

PERDA DE CARGA EM FILTROS ORGÂNICOS UTILIZADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA

ANTONIO T. DE MATOS¹, MARCOS A. DE MAGALHÃES², ANTOVER P. SARMENTO³

RESUMO: Com a realização deste trabalho, objetivou-se parametrizar a equação de evolução da perda de carga, para descrição do processo de filtração de água residuária da suinocultura. No preenchimento das colunas filtrantes, foram utilizados bagaço de cana-de-açúcar triturado, serragem de madeira e pergaminho de grãos de café. Dados de perda de carga em diferentes profundidades e tempos de operação dos filtros orgânicos foram coletados para ajuste das equações de perda de carga. Para as equações ajustadas, foram obtidos altos coeficientes de determinação, sendo que a significância dos coeficientes da regressão foi, na sua quase totalidade, de 1% de probabilidade, podendo ser utilizada na predição do comportamento dos filtros. As variáveis tempo de operação e profundidade das colunas filtrantes, constituídas pelos três materiais filtrantes, apresentaram comportamento quadrático na estimativa da perda de carga total. O tempo ideal de operação ininterrupta dos filtros, sem troca de material filtrante, foi de, aproximadamente, 1,5 h e, depois de corrido esse tempo, o material filtrante deverá ser substituído.

PALAVRAS-CHAVE: filtração, tratamento de efluentes, queda de pressão.

HEAD-LOSS EVOLUTION IN ORGANIC FILTERS FOR SWINE WASTEWATER TREATMENT

ABSTRACT: This work was developed to adjust the equation of head-loss, describing the head-loss process with the depth and operation time of organic filter utilized in treatment of swine wastewater. Sugarcane bagasse, sawdust and coffee husk, by-products of agricultural and agro-industrial activities, were used to fill the filter columns. Data on head-loss in different depths with the time of organic filters operation were collected to analyze the head-loss evolution. In head-loss equations as function of depth and filter operation time high values were obtained for the coefficients of determination and the regression coefficients presented, in almost, significant at 1% probability, predicting the behavior of the filters, constituted of sawdust, sugarcane bagasse and coffee husk. The variables, operation time and the filter columns depth, of the three filtering materials, presented quadratic behavior in the estimate of the total head-loss. The ideal time of the filters uninterrupted operation, without exchange of filtering materials, was approximately 1,5 h and, after this time, the filter material should be replaced.

KEYWORDS: filtering, wastewater treatment, pressure drop.

INTRODUÇÃO

Com vistas à proteção ambiental, torna-se recomendável o emprego de tecnologias que possam minimizar os riscos de poluição, efetuando-se tratamentos que possibilitem a disposição de resíduos, de forma adequada, no meio. Para aproveitamento agrícola ou para minimizar os custos do tratamento convencional de águas residuárias ricas em material orgânico em suspensão, tem sido recomendada a utilização de filtros orgânicos (MATOS et al., 2006), já que, no primeiro caso, possibilita que a aplicação seja feita de forma localizada (microaspersão e gotejamento), de baixo risco sanitário e ambiental, e no segundo possibilita significativa redução nos custos do tratamento

¹ Eng^o Agrícola, Prof. Associado, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa - MG, atmatos@ufv.br

² Eng^o Agrônomo, Professor da Faculdade de Ciências de Caratinga, marcos@ufv.br

³ Eng^o Agrícola, Mestrando em Engenharia Agrícola, Depto. de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa - MG, antoverps@hotmail.com

Recebido pelo Conselho Editorial em: 11-3-2009

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 12-12-2009

secundário e a retenção e aproveitamento de grande parte dos nutrientes contidos nas águas residuárias.

A remoção de sólidos em suspensão por filtração está baseada no princípio de que um meio poroso pode reter impurezas de dimensões menores do que as dos poros da camada filtrante. Com a gradativa obstrução dos poros do leito filtrante, há aumento na perda de carga no filtro. O fim da operação do filtro dar-se-á quando a completa obstrução proporcionar velocidades de escoamento do líquido em tratamento consideradas muito baixas.

SANTOS et al. (2004) afirmaram que, em estações de tratamento de água e de esgoto, os atributos comumente usados no monitoramento de sistemas de filtração são: a perda de carga nos filtros, o tempo de duração da operação de filtração, a concentração de sólidos suspensos totais (SST) e a turbidez do efluente.

Materiais filtrantes de menor granulometria proporcionarão a produção de um efluente mais depurado, embora proporcionem maior perda de carga nas camadas superiores da coluna filtrante, o que leva a períodos menores de operação do filtro. Materiais filtrantes de maior granulometria vão permitir maior penetração de partículas ao longo do perfil do meio filtrante, maior volume de vazios (porosidade) para remoção e armazenamento de partículas suspensas, maiores períodos de operação do filtro e mais fácil limpeza por reversão do fluxo, entretanto devem proporcionar menor eficiência na remoção de SST. Lo MONACO (2001), avaliando a influência da granulometria do material na eficiência de remoção de poluentes e na taxa de filtração obtida, recomendou o uso de granulometrias entre 2 e 3 mm, por serem as que proporcionaram mais eficiente filtração sem aumentar em demasia a perda de carga no sistema.

Lo MONACO et al. (2002), ao utilizarem filtros orgânicos no tratamento da água residuária do descascamento/despolpa de frutos do cafeeiro, obtiveram remoções de sólidos totais (ST) de até 65% quando se utilizou meio filtrante constituído por serragem de madeira; no caso de filtro constituído de bagaço de cana-de-açúcar, a remoção foi menor, alcançando eficiência de remoção de 40%. Em ambos os filtros, a remoção foi de 100% dos sólidos sedimentáveis, 75 a 85% do nitrogênio total (N-total) e 50% do fósforo total (P-total).

