

II-064 - USO DE TRAÇADOR SALINO PARA AVALIAÇÃO DA COLMATAÇÃO EM SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS DE ESCOAMENTO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL

Mateus Pimentel de Matos⁽¹⁾

Engenheiro Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Recursos Hídricos e Ambientais pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFV. Doutorando em Saneamento no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Marcos von Sperling⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre em Engenharia Sanitária pela UFMG. Doutor em Environmental Engineering - Imperial College, London. Professor Titular da UFMG.

Antonio Teixeira de Matos⁽³⁾

Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Engenharia Agrícola pela UFV. Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela UFV. Professor Titular da UFV.

Ricardo Gomes Passos⁽⁴⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Doutorando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Engenheiro na Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária - INFRAERO.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Antonio Carlos, 6627, Campus Pampulha, Escola de Engenharia, Bloco 1, 4º andar. Belo Horizonte-MG. e-mail: matmatos_eaa@yahoo.com.br

RESUMO

Sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial (SAC-EHSS) são unidades que, pelo seu princípio de funcionamento, acabam por acumular sólidos no meio poroso. Esse processo de contínua obstrução dos poros, conhecido como colmatção, concorre para diminuição no tempo de detenção hidráulica (TDH), com risco de perda de eficiência do sistema. Diante disso, requer-se a investigação dos fatores que aceleram o fenômeno e de técnicas que permitam caracterizar o grau de obstrução dos poros. O papel das plantas ainda não é totalmente conhecido, podendo tanto atuar no sentido de diminuição no volume de poros como atenuação do fenômeno. A investigação da condição dos SAC pode ser feita utilizando-se algumas técnicas que, no entanto, apresentam inconsistências. O uso de traçadores esbarra na seleção da substância a ser utilizada com esse fim, que pode influenciar nas respostas da obtenção do TDH, em problemas com toxicidade para plantas e microrganismos, baixa recuperação e alteração na densidade. O cloreto de sódio (NaCl), representante dos traçadores salinos, em função da elevada concentração dos íons no *background*, requer aplicação de grandes quantidades, o que pode contribuir para aumento na densidade da solução traçadora. No entanto, dada a facilidade na sua aquisição e monitoramento, torna-se opção de grande potencialidade para uso. Dessa forma, utilizou-se NaCl para obtenção do TDH de dois SAC, um plantado com taboa (*Typha latifolia*) e outro mantido sem plantas, para comparação do grau de colmatção, além de avaliar a influência da presença da planta na ocorrência do fenômeno. Como a recuperação do sal depende do estágio de crescimento das plantas, já que depende do potencial de sua absorção, compararam-se as respostas obtidas antes e após o corte da parte aérea no SAC plantado. Os valores calculados de menores TDH e eficiência volumétrica (e_v) indicaram que a unidade controle (sem plantas) encontra-se mais colmatada. Além disso, observou-se a adequabilidade do traçador salino para comparação dos SAC, mesmo que tenha ocorrido menor recuperação após o corte da parte aérea das plantas, uma vez que os valores de TDH mantiveram-se próximos.

PALAVRAS-CHAVE: cloreto de sódio, eficiência volumétrica, esgotos; obstrução, plantas, *wetlands* construídos.

INTRODUÇÃO

Sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial (SAC-EHSS) ou *wetlands* construídos são sistemas de tratamento constituídos por canais impermeabilizados, preenchidos com um substrato, seja brita, areia, cascalho, escória ou mesmo solo, plantados ou sem cobertura vegetal, em que a água residuária

escoa em subsuperfície (MATOS et al., 2010). Nesses sistemas de tratamento, a remoção de poluentes ocorre por mecanismos físicos, químicos e biológicos, que contribuem para o aumento na concentração de sólidos, diminuindo o espaço poroso do meio, no fenômeno conhecido como colmatção (KADLEC; WALLACE, 2009). O conhecimento dos fatores e de técnicas de identificação do grau de colmatção torna-se importante à medida que esse fenômeno pode ocasionar perda de eficiência ou mesmo colapso do sistema (ROUSSEAU et al., 2005).

