

SUYMARA TOLEDO MIRANDA

**AVALIAÇÃO DE ASPECTOS DA COLMATAÇÃO E DESCOLMATAÇÃO DE
SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS DE ESCOAMENTO HORIZONTAL
SUBSUPERFICIAL**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, para
obtenção do título de *Magister
Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

M672a
2014
Miranda, Suymara Toledo, 1989-
Avaliação de aspectos da colmatção e descolmatção de
sistemas alagados construídos de escoamento horizontal
subsuperficial / Suymara Toledo Miranda. – Viçosa, MG, 2014.
xiv, 72f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Antônio Teixeira de Matos.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.62-72.

1. Águas residuais - Tratamento biológico. 2. Escoamento.
3. Nitrogênio. 4. Alagadiços. 5. Suíno - Criação .
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.
II. Título.

CDD 22. ed. 628.351

DEDICO

*Aos meus pais,
Rita de Cássia Toledo e Silva e Rone Miranda Vieira
pelo amor, dedicação e ensinamentos,
sem vocês essa conquista não seria possível!*

*Às minhas irmãs,
Monalisa Toledo Miranda e Cristiane Toledo Miranda,
pelo amor, amizade, paciência e carinho.*

*Ao meu noivo
Pedro Henrique Macedo Lamarca,
pelo amor, carinho, apoio e compreensão nos momentos difíceis.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

A Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pelo apoio e infraestrutura.

Ao professor Antonio Teixeira de Matos, pela orientação, ensinamentos, apoio e por acreditar em meu trabalho.

Aos meus coorientadores, Alisson Carraro Borges e Paola Afonsa Vieira Lo Monaco, pela ajuda, sugestões e ensinamentos.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos componentes da banca, professores Ronaldo Fia e Ana Augusta Passos Rezende, pelos conselhos e esclarecimentos.

A Gheila pela amizade, atenção e ajuda no desenvolvimento e condução deste trabalho.

Ao Simão, pelos ensinamentos, amizade e apoio no trabalho de laboratório.

A estagiária Érika.

Aos amigos e colegas Isabela, Tamara, Edson, Magno, Denis, Ivan, Amanda, Mateus, Júlio, pela ajuda, compartilhamento das dúvidas, tristezas e alegrias.

Aos funcionários do DEA: Galinari, Délio, José Mauro, Rosária, Claudenilson, Fátima e Gil, pelo auxílio e agradável convivência.

As meninas/irmãs da república, pelo companheirismo, amizade, paciência e pelos vários momentos de descontração.

Aos meus verdadeiros amigos, pelo convívio, amizade e pelos bons momentos.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

CONTEÚDO

LISTA DE TABELAS -----	vi
LISTA DE FIGURAS -----	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS -----	ix
RESUMO -----	xi
ABSTRACT -----	xiii
1. INTRODUÇÃO -----	1
2. OBJETIVOS -----	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -----	4
3.1. Sistemas alagados construídos -----	4
3.2. Colmatção em sistemas alagados construídos -----	6
3.2.1. Sólidos -----	7
3.2.2. Formação de Biofilme -----	7
3.2.3. Contribuição vegetal -----	8
3.2.4. Efeitos químicos -----	9
3.3. Métodos de avaliação do processo de colmatção -----	10
3.3.1. Condutividade Hidráulica -----	10
3.3.2. Caracterização do material colmatante -----	13
3.4. Processos de descolmatção -----	14
3.4.1. Substituição ou lavagem do substrato-----	15
3.4.2. Manutenção dos sistemas alagados construídos -----	15
3.4.3. Alterações das condições hidráulicas e operacionais -----	16
3.4.4. Aplicação agentes químicos -----	18
4. MATERIAL E MÉTODOS -----	20
4.1. Localização e caracterização do experimento -----	20
4.2. Variáveis Avaliadas -----	23
4.2.1. Monitoramento das condições climáticas -----	23
4.2.2. Amostragem e análises do efluente -----	24
4.2.3. Amostragem e caracterização dos sólidos presentes no meio poroso -----	26
4.2.4. Teste de condutividade hidráulica e acompanhamento da redução no escoamento superficial -----	30
4.3. Análise estatística dos dados -----	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	34
5.1. Condições Ambientais -----	34
5.2. Evaporação e Evapotranspiração -----	37
5.3. Caracterização do material colmatante -----	39
5.3.1. Série de sólidos -----	39
5.3.2. Diferença na concentração de sólidos presentes na camada superior e inferior dos SACs plantados -----	42
5.3.3. Teores de nitrogênio e fósforo no material colmatante dos SACs-EHSS -----	46
5.4. Monitoramento das características químicas do afluente e efluente dos SACs-EHSS após início da aplicação da solução nutritiva -----	49