Os mesmos autores reportaram remoções acima de 60% da DBO dessas águas residuárias, utilizando-se de filtros de serragem de madeira. Lo MONACO et al. (2004) afirmaram que a faixa granulométrica correspondente ao maior diâmetro do material foi mais eficiente na remoção da DBO e DQO de água residuária da suinocultura, obtendo-se 40 e 80%, respectivamente. No caso de ST, a maior granulometria foi mais eficiente, obtendo-se remoções em torno de 70%. A menor granulometria mostrou-se mais eficiente na remoção de N-total, obtendo-se valores em torno de 50%. Não houve influência da granulometria do material na remoção de P-total, embora se tenha conseguido remoções de até 65%. O sódio e o potássio não foram removidos enquanto mais de 95% do cobre e do zinco foram removidos nos filtros constituídos por material de menor granulometria. MAGALHÃES et al. (2005), utilizando filtros de serragem de madeira, obtiveram remoções de 90 a 99% dos SSTs presentes em águas residuárias da suinocultura e de 81 a 96% quando foram utilizados filtros de bagaço de cana-de-açúcar.

De acordo com esses autores, para que não haja diminuição na eficiência de remoção de SST e decréscimo muito acentuado na velocidade de filtração da água residuária, a compressão dos materiais filtrantes, tais como o bagaço de cana-de-açúcar e a serragem de madeira, no acondicionamento do material nos filtros, deve ser tal que promova redução de 5 a 10% no volume da serragem de madeira e de 10 a 15% no caso do bagaço de cana-de-açúcar. Compressões semelhantes foram recomendadas por MATOS et al. (2006) para serem exercidas em pergaminho triturado de grãos de café, a fim de se obterem satisfatórias remoções de sólidos em suspensão de águas residuárias do descascamento/despolpa dos frutos do cafeeiro.

Embora já se reconheça a eficiência dos filtros orgânicos na remoção de poluentes (BRANDÃO et al., 2003; MATOS et al., 2003; MAGALHÃES et al., 2006a; MATOS et al., 2006)

e o valor do composto orgânico a ser obtido a partir do material filtrante dele retirado (MAGALHÃES et al., 2006b), pouco se sabe sobre algumas questões operacionais dos filtros, tais como a medição e o entendimento do comportamento da perda de carga com o tempo; assim, com a realização deste trabalho, objetivou-se parametrizar a equação de evolução da perda de carga como função da profundidade e tempo de operação de filtros orgânicos utilizados no tratamento de água residuária da suinocultura.

MATERIAL E MÉTODOS

O sistema de filtração instalado, operado e monitorado na Área Experimental de Hidráulica/Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, foi constituído por recipientes metálicos (tonéis) como colunas filtrante, com as seguintes dimensões: 0,58 m de diâmetro por 1,30 m de altura.

Os materiais orgânicos (bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira e pergaminho de grãos de café) foram triturados e peneirados e, em seguida, acondicionados nas colunas filtrantes de forma gradual, em camadas de aproximadamente 10 cm, até ser alcançada a altura total de 1,30 m.

No fundo de cada recipiente, foi instalado um sistema de drenagem por onde foi coletado o efluente filtrado, constituído por tubos de PVC de 50 mm de diâmetro, perfurados (furos com 2,0 mm de diâmetro). Para evitar a passagem de partículas do material filtrante e entupimento dos drenos, uma camada (h1) de 0,20 m, constituída de material grosseiro (partículas do mesmo material orgânico, nos diâmetros de 3,0 – 8,0 mm), foi disposta no fundo dos recipientes, cobrindo o dreno. Sobre a camada de material mais grosseiro (h1), foi disposta uma camada de material filtrante com 0,90 m de altura (h2) e com granulometria de 2,5 a 3,0 mm, seguindo-se recomendações de Lo MONACO (2001), sendo os filtros construídos conforme esquema apresentado na Figura 1.

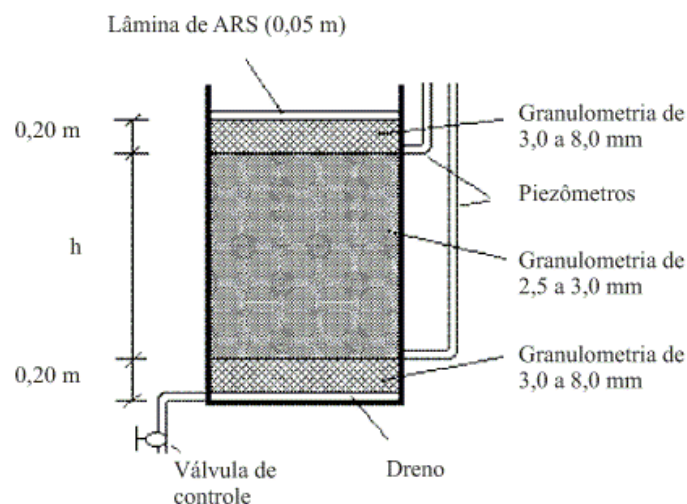


FIGURA 1. Esquema de montagem do filtro orgânico. **Organic filter outline.**

Para evitar que ocorresse rápida colmatação da camada superficial do filtro, foi disposta, sobre a coluna filtrante, uma camada de 20 cm de altura (h3), constituída de material de mesma granulometria do material que foi colocado junto aos drenos (3-8 mm).

Após a disposição de cada camada de resíduo na coluna, foi feita a compactação do material, sob compressão de $16,7 \text{ kN m}^{-2}$, equivalente à pressão exercida por um homem com massa de 50 kg, apoiado em um só pé. Para minimizar o fluxo preferencial da água residuária na parede interna da coluna de filtração, o material de preenchimento foi comprimido com as pontas dos dedos em toda a periferia do filtro, durante a fase de enchimento do mesmo.