Os principais fatores que levam à colmatção ainda têm sido objeto de diversos estudos, permanecendo a dúvida, por exemplo, do papel das plantas nesse fenômeno. Essas poderiam contribuir para o aumento na concentração de sólidos em razão da queda e morte de suas partes vegetais, além da ocupação dos poros pelas raízes e rizomas, favorecendo a redução na condutividade hidráulica e porosidade drenável do meio (TANNER; SUKIAS, 1995; BLAZEJWSKI e MURAT-BLAZEJEWSKA, 1997; PEDESCOLL et al., 2011; PAOLI; VON SPERLING, 2013a). Por outro lado, outros autores argumentam que a expansão do meio suporte pela penetração das raízes ("empolamento") e a criação de caminhos pela morte das raízes e rizomas, além do favorecimento de uma maior comunidade microbiana contrabalanceiam em favor da maior porosidade drenável em SAC plantados (BRIX, 1997; MATOS et al., 2008; TURON et al., 2009; FU et al., 2013).

Dentre os métodos disponíveis para identificação do grau de colmatção, citam-se o direto, de coleta e quantificação da concentração de sólidos acumulados no meio poroso, que é invasivo e requer interrupção e drenagem do sistema; medição da condutividade hidráulica, que caracteriza melhor as condições de escoamento em SAC verticais (SAC-EV); e o uso de traçadores para obtenção do tempo de detenção hidráulica (TDH) do meio poroso. Por meio desse método, monitora-se a concentração de uma determinada substância, obtendo o TDH real, que é comparado ao seu valor teórico de projeto (Volume/Vazão). Quanto menor o tempo gasto para que o traçador atravesse o sistema, que pode estar associado à formação de caminhos preferenciais e escoamento superficial no sistema, mais colmatado está o SAC (CHAZARENC et al., 2003). Além do TDH, é possível obter, também, o número de tanques em série, o número de dispersão, observando se o fluxo se aproxima mais do fluxo em pistão ou de mistura completa (LEVENSPIEL, 2000; METCALF; EDDY, 2003; KADLEC; WALLACE, 2009). Um dos inconvenientes do método é, porém, que alguns traçadores podem influenciar nos resultados obtidos em campo. A rodamina WT pode apresentar baixas porcentagens de recuperação, em razão da ocorrência de adsorção irreversível e de fotodegradação (LIN et al., 2003; KEEFE et al., 2004; SILVA et al., 2009). Densidade da solução traçadora maior que a do líquido presente no meio poroso pode ocasionar fluxo preferencial vertical, proporcionando superestimativa do TDH (KING et al., 1997; GRISMER et al., 2001; CHAZARENC et al., 2003; POSSMOSER-NASCIMENTO, 2014). Traçadores salinos, em razão das relativamente grandes concentrações presentes dos íons no *background*, e diante da necessidade de se destacar em relação aos valores comumente encontrados no meio, requerem a adição de maiores quantidades (HEADLEY; KADLEC, 2007). Além disso, dependendo do estágio de crescimento das plantas, pode haver maior ou menor absorção de íons em solução, alterando as porcentagens de recuperação do traçador (WHITMER et al., 2000; GE et al., 2007). Outras substâncias podem ainda ser prejudiciais às condições do leito, às plantas ou aos operadores, como o cloreto de lítio e as substâncias radioativas (SCHMID et al., 2004; FERREIRA, 2012).