5.5. Avaliação de alterações físico-hídricas no leito dos SACs em decorrência do processo de descolmatação -----	52
5.5.1. Análise estatística entre as séries de sólidos e carbono facilmente oxidável, antes e após a passagem da solução nutritiva nos SACs-EHSS-----	52
5.5.2. Medição da condutividade hidráulica em meio saturado -----	54
5.5.3. Escoamento superficial da solução nutritiva aplicada nos SACs-EHSS -----	58
6. CONCLUSÃO -----	61
7. REFERÊNCIAS -----	62

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Vazões médias afluentes e efluentes dos SACs e estimativa das lâminas de água perdidas por evaporação/evapotranspiração nos SACs..... 37
- Tabela 2.** Resumo da análise de variância das variáveis sólidos totais (ST), sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis totais (SVT) e carbono orgânico facilmente oxidável (CO_{fo}), submetidos às condições operacionais (SACs-EHSS controle (SAC-C), cultivados com tifton 85 (SAC-T) e cultivados com alternantera (SAC-A)). 39
- Tabela 3.** Valores médios em ($dag\ kg^{-1}$) de sólidos totais (ST), sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis totais (SVT) e carbono orgânico facilmente oxidáveis (CO_{fo}), submetidos às condições operacionais (SACs-EHSS controle (SAC-C), cultivados com tifton 85 (SAC-T) e cultivados com alternantera (SAC-A)). 40
- Tabela 4.** Valores médios em ($dag\ kg^{-1}$) de sólidos totais (ST), sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis totais (SVT) e carbono orgânico facilmente oxidável (CO_{fo}) no material sólido presente nos interstícios do meio poroso, em relação a posição no leito dos SACs-EHSS. 41
- Tabela 5.** Estatística descritiva dos valores médios das variáveis em $dag\ kg^{-1}$, relativas à série de sólidos (ST, SVT e SFT), em amostras coletadas em duas profundidades, nos SACs-EHSS estudados..... 45
- Tabela 6.** Resumo da análise de variância do teor de nitrogênio total (NT), nitrogênio amoniacal (N- Amoniacal) e nitrato ($N-NO_3^-$), submetidos às condições operacionais (SAC-C, SAC-T e SAC-A) e às posições (1º terço, 2º terço e 3º terço dos leitos). 45
- Tabela 7.** Resumo da análise de variância do teor de fósforo total (PT) e fósforo disponível (PD), submetidos às condições operacionais (SAC-C, SAC-T e SAC-A) e às posições (1º terço, 2º terço e 3º terço dos leitos)..... 45
- Tabela 8.** Valores médios em ($mg\ kg^{-1}$) de nitrogênio total (NT), nitrogênio amoniacal (N-Amoniacal) e nitrato ($N-NO_3^-$) no material presente nos interstícios do material poroso dos SACs-EHSS submetidos às condições operacionais SAC-C, SAC-T e SAC-A. 47
- Tabela 9.** Valores médios em ($mg\ kg^{-1}$) de fósforo total (PT) e fósforo disponível (PD) no material presente nos interstícios do material poroso dos SACs-EHSS submetidos às condições operacionais SAC-C, SAC-T e SAC-A..... 47
- Tabela 10.** Valores médios em ($dag\ kg^{-1}$) de sólidos totais (ST), sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis totais (SVT) e carbono orgânico facilmente oxidável (CO_{fo}), antes (A) e depois (D) da passagem da solução nutritiva nos SACs-EHSS e a diferença entre eles (A-D)..... 53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vista da casa de vegetação onde foram implantados os SACs.	20
Figura 2: Planta baixa do sistema, em que: 1 – Recipiente de armazenagem da água afluyente; 2 – bomba dosadora; 3 – Recipiente de coleta da água efluente; SAC-EHSS 1 e 4 – sem vegetação; SAC-EHSS 2 e 5 – cultivados com capim tifton 85 e SAC-EHSS 3 e 6 – cultivados com alternantera.	22
Figura 3: Vista geral dos SACs -EHSS, após o início do experimento.	23
Figura 4: Detalhe da instalação dos termômetros no meio poroso dos SACs-EHSS.	24
Figura 5: Detalhe da instalação das caixas de polietileno graduadas utilizadas para medição da perda de água nos sistemas por evaporação ou evapotranspiração.	25
Figura 6: Vista, em planta, do tubo de PVC cravado no leito do SAC-EHSS, onde se coletava o material colmatante.	26
Figura 7: Detalhe do material coletado no meio filtrante dos SACs-EHSS em processo de secagem sobre a bancada.	27
Figura 8: Detalhe do conjunto de peneiras utilizado na separação granulométrica do meio suporte e parte do material orgânico aderido ao meio suporte.	28
Figura 9: Detalhe da peneira e do recipiente de plástico.	29
Figura 10: Divisão do material a ser analisado. Na parte cima, o denominado “material fino” e na parte de baixo o “material grosseiro”.	30
Figura 11: Umidades relativas máximas e mínimas no ar interior e exterior à casa de vegetação.	34
Figura 12: Temperaturas máximas e mínimas do ar interior e exterior à casa de vegetação.	35
Figura 13: Valores das temperaturas médias da água interior no SAC-EHSS 4 (sem vegetação), no SAC-EHSS 2 (cultivado com capim tifton 85) e no SAC-EHSS 6 (cultivado com alternantera).	36
Figura 14: Amostra extraída a partir da camada superficial do leito do SAC-EHSS cultivado com o capim tifton 85.	43
Figura 15: Amostra extraída a partir da camada superficial do leito do SAC-EHSS cultivado com alternantera.	43