Após a compactação do material filtrante acondicionado na coluna de filtração, foi aplicada lâmina da água residuária da suinocultura (ARS), por fluxo descendente, para que este operasse na condição saturada durante todo o tempo.

Nas colunas de filtração, foram instalados dez piezômetros (Figura 2), a fim de se poder quantificar e monitorar, ao longo do tempo, a perda de carga no sistema.

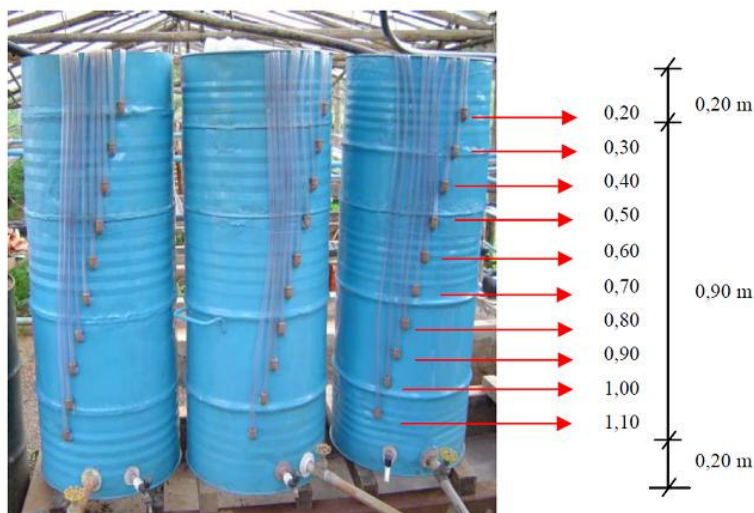


FIGURA 2. Colunas de filtração com detalhamento dos piezômetros. **Filtration columns with detailed piezometers.**

O monitoramento da perda de carga nos filtros orgânicos foi feito por meio de leituras das alturas do líquido nos piezômetros, efetuadas a cada 15 min, utilizando-se de réguas graduadas (em cm), fixadas paralelamente aos piezômetros.

O primeiro piezômetro (P1) foi instalado a 0,20 m do nível superior do filtro, isto é, imediatamente após o término da camada denominada h1, na transição entre o material mais grosseiro (3,0-8,0 mm) e o material filtrante com granulometria mais fina (2,5-3,0 mm). A partir desse piezômetro, foram instalados mais nove piezômetros espaçados entre si de 0,10 m de diferença de nível, até alcançar a camada denominada h3, transição entre o material filtrante com granulometria mais fina e o material mais grosseiro, posicionado no fundo dos filtros.

Antes de se iniciar a operação dos filtros orgânicos com ARS, foi feita a aplicação de água “limpa” para se avaliar a perda de carga ocorrida nas colunas de filtração.

A água residuária utilizada no experimento foi coletada em tanque de concreto de 5 m x 3 m x 3 m, onde eram estocados os efluentes gerados nas instalações da suinocultura da UFV, e conduzida ao tanque de distribuição, de onde foi transferida, por gravidade, aos filtros. O tanque de estocagem das águas residuárias brutas peneiradas ficou localizado em local que possibilitou a sua distribuição, por gravidade, sobre a superfície dos filtros.

A ARS coletada passou, previamente, por processo de pré-filtragem através de uma tela com malha de 0,635 mm de diâmetro (40 mesh), com o objetivo de reter os materiais mais grosseiros que poderiam ser removidos por simples decantação e que, estando presentes, poderiam comprometer o desempenho dos filtros orgânicos. A tela foi fixada numa estrutura de madeira, cujo conjunto foi instalado sobre o tanque, sendo instalado com uma inclinação de aproximadamente 45° e operou de forma estática, com limpeza automática, por gravidade. Na tubulação que conduziu a água residuária até a coluna de filtração, foi instalada uma válvula para permitir controle da vazão de alimentação do sistema.

Antes de os filtros serem operados, tomou-se o cuidado de eliminar o ar presente no espaço poroso do material filtrante, o que foi feito mediante o enchimento vagaroso da coluna filtrante com

ARS. Durante esse enchimento, a válvula de controle instalada na base do filtro foi mantida fechada, até o enchimento total do filtro com a ARS. Em seguida, iniciada a aplicação da ARS, a válvula de saída do efluente foi aberta para dar vazão ao líquido, permitindo o movimento do líquido nos interstícios do material filtrante, sendo as colunas mantidas saturadas, na condição de filtro lento. Durante todo o período de filtração, procurou-se manter uma lâmina permanente de 10,0 cm da ARS sobre a superfície do filtro por meio de controle das válvulas, o que constituiu a carga hidrostática sobre o material filtrante.

No período de operação dos filtros, as águas residuárias armazenadas na caixa de distribuição foram sistematicamente revolvidas para que não houvesse sedimentação do material no fundo do recipiente. A operação dos filtros orgânicos foi contínua e foi encerrada assim que a taxa de filtração passou a ser menor que $0,2 \text{ L m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, considerada demasiadamente lenta para manter o sistema em operação. Uma vez suplantada a capacidade dos filtros em reter poluentes, os materiais utilizados como meio filtrante foram removidos das colunas e descartados para tratamento pelo processo de compostagem. O experimento foi conduzido com quatro concentrações de sólidos em suspensão dos afluentes e três repetições para cada material.

