

ESTIMATIVA DA VAZÃO DE RETROLAVAGEM PARA FILTROS DE AREIA PRESSURIZADOS

Palavras-Chave: Filtragem de água; Fluidização; Microirrigação

Autores(as):

Nicolas Giovanni Nunes Allegro, FEAGRI-UNICAMP

MSc. Juliana Sanchez Betinez (coorientadora), FEAGRI-UNICAMP

Prof. Dr. Gustavo Lopes Muniz (orientador), FEAGRI-UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A irrigação é uma técnica essencial para a produção agrícola, e oferece como benefícios a segurança no processo produtivo e ganho de produtividade e qualidade do produto. A crescente demanda por alimentos a nível mundial, combinada com a disponibilidade limitada de água de qualidade apropriada para uso na agricultura irrigada, requer o emprego de métodos e técnicas de engenharia de irrigação cada vez mais eficientes que permitam incorporar o uso de águas de qualidade inferior nos sistemas de produção agrícola.

Para isso, é necessário o uso de sistemas de filtragem eficiente, como os filtros de areia pressurizados, comumente empregados em sistemas de irrigação localizada. O principal objetivo do filtro de areia é reter partículas suspensas na água visando evitar o entupimento de emissores em sistemas de microirrigação. O filtro de areia é o equipamento padrão de filtragem usado para prevenção da obstrução em sistemas de microirrigação, em virtude de sua capacidade superior para reter partículas orgânicas e algas, quando comparado aos filtros de tela e discos (ARBAT et al., 2013). Os filtros de areia operam em dois regimes de trabalho: a filtragem e a retrolavagem, os quais, em conjunto, garantem o correto funcionamento e durabilidade do filtro.

Os filtros de areia, embora sejam equipamentos ideais para filtração, são comumente negligenciados ou subutilizados por causa de seu alto consumo energético e hidráulico no processo de retrolavagem. Além disso, ainda não há consenso sobre a taxa de velocidade ideal a ser aplicada nesse processo para garantir uma limpeza eficiente no leito filtrante.

A retrolavagem ou autolimpeza em filtros de areia é uma operação necessária que complementa a filtração. Neste processo o leito é fluidizado ao aplicar uma vazão determinada no sentido inverso a filtração, causando incremento na porosidade do leito e a consequente liberação de partículas contaminantes. Por diferença de densidade, as partículas contaminantes são arrastadas para fora e as partículas de areia ficam confinadas dentro do filtro. Assim, o leito poroso retorna à condição inicial de capacidade de retenção de partículas contaminantes. Quando é realizada uma rotina de retrolavagem negligente ou excessiva, são ocasionados problemas no processo de filtragem (SALCEDO-RAMIREZ, 2010). Portanto, a fim de obter o melhor desempenho possível do processo de filtragem e para garantir uma filtração eficaz a longo prazo, é necessário realizar o processo de retrolavagem na faixa ideal de velocidade.

Para tanto, esta pesquisa teve como objetivo determinar a vazão ideal de retrolavagem, expressa em termos de velocidade de escoamento, em um filtro de areia operando em escala de protótipo. Buscou-se estabelecer uma faixa de valores operacionais que proporcione uma limpeza eficiente do leito filtrante em filtros de areia pressurizados. No presente estudo, a vazão de retrolavagem foi convertida para velocidade superficial, sendo os resultados discutidos com base nesse parâmetro.

METODOLOGIA:

Este estudo foi realizado no Laboratório de Hidráulica e Irrigação da FEAGRI/UNICAMP. A velocidade de retrolavagem foi calculada utilizando a teoria da fluidização de um leito particulado. A partir

deste valor, foram realizados três testes de velocidade de retrolavagem em um protótipo de filtro de areia. Após cada ensaio, foram coletadas 4 fatias de leito de 30 mm cada. De cada fatia, foi estimada a concentração de sólidos suspensos totais residuais na areia. Os resultados foram analisados aplicando estatística descritiva e teste de médias.

1. Caracterização da areia do leito poroso:

Para todos os testes foi utilizada a areia sílica de granulometria entre 0,6 mm e 1,2 mm (Figura 1), que foi caracterizada em laboratório com relação à distribuição granulométrica, densidades aparente e real, porosidade, esfericidade, diâmetro equivalente e área superficial. Amostras de areia seca foram peneiradas para determinação da curva granulométrica e cálculo do coeficiente de uniformidade. A densidade aparente foi obtida por pesagem em volume conhecido; e a densidade real, pelo método volumétrico com álcool PA. A porosidade foi calculada por método indireto com base nas densidades.