Figura 16: Série temporal da concentração de NT na solução nutritiva afluyente e efluente dos SACs-EHSS sem vegetação (SAC-EHSS 1 e SAC-EHSS 4), cultivado com capim tifton 85 (SAC-EHSS 2 e SAC-EHSS 5) e cultivado com alternantera (SAC-EHSS 3 e SAC-EHSS 6).....	49
Figura 17: Série temporal das concentrações efluentes de DBO nos SACs-EHSS sem vegetação (SAC-EHSS 1 e SAC-EHSS 4), cultivado com capim tifton 85 (SAC-EHSS 2 e SAC-EHSS 5) e cultivado com alternantera (SAC-EHSS 3 e SAC-EHSS 6).....	50
Figura 18: Série temporal das concentrações efluentes de DQO nos SACs-EHSS sem vegetação (SAC-EHSS 1 e SAC-EHSS 4), cultivado com capim tifton 85 (SAC-EHSS 2 e SAC-EHSS 5) e cultivado com alternantera (SAC-EHSS 3 e SAC-EHSS 6).....	51
Figura 19: Distribuição da condutividade hidráulica no meio filtrante ao longo do 1º, 2º e 3º terços do leito do SAC-EHSS controle (SAC-C), nas medições 1 e 2.	55
Figura 20: Distribuição da condutividade hidráulica no meio filtrante ao longo do 1º, 2º e 3º terços do leito do SAC-EHSS cultivado com tifton 85 (SAC-T), nas medições 1 e 2.	55
Figura 21: Distribuição da condutividade hidráulica no meio filtrante ao longo do 1º 2º e 3º terços do leito do SAC-EHSS cultivados com alternantera (SAC-A), nas medições 1 e 2.	56
Figura 22: Distribuição da condutividade hidráulica no meio filtrante ao longo do 1º 2º e 3º terços do leito do SAC-EHSS com brita e água limpas.	56
Figura 23: Comprimento do leito em que ocorria escoamento superficial nos tratamentos SAC-C (SAC-EHSS sem vegetação), SAC-T (SAC-EHSS cultivado com capim tifton 85) e SAC-A (SAC-EHSS cultivado com alternantera).....	59
Figura 24: Presença (a) e ausência (b) de escoamento superficial nos leitos dos SACs-EHSS cultivados com tifton.	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CE	Condutividade elétrica
CV	Coefficiente de variação
CO _{fo}	Carbono orgânico facilmente oxidável
D	Diâmetro interno do piezômetro
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
dh/ds	Gradiente hidráulico
DQO	Demanda química de oxigênio
F	Fator de forma, associado à geometria do piezômetro
g	Aceleração da gravidade
GL	Grau de liberdade
h	Altura do nível de água dentro do tubo no tempo t
h ₀	Altura inicial de água dentro do tubo
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
K _o	Condutividade hidráulica em meio saturado
K _{o20}	Condutividade hidráulica em meio saturado com líquido mantido sob temperatura-padrão de 20°C
L	Altura do piezômetro submerso
N-NO ₃ ⁻	Nitrogênio na forma de nitrato
NT	Nitrogênio total
^{ns}	Não significativo
PT	Fósforo total
PD	Fósforo disponível
Q _A	Vazão média afluyente aos SACs-EHSS
Q _E	Vazão média efluente aos SACs-EHSS
SAC	Sistemas alagados construídos
SAC-A	Referente ao tratamento: SACs-EHSS cultivados com alternantera (<i>Alternanthera philoxeroides</i>)
SAC-C	Referente ao tratamento: SACs-EHSS controle (não cultivados)
SACs-EHSS	Sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial
SAC-ES	Sistemas alagados construídos de escoamento horizontal superficial
SAC-EV	Sistemas alagados construídos de escoamento vertical
SAC-EHSS 1	SAC-EHSS não cultivado (controle)
SAC-EHSS 2	SAC-EHSS cultivado com capim tifton 85 (<i>Cynodon spp.</i>)
SAC-EHSS 3	SAC-EHSS cultivado com alternantera (<i>Alternanthera philoxeroides</i>)
SAC-EHSS 4	SAC-EHSS não cultivado (controle)
SAC-EHSS 5	SAC-EHSS cultivado com capim tifton 85 (<i>Cynodon spp.</i>)