Os dados de perda de carga nas colunas filtrantes, obtidos com a variação de nível da ARS nos piezômetros durante a operação dos filtros, foram submetidos à análise de variância e análise de regressão linear múltipla. Para cada filtro orgânico testado, foram ajustadas, por regressão, equações matemáticas relacionando os valores de perda de carga com o tempo de operação do filtro e a profundidade de camada dos filtros, sendo essas escolhidas com base nos critérios de significância dos estimadores dos coeficientes de regressão, até o nível de 1% de probabilidade, e nos valores do coeficiente de determinação, sendo plotadas as superfícies de resposta. Para a execução das análises e confecção dos gráficos de superfície de resposta, foram utilizados os programas estatísticos SAEG versão 9.0 e Sigma Plot versão 8.0, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A operação dos filtros com água “limpa” (H_0) proporcionou perda de carga total inicial de 1,6; 2,0 e 1,1 cm.c.a. (centímetros de coluna d’água), respectivamente, para filtros de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar triturado e pergaminho dos grãos de café. Operando dessa forma, verificou-se, em alguns filtros, redução da perda de carga com o tempo, o que pode ser decorrente da desobstrução de poros, mas, principalmente, em razão de um possível aumento no tamanho dos poros, provocado pelo entumescimento do material.

Após aproximadamente 5 minutos de operação, foram observadas maior regularidade e estabilidade na perda de carga desses filtros, não mais se alterando com o tempo. Após 30 minutos de operação dos filtros de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar triturado e pergaminho dos grãos de café, as perdas de cargas proporcionadas à passagem da água “limpa” mantiveram-se inalteradas, permanecendo em 1,3; 1,6 e 0,9 cm.c.a., respectivamente.

As perdas de carga obtidas, por camada, com o tempo de operação do processo de filtração da ARS peneirada e as taxas de filtração estão apresentadas na Tabela 1.

De forma geral, a taxa de filtração da ARS foi maior nos filtros constituídos por pergaminho de grãos de café, indicando que esse material apresenta maior macroporosidade e menor potencial de entupimento com o tempo. Todavia, esse comportamento não pode ser tomado como positivo para a filtração, tendo em vista que, quanto maior a velocidade de percolação, menor é a eficiência do filtro na remoção dos sólidos.

TABELA 1. Perdas de carga obtidas, em cm.c.a., em diferentes camadas e taxas de filtração nos filtros de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar e pergaminhos de grãos de café em função do tempo de operação durante a filtração da ARS. **Obtained head-loss in different depths and the filtration rate in sawdust, sugarcane bagasse and coffee husk filters in function of operation time during filtration of the swine wastewater.**

Serragem de Madeira											
Tempo (min)	Camadas (cm)										Taxa de filtração ($L m^{-2} s^{-1}$)
	0-20	0-30	0-40	0-50	0-60	0-70	0-80	0-90	0-100	0-110	
1	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,10	2,20	2,70	2,80	3,00	-
15	2,00	3,00	3,70	3,80	3,90	4,00	4,00	4,50	4,90	5,00	1,00
30	4,00	5,10	6,20	6,60	6,60	7,20	8,30	8,80	10,00	13,30	0,90
45	4,60	6,20	6,80	7,00	8,50	9,70	11,30	14,00	18,00	21,40	0,85
60	6,20	6,70	7,30	7,50	9,90	12,00	16,00	25,00	34,00	63,20	0,76
75	6,80	7,00	8,00	9,00	11,70	14,00	21,00	33,00	45,00	74,50	0,50
90	7,00	8,10	10,30	11,00	13,70	16,80	24,20	39,60	52,00	90,60	0,30
100	8,00	9,20	18,00	18,30	20,00	22,00	29,00	49,00	65,00	100,00	< 0,20
Bagaço de Cana-de-Açúcar											
Tempo (min)	Camadas (cm)										Taxa de filtração ($L m^{-2} s^{-1}$)
	0-20	0-30	0-40	0-50	0-60	0-70	0-80	0-90	0-100	0-110	
1	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,10	3,20	3,40	-
15	3,50	3,60	3,60	3,70	3,80	4,00	4,00	4,50	5,00	6,00	1,10
30	3,90	5,10	6,20	6,40	6,60	6,60	8,30	9,80	11,00	15,00	0,92
45	4,60	6,20	6,80	7,00	8,50	10,70	16,30	24,00	26,00	28,00	0,88
60	6,40	6,70	7,90	8,50	10,90	16,00	22,00	35,00	44,00	70,00	0,69
75	7,20	7,60	11,00	13,00	19,70	22,00	31,00	43,00	75,00	92,00	0,45
90	8,00	9,10	16,30	19,00	29,70	36,80	50,20	64,60	92,00	101,00	0,27
100	9,00	12,20	18,00	22,30	33,00	42,00	58,00	77,00	95,00	106,00	< 0,20
Pergaminho de Grãos de Café											
Tempo (min)	Camadas (cm)										Taxa de filtração ($L m^{-2} s^{-1}$)
	0-20	0-30	0-40	0-50	0-60	0-70	0-80	0-90	0-100	0-110	
1	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	-
15	1,50	1,60	2,10	2,20	2,60	2,80	3,00	3,00	3,20	3,40	1,20
30	3,90	4,20	4,20	4,60	4,60	5,20	8,30	8,80	10,00	12,80	0,98
45	5,20	6,00	6,10	6,90	7,00	9,40	11,30	14,00	18,00	19,00	0,89
60	6,10	6,70	7,00	7,30	9,00	11,00	14,00	23,00	31,00	37,00	0,80
75	6,60	6,90	9,00	9,00	11,70	14,00	21,00	33,00	45,00	62,00	0,55
90	7,00	8,10	12,30	18,00	23,70	36,80	44,20	59,60	72,00	80,00	0,33
100	7,20	8,30	26,30	26,30	30,00	42,00	69,00	79,00	95,00	110,00	< 0,20

Nas Figuras 3; 4 e 5, estão apresentados os dados de perda de carga relativa por camada em função do tempo de operação, sendo esta a razão entre a perda de carga da camada pela perda de carga total no mesmo tempo de operação.