O cloreto de sódio (NaCl), como representante da classe de traçadores salinos, também apresenta as mesmas vantagens. Entretanto, dada as restrições que também existem quanto ao uso de outras substâncias e diante da facilidade de sua aquisição, dos baixos custos e da simplicidade de seu monitoramento, torna-se alternativa viável de uso (SCHMID et al., 2004; COTA et al., 2011). Dessa forma, utilizou-se o NaCl como substância traçadora, para obtenção das condições hidrodinâmicas de dois SAC-EHSS, um plantado com taboa (*Typha latifolia*) e outro mantido sem vegetação (controle), para comparação do grau de colmatção das duas unidades e avaliação da influência da planta no fenômeno. Para avaliação das porcentagens de recuperação do traçador em função do estágio de crescimento das plantas, compararam-se as respostas obtidas antes (estádio de florescimento) e após (estádio de crescimento) o corte da parte aérea das plantas, no SAC plantado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes com traçadores foram realizados em dois sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial (SAC-EHSS), em escala real para o tratamento de esgotos sanitários de pequenas comunidades (projeto para 50 habitantes cada), instalados no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS), UFMG/Copasa. A unidade experimental está locada na Estação de Tratamento de Esgotos da bacia

hidrográfica do Ribeirão Arrudas (ETE Arrudas), em Belo Horizonte, MG. Os dois reatores avaliados fazem o pós-tratamento do efluente de um mesmo reator UASB, entraram em operação em 2007 e têm comprimento de 25,0 m, largura de topo de 3,0 m e altura total do substrato (escória de alto forno, d_{10} de 19 mm, com índice de vazios igual a $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) de 0,4 m, incluindo 0,1 m de folga (camada não saturada). No entanto, como em grande parte de ambos os leitos ocorre escoamento superficial da água residuária, considerou-se a altura útil igual à total. Ambos os SAC-EHSS são alimentados, de forma contínua, com esgoto sanitário previamente tratado em um reator UASB.

Em todos os três testes, adicionou-se uma massa de 10,0 kg de sal de cozinha em 150 L de água, proporcionando uma concentração de $133,33 \text{ g L}^{-1}$ de NaCl na solução. Esse valor de concentração é inferior ao da solubilidade do NaCl em água, o que garantiu uma mistura completa do sal, sendo semelhante ao utilizado por Chazarenc et al. (2003). O monitoramento das unidades prosseguiu até que a condutividade elétrica (CE) alcançasse valores normais ao meio, quando não havia mais influência do traçador. Na Tabela 1 está apresentado o resumo das condições dos testes efetuados. Seguindo-se recomendação de Bracho et al. (2009), citada por Possmoser-Nascimento (2014), a duração da aplicação do pulso não ultrapassou 2% do TDH.

Tabela 1. Resumo dos ensaios realizados nos SAC-EHSS avaliados no estudo.

Unidade	Altura média da taboa (cm)*	Data e horário da aplicação	Duração da aplicação (min)	Duração do teste (min)
SAC plantado em estágio de florescimento	240	25/06/14, às 15h00	26	7205
SAC controle (sem plantas)	-	03/07/14, às 10h41	18	5924
SAC plantado em estágio de crescimento	11**	01/08/14, às 13h24	20	11275

* Acima do nível do leito; ** Corte da parte aérea efetuada no dia 31/07/14.

A concentração de cloreto de sódio no efluente dos SAC-EHSS, ao longo do período de tempo de monitoramento, foi obtida de forma indireta pela medição da CE, utilizando a sonda *Global Water® WQ301A-O* (detecção de 0 a $5.000 \mu\text{S cm}^{-1}$). Os dados foram armazenados em um *data logger* acoplado, sendo os valores de CE coletados a cada 20 min, nos dois primeiros testes, e a cada 10 min, no terceiro teste. O cálculo da concentração equivalente de NaCl foi feita utilizando a Equação 1, obtida por calibração por Possmoser-Nascimento (2014), para a mesma sonda, para a qual se obteve R^2 igual a 0,9989.

$$[\text{NaCl}] = 0,5258 \times (\text{CE}_{\text{med}} - \text{CE}_{\text{back}}) - 3,4836 \quad \text{Equação (1)}$$

Em que $[\text{NaCl}]$ é a concentração de NaCl, em mg L^{-1} , e CE a condutividade elétrica medida, em $\mu\text{S cm}^{-1}$, sendo o índice med referente ao valor medido pela sonda e back, o referente ao *background*. A concentração de *background* foi obtida calculando-se a mediana dos valores antes do aparecimento do traçador e após a estabilização dos valores (final da passagem do traçador salino).