Figura 1. Areia utilizada como meio filtrante nos ensaios.

2. Determinação da velocidade de retrolavagem

Os ensaios de retrolavagem foram realizados em um protótipo de filtro de areia confeccionado em acrílico, que integrou um circuito hidráulico montado para esta finalidade (Figura 2). O circuito foi composto por um reservatório de água, uma motobomba de 25 CV e um medidor de vazão. O controle de pressão e da vazão foi feito através de válvulas de gaveta. Foram instalados sensores para medir a temperatura da água (PT100), a pressão na entrada do filtro e a pressão diferencial no filtro. A coleta de dados foi realizada via Wi-Fi por uma plataforma de *IoT* instalada no local.

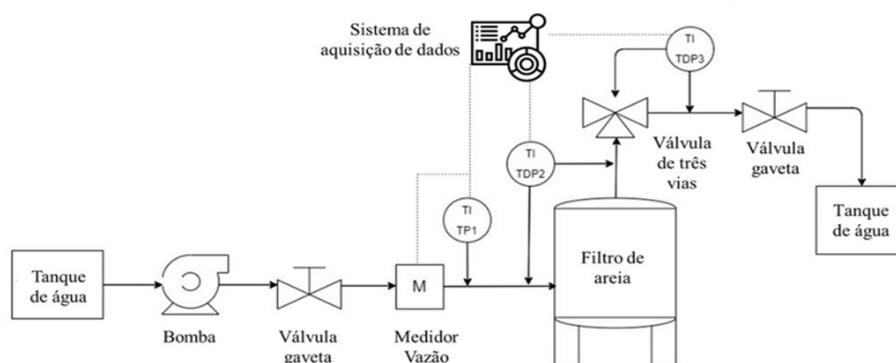


Figura 2. Esquema do circuito hidráulico para realização dos ensaios de retrolavagem.

Utilizando o protótipo de filtro de areia (Figura 3), foram testadas diferentes velocidades de retrolavagem para validar os limiares de mínima fluidização e velocidade terminal, avaliando a eficiência na remoção de contaminantes. O leito foi contaminado artificialmente com 100 g de Latossolo Vermelho peneirado e aplicado até os primeiros 100 mm de profundidade. Três velocidades de retrolavagem foram testadas (mínima, máxima sem perda de areia e intermediária), com ensaios realizados em triplicata. O tempo de duração da retrolavagem foi fixado em 5 minutos em todos os ensaios. Após os testes, amostras de areia foram coletadas em quatro profundidades do leito filtrante, secadas em estufa e armazenadas para análise de Sólidos Suspensos Totais residuais (SSTr).

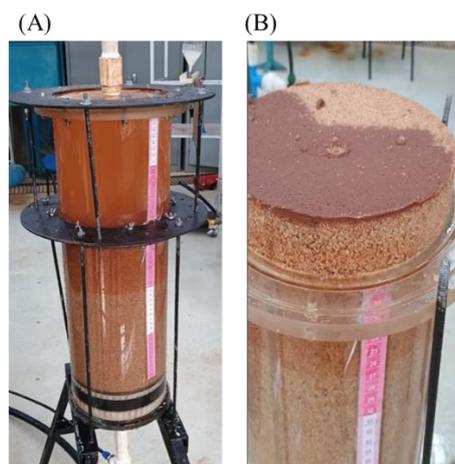


Figura 3. Protótipo de filtro de areia: A) Durante o teste de retrolavagem e B) Fatia de leito de areia.

3. Determinação de sólidos suspensos

A metodologia utilizada para determinação de SST_r na areia do leito é uma adaptação do método de “inversão de proveta” descrito por De Deus (2014). Amostras secas de areia foram coletadas, homogeneizadas e submetidas a lavagens sucessivas com água destilada em frascos do tipo Stohmann, agitados a 15 RPM por 3 minutos em um agitador tipo Wagner para promover a liberação dos sólidos. O processo foi repetido cinco vezes por amostra, e o líquido coletado foi homogeneizado e filtrado. A quantificação dos SST foi feita segundo a norma da APHA (1995), utilizando filtros de microfibras com poros de 0,45 µm, previamente secos e pesados. Após a filtração, os filtros foram novamente secados e pesados em uma balança analítica de alta precisão, permitindo calcular a concentração de SST, obtida pela diferença de massas, conforme a equação 1:

$$SST = \frac{P_2 - P_1}{V} \quad [1]$$

4. Análises dos dados

Os dados resultantes do ensaio de retrolavagem foram analisados utilizando teste de comparação de médias para avaliar se há influência da velocidade de retrolavagem na eficácia da rotina de limpeza do leito. Foi realizada análise de variância e comparação de médias aplicando o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Baseado na teoria da fluidização, foi estimado que para o tipo de areia utilizada a velocidade de mínima fluidização teórica é $v_1 = 70,5 \text{ m h}^{-1}$, enquanto a velocidade terminal teórica é de $243,9 \text{ m h}^{-1}$. Na prática foi estabelecido um valor de velocidade terminal de $v_3 = 176,3 \text{ m h}^{-1}$ devido às limitações na estrutura física do protótipo do filtro, uma vez que, nos valores acima de $176,3 \text{ m h}^{-1}$ foi observado perda de partículas de areia do leito poroso. Optou-se também por avaliar um valor intermediário entre estes dois valores, $v_2 = 123,4 \text{ m h}^{-1}$.

Os resultados apresentados na Tabela 1 correspondem aos valores médios de SST_f por profundidade analisada para cada velocidade de retrolavagem testada e o desvio padrão correspondente.

Tabela 1. Valores médios de SST_f (mg L⁻¹) por profundidade de leito para cada velocidade de retrolavagem testada e seu correspondente desvio padrão.

Profundidade (mm)	Velocidade de retrolavagem (m h ⁻¹)					
	v1 = 70,5	DP	v2 = 123,4	DP	v3 = 176,3	DP
30	29,81	1,8	12,79	2,1	13,36	3,3
60	14,62	1,9	7,69	3,2	9,26	0,8
90	14,81	1,3	8,42	4,0	9,96	1,1
120	14,39	0,6	10,84	3,9	10,05	1,6

Nota: v = velocidade de retrolavagem; DP: desvio padrão da média.

Na Figura 1 é apresentada a distribuição de SSTf residual em profundidade média para cada ensaio realizado.

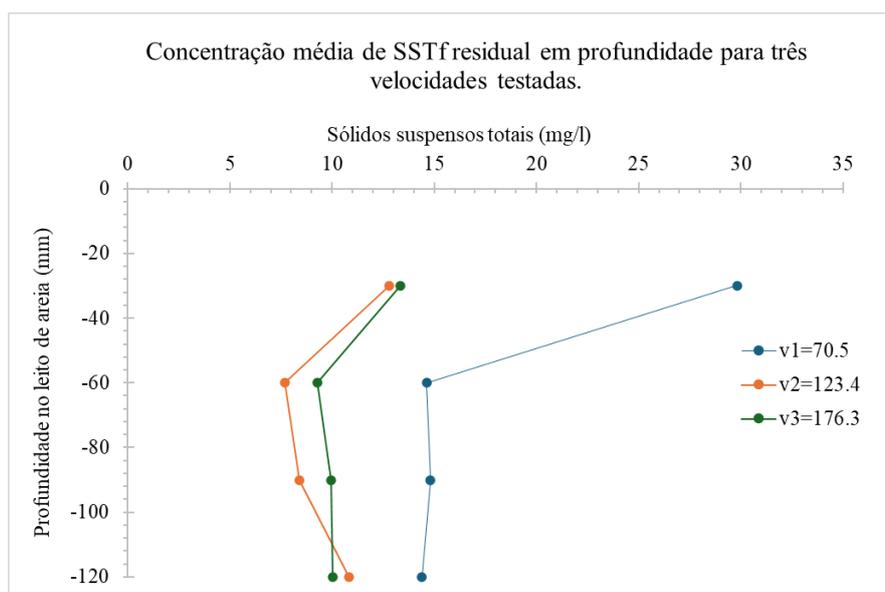


Figura 1. Concentração média de SSTf residual em função da profundidade do leito após a retrolavagem.

A maior concentração residual de partículas contaminantes foi observada após aplicação da velocidade $v_1 = 70,5 \text{ m h}^{-1}$, já entre as fatias analisadas, para a mesma velocidade, a maior concentração foi observada na primeira fatia de areia 0-30 mm. Esse comportamento é similar ao observado por Duran-Ros et al. (2024), estes pesquisadores testaram duas velocidades de retrolavagem $30/45 \text{ m h}^{-1}$ e $60/75 \text{ m h}^{-1}$, e concluíram que velocidades maiores apresentaram maior eficiência de retrolavagem que as menores. Resultado similar também foi observado com relação à profundidade, onde a maior concentração residual foi observada na profundidade inicial, de 0 – 5 mm.

A ANOVA dos fatores velocidade de retrolavagem (m h^{-1}) e profundidade de amostragem no leito (mm), apresentada na

Tabela 2, permite inferir que existe influência significativa dos efeitos principais (velocidade de retrolavagem e profundidade do leito) na eficiência de limpeza do leito filtrante, além de uma interação significativa entre eles.