Observando as Figuras de 4 a 6, verifica-se que, no início de operação dos filtros, a maior parte da perda de carga ocorre na camada de 0-20 cm. Com o decorrer do tempo, a perda de carga na camada de 0-20 cm foi decrescendo, comparativamente ao que foi observado nas outras camadas

do filtro, principalmente quando comparado às camadas de 80-90, 90-100 e 100-110 cm. Essas camadas mais profundas do filtro passaram a apresentar, juntas, a maior parte da perda de carga ocorrente no filtro, tendo sido obtidos valores de 50% a 70% da perda de carga total.

Com base no que está apresentado nas figuras, conclui-se que o tempo de operação dos filtros orgânicos deva ser de, aproximadamente, 1h30, já que maior tempo de operação dos filtros proporciona taxa de filtração demasiadamente baixa, tornando o processo muito moroso. Como a camada superior dos filtros correspondente aos 70 cm mais superficiais da coluna, após 1h30 de operação, representaram 19; 37 e 46% da perda de carga total, respectivamente, para os filtros de serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar triturado e pergaminho de grãos de café. Conclui-se que, decorrido o referido período de operação dos filtros, seja feita a substituição de todo o material do filtro e não apenas das camadas mais superficiais.

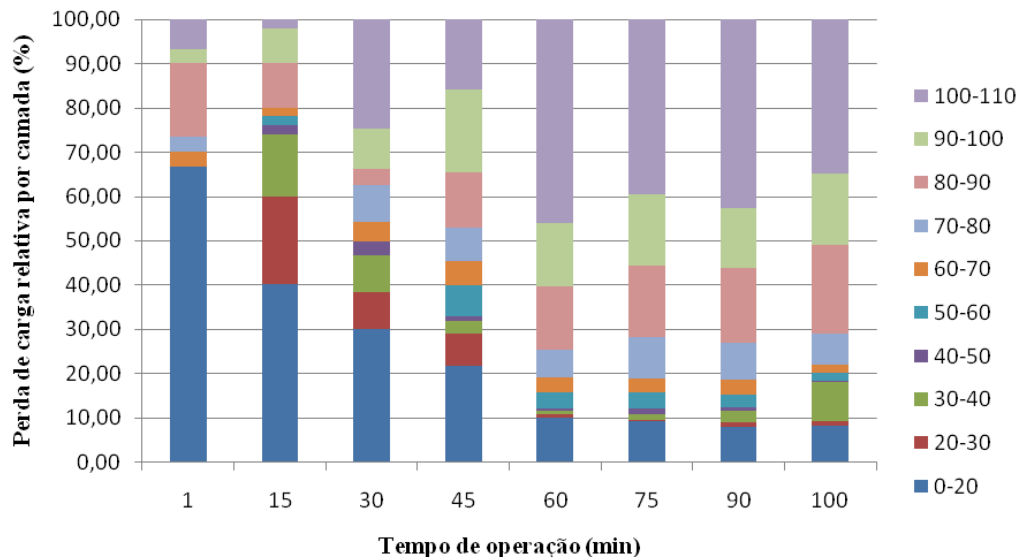


FIGURA 3. Perda de carga relativa por camada de serragem em função do tempo. **Relative head-loss by layer of sawdust in function of operation time.**

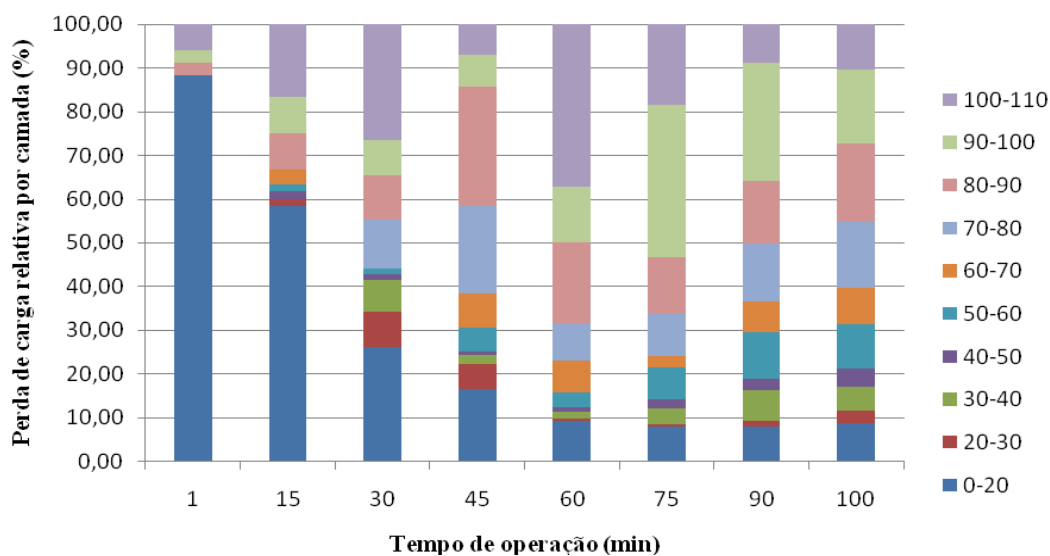


FIGURA 4. Perda de carga relativa por camada de bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo. **Relative head-loss by layer of sugarcane bagasse in function of operation time.**