Durante a realização dos testes, as vazões afluente e efluente foram medidas antes (fase de florescimento) e após o corte da parte aérea das plantas (fase de crescimento) no SAC-EHSS plantado e no SAC-EHSS não plantado (controle). A medição visou o cálculo do tempo do TDH de projeto ou nominal (TDH_n), no qual utilizou-se o volume de poros (V_p), que é dado pelo produto do volume total pela porosidade ϵ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), tal como na Equação (2).

$$\text{TDH}_n = \frac{V_p}{Q} = \frac{L \cdot b \cdot h \cdot \epsilon}{Q} \quad \text{Equação (2)}$$

A vazão média (\bar{Q}) entre a afluente e efluente foi utilizada de forma a diminuir os efeitos que a perda hídrica (evaporação e transpiração) poderiam causar em uma comparação entre o TDH_n e o obtido pelo monitoramento da concentração do traçador ao longo do tempo (TDH_m) (BRASIL; MATOS, 2008). As outras variáveis presentes na equação são o comprimento L (m), a largura B (m), a altura h (m) dos SAC. Já o TDH_m é obtido pelo quociente da área da curva da concentração $c(t)$, em mg L^{-1} , (calculada utilizando-se a Equação 1) pelo tempo t (d), dividido pela integral de $c(t)$.

$$TDH_m = \frac{\int_{t_c} \frac{dH}{dt} dt}{\int_{t_c} \frac{dH}{dt} dt}$$

Equação (3)

A relação entre o TDH medido em campo e o teórico dá a estimativa da eficiência volumétrica (e_v), conforme Equação (4), que equivale ao quociente entre a porosidade efetiva e a total (ou inicial), uma medida de grande importância para caracterização do grau de colmatção.

$$e_v = \frac{TDH_m}{TDH_t}$$

Equação (4)

Por fim, para propiciar discussões acerca da confiabilidade do traçador salino, também é necessário conhecer a porcentagem de sua recuperação (Rec), nas três diferentes condições: sem plantas, em estágio de florescimento e com a taboa em crescimento.

$$Rec = \frac{\sum [NaCl] \times Q_{af} \times t_m}{m_{adic}}$$

Equação

(5)

O somatório da concentração de NaCl ($g\ m^{-3}$) medida a cada tempo t_m , que é o intervalo de armazenamento de dados (min), multiplicado por esse tempo (apresentado na Tabela 1) e pela vazão afluyente ($m^3\ min^{-1}$), remete à massa recuperada. A divisão desse produto pela massa adicionada ($m_{adic} = 10,0\ kg$) fornece a porcentagem de recuperação (Rec).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o monitoramento, aquisição de dados e conversão dos dados de CE em concentração de cloreto de sódio equivalente (Equação 1), foi possível construir as curvas de distribuição da concentração efluente de NaCl ao longo do tempo, apresentadas na Figura 1, enquanto as variáveis determinadas estão apresentadas na Tabela 2.

