging with inferior water. *Agricultural Water Management*. 2019; 212:136-54.
- Hao F, Li J, Wang Z, Li Y. Effect of ions on clogging and biofilm formation in drip emitters applying secondary sewage effluent. *Irrigation and Drainage*. 2017; 66:687-98.
- \_\_\_\_\_. ISO 11277: soil quality – determination of particle size distribution in mineral soil material – method by sieving and sedimentation. Geneva, 2009. 34 p.
- Keysar S, Semiat R, Hasson D, Yahalom J. Effect of surface roughness on the morphology of calcite crystallization. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1994; 162:311-9
- Kralj D, Vdović N. The influence of some naturally occurring minerals on the precipitation of calcium carbonate polymorphs. *Water Research*. 2000; 34:179-84.
- Kukulka DJ. An evaluation of heat transfer surface materials used in fouling applications. *Heat Transfer Engineering*. 2005; 26:42-6.
- Lamm FR, Ayars JE, Nakayama FS. *Microirrigation for crop production: design, operation and management*. Elsevier; 2006
- Lamm FR, Rogers, DH. Longevity and performance of a subsurface drip irrigation system. 2017. *Trans ASABE* 60, 931–939.
- Lavanholi R. Avaliação de procedimento de ensaio para determinação da sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas sólidas. Dissertação de mestrado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), 2016.
- Lavanholi R, Oliveira FC, Camargo AP de, Frizzone JA, Molle B, Ait-Mouheb N, Tomas S. Methodology to Evaluate Dripper Sensitivity to Clogging due to Solid Particles: An Assessment. *The Scientific World Journal*. 2018; 2018:1-9.
- Li GY, Wang JD, Alam M, Zhao YF. Influence of geometrical parameters of labyrinth flow path of drip emitters on hydraulic and anti-clogging performance. *Transactions of the ASABE*. 2006; 49:637-43.
- Li Q, Fernandez-Martinez A, Lee B, Waychunas GA, Jun YS. Interfacial energies for heterogeneous nucleation of calcium carbonate on mica and quartz. *Environmental Science and Technology*. 2014; 48:5745-53.
- Li Y, Feng J, Xue S, Muhammad T, Chen X, Wu N, Li W, Zhou B. Formation mechanism for emitter composite-clogging in drip irrigation system. *Irrigation Science*. 2018; 37:169-81.

- Li Y, Song P, Pei Y, Feng J. Effects of lateral flushing on emitter clogging and biofilm components in drip irrigation systems with reclaimed water. *Irrigation Science*. 2015; 33:235-45.
- Lili Z, Peiling Y, Wengang Z, Yu L, Mengji G, Fengru Y. Effects of drip irrigation frequency on emitter clogging using saline water for processing tomato production. *Irrigation and Drainage*. 2019; 68:464-75.
- Lili Z, Yang P, Ren S, Li Y, Liu Y, Xia Y. Chemical clogging of emitters and evaluation of their suitability for saline water drip irrigation. *Irrigation and Drainage*. 2016; 65:439-50.
- Liu D, Xu Y, Papineau D, Yu N, Fan Q, Qiu X, Wang H. Experimental evidence for abiotic formation of low-temperature proto-dolomite facilitated by clay minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2019; 247:83-95.
- Mélo RF de, Coelho RD, Teixeira MB. Entupimento de gotejadores convencionais por precipitados químicos de carbonato de cálcio e magnésio, com quatro índices de saturação de Langelier. *Irriga*. 2008; 13:525-39
- Mullin JW. *Crystallization*. 4.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- Nakayama FS, Bucks DA. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. *Irrigation Science*. 1991; 12:187-92.
- Muniz GL. Processos de obstrução causados por carbonato de cálcio e partículas sólidas: simulação, experimentação e desempenho de protótipos de gotejadores. 124p. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2022.
- Niu W, Liu L, Chen X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. *Irrigation Science*. 2013; 31:545-55.
- Oliveira FC de. Processo de obstrução causado por partículas de argila em suspensão. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), 2017.
- Oliveira FC, Lavanholi R, Camargo AP, Frizzone JA, Ait-Mouheb N, Tomas S, Molle B. Influence of concentration and type of clay particles on dripper clogging. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*. 2017; 06:1-5.
- Oliveira J, Camargo AP, Muniz GL, Nazário AA, Cano ND, Ribeiro TAP. Desempenho de gotejadores operados sob risco de obstrução por partículas sólidas. In: XLVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2019, Campinas. XLVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2019, 2019. p. 1-4
- Pereira DJS, Lavanholi R, Araújo ACS, Camargo AP, Ait-Mouheb N, Frizzone JA, Molle B. Evaluating Sensitivity to Clogging by Solid Particles in Irrigation Emitters: Assessment of a Laboratory Protocol. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2020; 146:04020033.