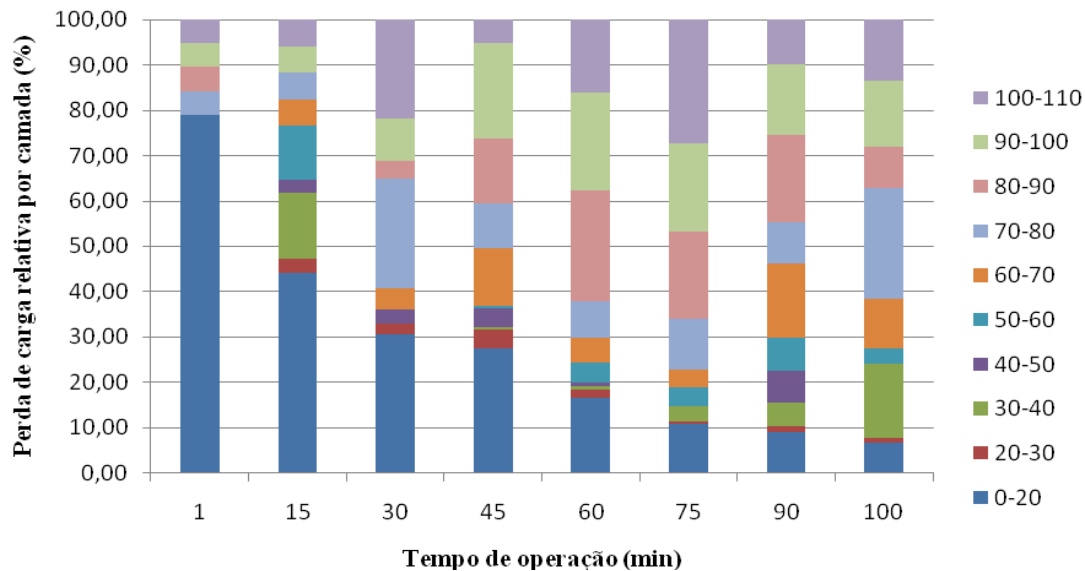


FIGURA 5. Perda de carga relativa por camada de pergaminho do café em função do tempo. **Relative head-loss by layer of coffee husk in function of operation time.**

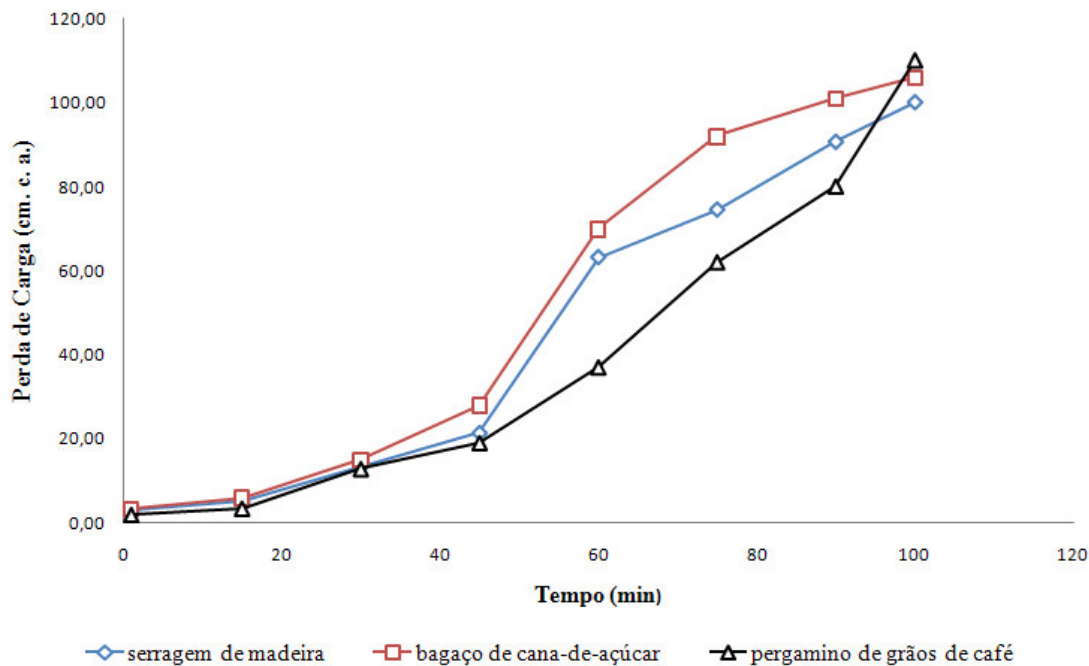


FIGURA 6. Perda de carga total com o tempo de operação nos filtros operando com ARS. **Total head-loss in function of the operation time with swine wastewater.**

O tempo de operação dos filtros poderia ser considerado, numa primeira análise, muito baixo, o que poderia inviabilizar seu emprego no tratamento da ARS, porém há de se ressaltar que se estima que cada m^2 de área superficial de filtro orgânico seja suficiente para o tratamento da água residuária produzida, em um dia, por cerca de 360 animais, o que é indicativo de grande eficiência no que se refere a volume tratado em relação a volume de sistema de tratamento. Além disso, há de se ressaltar que ainda não há existirem informações sobre a capacidade filtrante do mesmo material após ter sido interrompida a aplicação de água residuária. Acredita-se que parte da capacidade filtrante seja retomada, em razão das alterações físicas provocadas pelo ressecamento do material e alterações estruturais proporcionadas pelos microrganismos, o que deve ser, ainda, objeto de investigação.