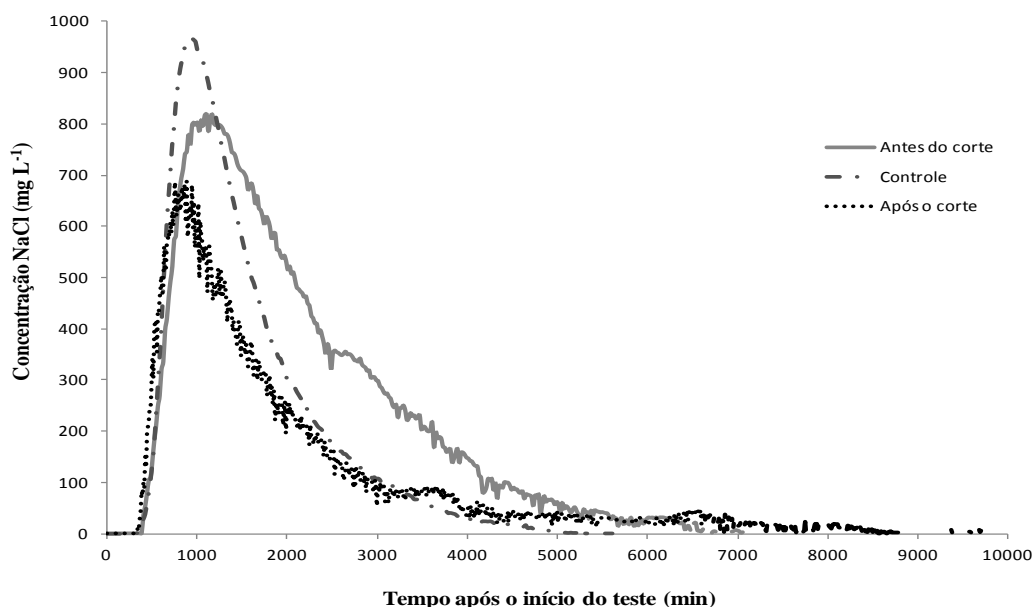


Figura 1. Curva de distribuição da concentração efluente de cloreto de sódio em função do tempo de início do teste com o traçador no SAC-EHSS plantado, antes do corte da parte aérea das plantas; e no SAC-EHSS controle e no SAC-EHSS plantado, após o corte da parte aérea das plantas.

Tabela 2. Variáveis analisadas nos três SAC-EHSS, após a aplicação do traçador salino.

Unidade	Q_{afluente} ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$)	Q_{efluente} ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$)	TDH _n (d)	TDH _m (d)	e_v	Rec (%)
SAC plantado em estádio de florescimento (antes do corte)	7,48	6,08	1,55	1,45	0,94	89
SAC controle (sem plantas)	9,31	7,73	1,23	1,06	0,86	79
SAC plantado em estádio de crescimento (após o corte)	7,74	6,85	1,44	1,38	0,96	56

Chazarenc et al. (2003) afirmaram que é normal encontrar grandes diferenças entre o TDH teórico e o real (medido), sendo o último valor de 1,2 a 2,0 vezes inferior ao do primeiro. Isso ocorre em função da heterogeneidade do material filtrante, sistema de distribuição, fatores climáticos e à colmatção do meio poroso. Estando o sistema em operação há 7 anos, esperava-se que fosse possível verificar tal tendência nos resultados, entretanto, isso não foi observado. Uma plausível explicação para isso poderia estar associada à diferença na densidade da solução traçadora utilizada neste trabalho. No entanto, Wachniew et al. (2003), comparando trítio, um traçador considerado ideal, e um sal brometo, não verificaram diferença significativa (em nível de 10% de significância) do TDH de SAC de escoamento superficial. Maloszweski et al. (2006) conduziram testes semelhantes em SAC-EHSS, chegando a conclusões semelhantes. Assim, espera-se que as respostas sejam representativas das atuais condições das unidades.

Analisando as respostas geradas, observa-se que o SAC controle encontra-se em estágio mais avançado de colmatção, em razão da sua menor eficiência volumétrica. Esses resultados corroboram com as evidências de campo, onde pode ser verificado que na unidade sem taboa ocorre escoamento superficial em quase 88% do leito, contra 80% do SAC plantado. Essas estimativas estão próximas às obtidas na relação entre as eficiências volumétricas de ambos os SAC. Os resultados também são corroborados por Tanner e Sukias (1995). Os autores, no entanto, creditaram a maior eficiência volumétrica nos SAC plantados à transpiração dos vegetais, porém, como no presente estudo, utilizou-se a vazão média, justamente para diminuir esse efeito, não se pode atribuir os resultados à perda hídrica. Magalhães Filho et al. (2013) utilizaram NaCl como traçador, numa concentração próxima à utilizada neste estudo (solução preparada de 100 g L^{-1}), porém numa unidade menor, e observaram que a presença de plantas não diminuiu o TDH, pelo contrário, atenuou a obstrução do meio poroso no decorrer do período de tempo da aplicação.