Tabela 2. Análises de variância dos fatores velocidade de retrolavagem (mh^{-1}) e profundidade de amostragem no leito (mm).

Análise de Variância		
Fonte de variação	Graus de liberdade	Valor-P
Modelo	11	<0,001
Linear	5	<0,001
Velocidade de retrolavagem	2	<0,001
Profundidade do leito	3	<0,001
Interação dos fatores	6	<0,001
Velocidade*profundidade	6	<0,001
Erro	24	
Total	35	

A comparação das médias por meio do teste de Tukey, com intervalo de confiança de 95% (Tabela 4), revela que a aplicação das velocidades de retrolavagem v2 e v3 resulta em concentrações

residuais de sólidos suspensos totais no leito filtrante (SSTf) estatisticamente semelhantes. Dessa forma, infere-se a existência de um intervalo ótimo de velocidade de retrolavagem entre v_1 e v_2 , no qual a eficiência de remoção de SST se torna significativamente mais elevada.

Tabela 3. Comparação de médias pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade estatística.

Velocidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	Média de SSTf (mg L^{-1})	Agrupamento
$v_1=70,5$	18,4079	A
$v_2=123,4$	11,0477	B
$v_3=176,3$	9,9368	B

CONCLUSÕES:

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a aplicação da velocidade correspondente à mínima fluidização promove uma remoção significativa de partículas do leito filtrante. No entanto, a utilização de uma velocidade superior resultou em uma redução ainda mais eficaz da concentração residual de sólidos suspensos totais (SSTf). Assim, identifica-se uma faixa operacional recomendada para a velocidade de retrolavagem entre $70,5 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ e $123,4 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$, na qual se obtém maior eficiência de limpeza do leito.

BIBLIOGRAFIA

- ARBAT, G.; PUJOL, T.; PUIG-BARGUÉS, J.; DURAN-ROS, M.; MONTORO, L.; BARRAGÁN, J.; DE CARTAGENA, F. R. **An experimental and analytical study to analyze hydraulic behavior of nozzle-type underdrains in porous media filters.** *Agricultural water management*, v. 126, p. 64-74, 2013.
- De DEUS, F.P. **Eficiência de remoção nos processos de filtragem e retrolavagem em filtros de areia pressurizados.** *Teses de doutorado*. Campinas, Unicamp FEAGRI. 2014.
- De DEUS, F. P.; MESQUITA, M.; RAMIREZ, J. C. S.; TESTEZLAF, R.; DE ALMEIDA, R. C. **Hydraulic characterisation of the backwash process in sand filters used in micro irrigation.** *Biosystems Engineering*, v. 192, p. 188-198, 2020.
- DURAN-ROS, M.; PUJOL, J.; PUJOL, T.; CUFÍ, S.; ARBAT, G.; RAMÍREZ DE CARTAGENA, F.; PUIG-BARGUÉS, J. **Solid removal across the bed depth in média filters for drip irrigation systems.** *Agriculture*, v. 13, n. 2, p. 458, 2023.
- DURAN-ROS, M.; PUJOL, J.; PUJOL, T.; CUFÍ, S.; GRACIANO-URIBE, J.; ARBAT, G.; RAMÍREZ-CARTAGENA, f.; PUIG-BARGUÉS, J. **Efficiency of Backwashing in Removing Solids from Sand Media Filters for Drip Irrigation Systems.** *Agriculture*, v. 14, n. 9, p. 1570, 2024.
- GRACIANO-URIBE, J.; PUJOL, T.; HINCAPIE-ZULUAGA, D.; PUIG-BARGUÉS, J.; DURAN-ROS, M.; ARBAT, G.; DE CARTAGENA, F. R. **Bed expansion at backwashing in pressurised porous media filters for drip irrigation: Numerical simulations and analytical equations.** *Biosystems Engineering*, v. 223, p. 277-294, 2022.
- SALCEDO, J. C.; TESTEZLAF, R.; MESQUITA, M. **Processo da retrolavagem em filtros de areia usados na irrigação localizada.** *Engenharia Agrícola*, v. 31, p. 1226-1237, 2011.
- SALCEDO-RAMIREZ, J. C. **Efeito das características granulométricas e da altura da camada filtrante no processo de retrolavagem em filtros de areia.** *Dissertação de mestrado*. Campinas, Unicamp FEAGRI. 2010
- TESTEZLAF, R.; de DEUS, F. P.; MESQUITA, M. **Filtros de areia na irrigação localizada.** Livro. Campinas-SP. Unicamp FEAGRI. 2014.