Na Figura 6, estão apresentadas as perdas de carga total (H_o) nos filtros operados com ARS peneirada em função do tempo de operação. Verifica-se que, ao contrário do que ocorreu nos filtros orgânicos operados com água “limpa”, cuja perda de carga permaneceu constante para todos os materiais avaliados, a perda de carga aumentou com o tempo de operação.

Pode-se observar que a perda de carga nos filtros aumentou com o tempo de operação dos mesmos, ou seja, com a quantidade de SST retido no material filtrante, até provocar entupimento dos poros das camadas superficiais que proporcionaram baixa taxa de filtração da ARS.

Nos filtros de bagaço de cana-de-açúcar, ocorreram as maiores perdas de carga com o tempo de operação. Isto ocorreu, provavelmente, devido ao bagaço de cana-de-açúcar triturado apresentar fibras longas e finas, as quais proporcionaram a formação de espaço poroso de mais fácil obstrução. O pergaminho dos grãos de café, ao contrário, tem formação geométrica que dificulta o assentamento das partículas no filtro, o que lhe confere maior porosidade. Além disso, apresenta menor compressibilidade do que os outros materiais orgânicos avaliados.

Como houve significativo efeito dos tratamentos (tipo de material filtrante), a 1% de probabilidade, na perda de carga total nos filtros, aos dados obtidos foram ajustadas equações matemáticas, obtendo-se a variável perda de carga em função da profundidade e do tempo, para os diferentes materiais orgânicos estudados, as quais estão apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2. Equações de regressão ajustadas para a variável perda de carga em função da profundidade e do tempo para os diferentes materiais orgânicos estudados.
Regression equations adjusted for the head-loss variable on the depth and time for different organic materials studied.

Materiais Orgânicos	Equações Ajustadas	R ²
Serragem	$H_t = -1,2535 + 0,2582^{***} t + 0,2880^* p - 0,01766^{***} tp - 0,003208^{***} p^2 + 0,0003873^{***} t^2p + 0,0002140^{***} tp^2$	0,94
Bagaço	$H_t = 2,6046 + 0,1090^{***} t - 0,0108^{***} tp + 0,0001379^{***} tp^2 + 0,00007025 t^2p$	0,98
Pergaminho	$H_t = 3,5531 + 0,3085^{***} t - 0,003261^{***} t^2 - 0,01612^{***} tp + 0,0001738^{***} t^2p + 0,0001042^{***} tp^2$	0,94

Sendo: H_t : perda de carga; t: tempo; p: profundidade; *** e *: significativo ao nível de 1 e 10% de probabilidade

Nas Figuras 7; 8 e 9, estão apresentadas, respectivamente, as superfícies de resposta da perda de carga nos filtros de serragem de madeira, de bagaço de cana-de-açúcar e de pergaminho de grãos de café, em função do tempo de operação dos filtros orgânicos e da profundidade da camada filtrante.

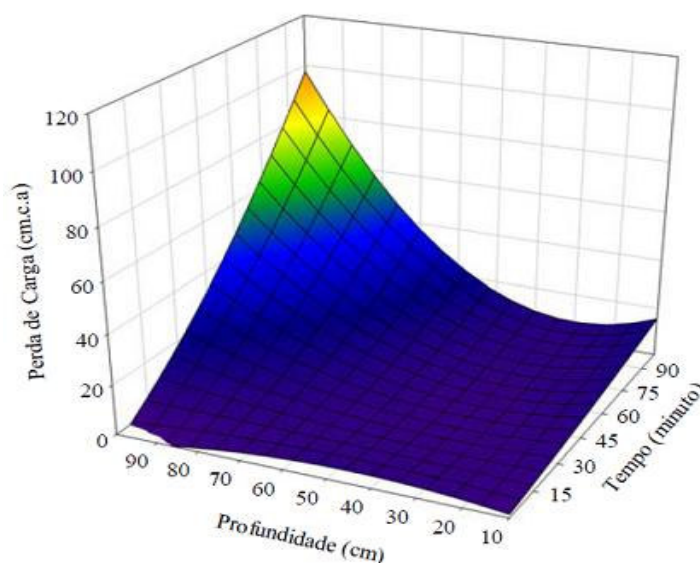


FIGURA 7. Superfície de resposta à perda de carga total nos filtros de serragem de madeira.
Response surface to the total head-loss on sawdust filters.

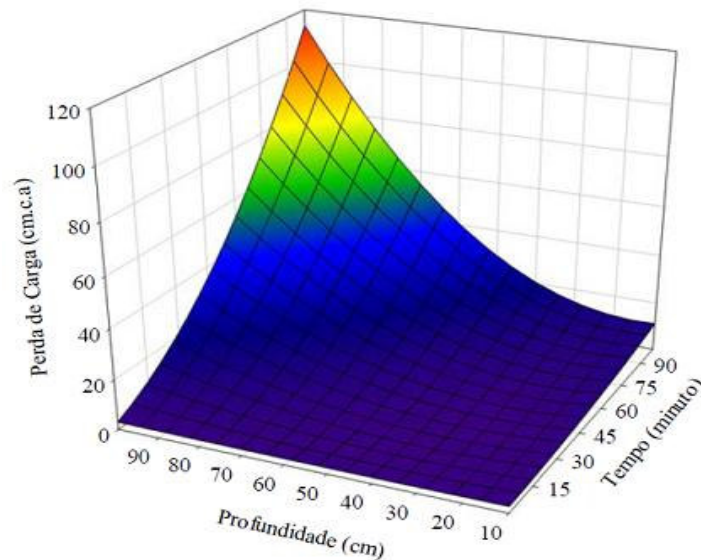


FIGURA 8. Superfície de resposta à perda de carga total nos filtros de bagaço de cana-de-açúcar. **Response surface to the total head-loss on sugarcane bagasse filters.**