Paoli e von Sperling (2013b) estudaram os mesmos SAC-EHSS avaliados neste trabalho, após 2 anos de operação dos sistemas e, por meio do uso de um traçador radioativo (^{82}Br), constataram que o SAC plantado encontrava-se mais colmatado, apresentando valor de e_v de 0,89, contra 0,97, na unidade controle. Os resultados não podem ser comparados com os atuais em razão das diferenças na vazão, dimensões e mesmo do tipo de traçador utilizado. Entretanto, apesar de não ser adequada a análise temporal das eficiências volumétricas, percebe-se que as plantas propiciaram maior atenuação do fenômeno, ao longo do tempo, assim como descrito por Hua et al. (2014). A ocorrência de maiores tortuosidades criadas no caminho da água residuária nos SAC-EHSS parece estar associada ao aumento no tempo decorrido entre a aplicação do traçador e sua saída da unidade e pela presença de pequenos picos nos gráficos obtidos no monitoramento da concentração efluente de NaCl, no SAC-EHSS plantado.

Também foi confirmada a expectativa de que, após o corte da parte aérea das plantas, quando estas entraram em sua maior taxa de crescimento, aumentaram a absorção de vários constituintes, entre eles o sódio, o que causou menor recuperação do traçador no efluente final. A massa recuperada ainda poderia ser maior em razão da escolha da espécie, já que a taboa apresenta uma capacidade de absorção maior que algumas outras plantas (BRASIL et al., 2005; FIA et al., 2011). Comparando-se os resultados dos testes com o traçador salino, verificou-se que não houve influência da quantidade de sal recuperada nas respostas do TDH, assim como também haviam observado Borges et al. (2009) e Williams e Nelson (2011). Os primeiros autores compararam fluoresceína sódica e rodamina WT, chegando a respostas semelhantes, apesar de o último ter tido menor porcentagem de recuperação. Williams e Nelson (2011), avaliando brometo, sal propenso à absorção, e rodamina WT, verificaram que as porcentagens de recuperação do traçador parecem não ser determinantes para obtenção do TDH do sistema, inclusive proporcionando picos coincidentes. Como base nos resultados obtidos, verificou-se que o traçador NaCl pode ser usado para caracterização das condições hidrodinâmicas de SAC-EHSS, dando indicativos do grau de sua colmatção. Por fim, as menores recuperações do sal, no SAC controle, quando comparadas às obtidas no SAC plantado em estádio de florescimento podem estar associadas à adsorção dos íons à fase sólida, orgânica e inorgânica do primeiro.

Nenhuma evidência de prejuízo à taboa foi observada, dada a adição do sal. O corte inadequado, raso, da espécie vegetal parece ser mais crítico do que a condução do teste com traçador salino, em função do baixo tempo de aplicação (BRASIL et al., 2007).