- Pinto MF, Molle B, Alves DG, Ait-Mouheb N, de Camargo AP, Frizzone JA. Flow rate dynamics of pressure-compensating drippers under clogging effect. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2017; 21.
- Ramachandrula VR, Kasa RR. Non-destructive characterization of physical and chemical clogging in cylindrical drip emitters. *Heliyon*. 2020;6.
- Richter CA. *Água: Métodos e tecnologia de tratamento*. Blucher; 2009
- Rizk N, Ait-Mouheb N, Bourrié G, Molle B, Roche N. Parameters controlling chemical deposits in micro-irrigation with treated wastewater. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*. 2017; 66:587-97.
- Rizk N, Ait-Mouheb N, Molle B, Roche N. Treated wastewater reuse in micro-irrigation: effect of shear stress on biofilm development kinetics and chemical precipitation. *Environmental Technology*. 2019:1-11.
- Rosa FD, Favretto LD, Rodrigues VB, Gharaibeh NG. Convolutional neural networks performance evaluation applied to automated pavement crack detection. *Trasportes*. 2020; 28: 267-279
- Song P, Li Y, Zhou B, Zhou C, Zhang Z, Li J. Controlling mechanism of chlorination on emitter bio-clogging for drip irrigation using reclaimed water. *Agricultural Water Management*. 2017; 184:36-45
- Stumm W, Morgan JJ. *Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- Tai CY, Chen P. Morphology of calcium carbonate. *AIChE Journal*. 1995; 5:68-77
- Tanaka M, Girard G, Davis R, Peuto A, Bignell N. Recommended table for the density of water between 0 deg C and 40 degree C based on recent experimental reports. *Metrologia*. 2001; 38:301-9
- Taylor HD, Bastos RXX, Pearson HW, Mara DD. Drip irrigation with waste stabilisation pond effluents: Solving the problem of emitter fouling. *Water Science and Technology*. 1995; 31:417-24.
- Teng KH, Kazi SN, Amiri A, Habali AF, Bakar MA, Chew BT, Al-Shamma'a A, Shaw A, Solangi KH, Khan G. Calcium carbonate fouling on double-pipe heat exchanger with different heat exchanging surfaces. *Powder Technology*. 2017; 315:216-26.
- Thill A, Moustier S, Aziz J, Wiesner MR, Bottero JY. Floccs restructuring during Aggregation: Experimental evidence and numerical simulation. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2001; 243:171-82.

- Trooien, T.P., Lamm, F.R., Stone, L.R., M. Alam, M., Rogers, D.H., Clark, G.A., Schlegel, A.J., 2000. Subsurface drip irrigation using livestock wastewater: Dripline flow rates. *Applied Engineering in Agriculture* 16, 505–508.
- Wei Q, Shi Y, Lu G, Dong W, Huang S. Rapid evaluations of anticlogging performance of drip emitters by laboratorial short-cycle tests. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2008; 134:298-304.
- Van Der Weijden CH, Van Der Weijden RD. Calcite growth: Rate dependence on saturation, on ratios of dissolved calcium and (bi)carbonate and on their complexes. *Journal of Crystal Growth*. 2014; 394:137-44.
- Weichers, H.N.S., Sturrock, P., Marais, G. v. R. Calcium carbonate crystallization kinetics. *Water Research* .1975; 9:835–845.
- Wolthers M, Nehrke G, Gustafsson JP, Van Cappellen P. Calcite growth kinetics: Modeling the effect of solution stoichiometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2012; 77:121-34.
- Wu IP. An assessment of hydraulic design of micro-irrigation systems. *Agricultural Water Management*. 1997; 32:275–284.
- Xu Z, Zhao Y, Wang J, Chang H. Inhibition of calcium carbonate fouling on heat transfer surface using sodium carboxymethyl cellulose. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 148:1074-80.
- Yu L, Li N, Liu X, Yang Q, Li Z, Long J. Influence of Dentation Angle of Labyrinth Channel of Drip Emitters on Hydraulic and Anti-Clogging Performance. *Irrigation and Drainage*. 2019; 68:256-67.
- Yu L, Li N, Liu X, Yang Q, Long J. Influence of flushing pressure, flushing frequency and flushing time on the service life of a labyrinth-channel emitter. *Biosystems Engineering*. 2018; 172:154-64.
- Zeppenfeld K. Calcite precipitation from aqueous solutions with different calcium and hydrogen carbonate concentrations. *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua*. 2010; 59:482-91.
- Zhang L, Wu P, Zhu D, Zheng C. Effect of pulsating pressure on labyrinth emitter clogging. *Irrigation Science*. 2017; 35:267-74.
- Zhangzhong L, Yang P, Zheng W, Wang C, Zhang C, Niu M. Effects of drip irrigation models on chemical clogging under saline water use in Hetao district, China. *Water*. 2018; 10:1-13.
- Zhengying W, Meng C, Xia L, Yiping T, Bingheng L. Flow behaviour analysis and experimental investigation for emitter micro-channels. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2012; 25:729-37.

- Zhou B, Li Y, Pei Y, Liu Y, Zhang Z, Jiang Y. Quantitative relationship between biofilms components and emitter clogging under reclaimed water drip irrigation. *Irrigation Science*. 2013; 31:1251-63.
- Zhou B, Zhou H, Puig-Bargués J, Li Y. Using an anti-clogging relative index (CRI) to assess emitters rapidly for drip irrigation systems with multiple low-quality water sources. *Agricultural Water Management*. 2019a; 221:270-8.
- Zhou Hongxu, Li Y, Wang Y, Zhou B, Bhattarai R. Composite fouling of drip emitters applying surface water with high sand concentration: Dynamic variation and formation mechanism. *Agricultural Water Management*. 2019b; 215:25-43.
- Zhou Hongxu., Li YK, Fang YH, Xiao Y, Li Q. Assessment of flat emitter anti-clogging performance in drip irrigation systems. *Transactions of the ASABE*. 2019d; 62:641-53.
- Zhou, Hongxu, Li Y, Xiao Y, Liu Z. Different operation patterns on mineral components of emitters clogging substances in drip phosphorus fertigation system. *Irrigation Science*. 2019c; 37:691-707.
- Zhu G, Li H, Li S, Hou X, Xu D, Lin R, Tang Q. Crystallization behavior and kinetics of calcium carbonate in highly alkaline and supersaturated system. *Journal of Crystal Growth*. 2015;428:16-23.