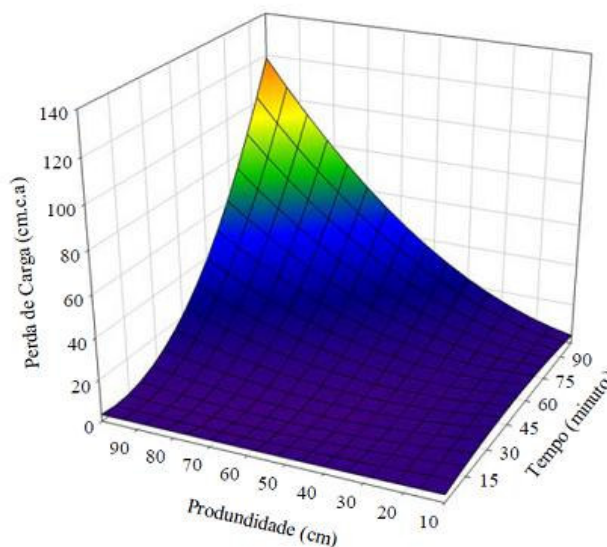


FIGURA 9. Superfície de resposta à perda de carga total nos filtros de pergaminhos de grãos de café. **Response surface to the total head-loss on coffee husk filters.**

Conforme pode ser verificado na Tabela 2 e nas Figuras 7 a 9, as variáveis tempo de operação e profundidade das colunas filtrantes, constituídas pelos três materiais filtrantes, apresentaram comportamento quadrático na estimativa da perda de carga total. Verifica-se, com base no comportamento do filtro, no que se refere à perda de carga, que não há vantagem operacional de se utilizarem filtros orgânicos de grandes alturas. Esses resultados corroboram os obtidos por MAGALHÃES et al. (2006a), que afirmaram não haver vantagem, em termos de eficiência na remoção de poluentes, na utilização de filtros orgânicos de altura maior que 1,20 m.

CONCLUSÕES

De forma geral, a taxa de filtração da ARS foi maior nos filtros constituídos por pergaminho de grãos de café, quando comparados aos constituídos por bagaço de cana-de-açúcar e serragem de madeira.

No início de operação dos filtros, a maior parte da perda de carga ocorreu na camada de 0-20 cm, posteriormente, maiores perdas passaram a ocorrer nas camadas de 80-90, 90-100 e 100-110 cm, que, somadas, equivaleram de 50% a 70% da perda de carga total no sistema.

As variáveis tempo de operação e profundidade das colunas constituídas pelos três materiais filtrantes apresentaram comportamento quadrático em relação à perda de carga total, proporcionando rápido aumento na perda de carga no sistema.

No tratamento da água residuária da suinocultura, o tempo ideal de operação contínua dos filtros sem troca de material filtrante foi de, aproximadamente, 1h30 e, após decorrido esse tempo, o material filtrante deve ser substituído.

REFERÊNCIAS

- BRANDÃO, V.S.; MATOS, A.T.; FONTES, M.P.F.; MARTINEZ, M.A.A. Retenção de poluentes em filtros orgânicos operando com águas residuárias da suinocultura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.7, n.2, p.329-334, 2003.
- Lo MONACO, P.A. *Influência da granulometria do material orgânico filtrante na eficiência de tratamento de águas residuárias*. 2001. 115 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Ambientais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2001.
- Lo MONACO, P.A.; MATOS, A.T.; JORDÃO, C.P.; CECON, P.R.; MARTINEZ, M.A. Influência da granulometria da serragem de madeira como material filtrante no tratamento de águas residuárias. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.8, n.1, p.116-119, 2004.
- Lo MONACO, P.A.; MATOS, A.T.; MARTINEZ, M.A.; JORDÃO, C.P. Eficiência de materiais orgânicos filtrantes no tratamento de águas residuárias da lavagem e despolpa dos frutos do cafeeiro. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa - MG, v.10, n.1-4, p.40-47, 2002.
- MAGALHÃES, M.A.; MATOS, A.T.; AZEVEDO, R.F.; DENICULI, W. Influência da compressão no desempenho de filtros orgânicos para tratamento de águas residuárias da suinocultura. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa - MG, v.13, n.1, p.26-32, 2005.
- MAGALHÃES, M.A.; MATOS, A.T.; DENÍCULI, W.; TINOCO, I.F.F. Compostagem de bagaço de cana-de-açúcar triturado utilizado como material filtrante de águas residuárias da suinocultura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.10, n.2, p.466-471, 2006b.
- MAGALHÃES M. A.; MATOS A.T.; DENÍCULI, W.; TINOCO, I.F.F. Operação de filtros orgânicos utilizados no tratamento de águas residuárias de suinocultura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, Campina Grande, v.10, n.2, p.472-478, 2006a.
- MATOS, A.T.; BRANDÃO, V.S.; NEVES, J.C.L.; MARTINEZ, M.A.A. Removal of Cu and Zn from swine wastewater using organic filters. *Environmental Technology*, London, v.24, n.2, p.171-178, 2003.
- MATOS, A.T.; MAGALHÃES, M.A.; FUKUNAGA, D.C. Remoção de sólidos em suspensão na água residuária da despolpa de frutos do cafeeiro em filtros constituídos por pergaminho de grãos de café submetido a compressões. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.26, n.2, p.610-616, 2006.
- SANTOS, H.R.; PRADO, G.S.; VIDAL, C.M.S.; MORUZZI, R.B.; CAMPOS, J.R. Aplicabilidade das técnicas de determinação de tamanho de partículas em sistemas de tratamento de água e esgoto sanitário. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v.9, n.4, p.291-300, 2004.