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

O traçador salino pode ser utilizado para a caracterização das condições hidrodinâmicas e do grau de colmatção de SAC-EHSS, por apresentar respostas semelhantes mesmo tendo diferentes porcentagens de recuperação. Dessa forma, não influenciam nas respostas comparativas entre os sistemas monitorados, podendo afirmar que o meio poroso do SAC controle (não plantado) encontra-se mais colmatado que o do SAC plantado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, Capes, Finep, Fapemig e Copasa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORGES, A.C.; MATOS, A.T.; CALIJURI, M.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; ROLDÃO, J.S.F. Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de sistemas tropicais. *Engenharia Agrícola*, v.29, n.2, p.301-310, 2009.
- BRIX, H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, v.35, n.5, p.11-17, 1997.
- BRASIL, M.S.; MATOS, A.T.; SOARES, A.A.; FERREIRA, P.A. Qualidade do efluente de sistemas alagados construídos, utilizados no tratamento de esgoto doméstico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, p.133-137, 2005.
- BRASIL, M.S.; MATOS, A.T.; FIA, R.; SILVA, N.C.L. Desempenho agrônomo de vegetais cultivados em sistemas alagados utilizados no tratamento de águas residuárias da suinocultura. *Engenharia na Agricultura*, v.15, n.3, p.307-315, 2007.
- BRASIL, M.S.; MATOS, A.T. Avaliação de aspectos hidráulicos e hidrológicos de sistemas alagados construídos de fluxo subsuperficial. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 13, p. 323-328, 2008.
- CHAZARENC, F.; MERLIN, G. GONTHIER, Y. Hydrodynamics of horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, v.21, p.165-173, 2003.
- COTA, R.S.; von SPERLING, M.; PENIDO, R.C.S. Tracer studies and hydraulic behaviour of planted and unplanted vertical-flow constructed wetlands. *Water Science and Technology*, v.64, n.5, 2011.
- FERREIRA, D.C. Pós-tratamento de água residuária da suinocultura em sistemas alagados construídos combinados. Tese de doutorado em Saneamento Rural. Pós-graduação em Sistemas Agrícolas. Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 227p., 2012.
- FIA, F.R.L.; MATOS, A.T.; FIA, R.; LAMBERT, T.F.; MATOS, M.P. Remoção de nutrientes por *Typha latifolia* e *Cynodon* spp. cultivadas em sistemas alagados construídos. *Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. v.6, n.1, 2011.
- FU, G.; ZHANG, J.; CHEN, W.; CHEN, Z. Medium clogging and the dynamics of organic matter accumulation in constructed wetlands *Ecological Engineering*, v.60, p.393-398, 2013.
- GE, Y.; LI, S.P.; NIU, X.Y.; YUE, C.L.; XU, Q.S.; CHANG, J. Sustainable growth and nutrients uptake of plants in a subtropical constructed wetland in southeast China. *Fresenius Environmental Bulletin*, v.16, n.9, p.1023-1029, 2007.
- GRISMER, M.E.; CARR, M.T.; SHEPHERD, H.L. Hydraulic Characteristics of a Subsurface Flow Constructed Wetland for Winery Effluent Treatment. *Water Environment Research*, v.73, n.4, p.466-477, 2001.
- HEADLEY, T.R.; KADLEC, R.H. Conducting hydraulic tracer studies of constructed wetlands: a practical guide. *Ecohydrology and Hydrobiology*, v.7, n.3-4, p.269-282, 2007.
- HUA, G.F.; ZHAO, Z.W.; KONG, J.; GUO, R.; ZENG, Y.T.; ZHAO, L.F.; ZHU, Q.D. Effects of plant roots on the hydraulic performance during the clogging process in mesocosm vertical flow constructed wetlands. *Environmental Science Pollution Research*, online, 2014.
- KADLEC, R.H.; WALLACE, R.D. *Treatment Wetlands*. 2nd ed. Florida: CRC Press, 1016p, 2009.

16. KEEFE, S.H.; BARBER, L.B.; RUNKEL, R.L.; RYAN, J.N.; MCKNIGHT, D.M.; WASS, R.D. Conservative and reactive solute transport in constructed wetlands. *Water Resources Research*, v.40, p.1-12, 2004.
17. KING, A.C.; MITCHELL, C.A.; HOWES, T. Hydraulic tracer studies in a pilot scale subsurface flow constructed wetland. *Water Science and Technology*, v.35, n.5, p.189-196, 1997.
18. LEVENSPIEL, O. *Chemical Reaction Engineering*. 3rd ed. New York: John Wiley e Sons, 2000. 668p.
19. LIN, A.Y.C.; DEBROUX, J.F.; CUNNINGHAM, J.A.; REINHARD, M. Comparison of rhodamine WT and bromide in the determination of hydraulic characteristics of constructed wetlands. *Ecological Engineering*, v.20, n.1, p.75-88, 2003.
20. MAGALHÃES FILHO, F.J.C.; SILVA, J.B.; PAULO, P.L. Hidrodinâmica de um wetland construído combinado com um sistema por evapotranspiração como pré-tratamento. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, v.1, n.2 p.276-285, 2013.
21. MALOSZEWSKI, P.; WACHNIEW, P.; CZUPRYNSKI, P. Study of hydraulic parameters in heterogeneous gravel beds: Constructed wetland in Nowa Słupia (Poland). *Journal of Hydrology*, v.331, p.630- 642, 2006.
22. MATOS, A.T.; ABRAHÃO, S.S.; PEREIRA, O.G. Desempenho agrônômico de capim tifton 85 (*Cynodon spp*) cultivado em sistemas alagados construídos utilizados no tratamento de água residuária de laticínios. *Revista Ambiente & Água*, v. 3, p. 43-53, 2008.
23. MATOS, A.T.; ABRAHÃO, S.S.; BORGES, A.C; MATOS, M.P. Influência da taxa de carga orgânica no desempenho de sistemas alagados construídos cultivados com forrageiras. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.15, n.1. p.83-92, 2010.
24. METCALF; EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment Disposal and Reuse*. 4^a ed. New York: McGraw-Hill, 1818p., 2003.
25. PAOLI, A. C.; VON SPERLING, M. Evaluation of clogging in planted and unplanted horizontal subsurface flow constructed wetlands: solids accumulation and hydraulic conductivity reduction. *Water Science and Technology*, v.67, n.6, p. 1345-1352, 2013a.
26. PAOLI, A.C.; von SPERLING, M. Avaliação das condições hidrodinâmicas de wetlands construídos de escoamento horizontal subsuperficial (unidades plantada e não plantada). *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, v.1, n.2, p.213-222, 2013b.
27. PEDESCOLL, A.; CORZO, A.; ÁLVAREZ, E.; GARCÍA, J.; PUIGAGUT, J. The effect of primary treatment and flow regime on clogging development in horizontal subsurface flow constructed wetlands: An experimental evaluation. *Water Research*, v.45, p.3579-3589, 2011.
28. POSSMOSER-NASCIMENTO, T.E. Lodo em lagoas de polimento: acúmulo e implicações no comportamento hidrodinâmico e no desempenho do sistema. Dissertação de Mestrado em Saneamento. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. UFMG, Belo Horizonte, MG, 114p, 2014.
29. ROUSSEAU, D.P.L; HORTON, D.; VANROLLEGHEM, P.A.; de PAUW, N. Impact of operational maintenance on the asset life of storm reed beds. *Water Science and Technology*, v.51, v.9., p.243-50, 2005.
30. SCHMID, B.H.; HENGL, M.A.; STEPHAN, U. Salt tracer experiments in constructed wetland ponds with emergent vegetation: laboratory study on the formation of density layers and its influence on breakthrough curve analysis. *Water Research*, v.38, p.2095-2102, 2004.
31. SILVA, L.L.; DONNICI, C.L.; AYALA, J.D.; FREITAS, C.H.; MOREIRA, R.M.; PINTO, A.M.F. Traçadores: o uso de agentes químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos. *Química Nova*, v.32, n.6, p.1576-1585, 2009.
32. TANNER, C.T.; SUKIAS, J.P. Accumulation of organic solids in gravel-bed constructed wetlands. *Water Science and Technology*, v.32, n.3. p.229-239, 1995.
33. TURON, C.; COMAS, J.; POCH, M. Constructed wetland clogging: A proposal for the integration and reuse of existing knowledge. *Ecological Engineering*, v.35, p.1710-1718, 2009.
34. WACHNIEW, P.; CZUPRYNSKI, P.; MALOSZEWSKI, P. Hydraulic characteristics of constructed wetlands evaluated by means of tracer tests. *Wiss Mitt TU*, v.24, p.83-89, 2003.
35. WHITMER, S.; BAKER, L.; WASS, R. Loss of bromide in a wetland tracer experiment. *Journal of Environmental Quality*, v.29, p.2043-2045, 2000.
36. WILLIAMS, C.F.; NELSON, S.D. Comparison of Rhodamine-WT and bromide as a tracer for elucidating internal wetland flow dynamics. *Ecological Engineering*, v.37, p.1492- 1498, 2011.