SAC-EHSS 6	SAC-EHSS cultivado com alternantera (<i>Alternanthera philoxeroides</i>)
SAC-T	Referente ao tratamento: SACs-EHSS cultivados com capim tifton 85 (<i>Cynodon</i> spp.)
SFV	Sólidos fixos totais
SVT	Sólidos voláteis totais
ST	Sólidos suspensos totais
t	Tempo correspondente à altura do nível d'água h
t ₀	Tempo correspondente à altura do nível d'água inicial h ₀
t ₃₇	Tempo de retardo básico
TDH	Tempo de detenção hidráulica
Δ	Estimativa da perda de água por evaporação ou evapotranspiração nos SACs-EHSS
ε	Porosidade
η ₂₀	Viscosidade dinâmica da água sob temperatura de 20°C
η _e	Viscosidade dinâmica da água sob temperatura ambiente
μ	Viscosidade da água
ρ	Massa específica da água
*	Significativo a 5 % de probabilidade
**	Significativo a 1 % de probabilidade
#	Significativo a 10 % de probabilidade

RESUMO

MIRANDA, Suymara Toledo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2014. **Avaliação de aspectos da colmatção e descolmatção de sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial.** Orientador: Antonio Teixeira de Matos. Coorientadores: Alisson Carraro Borges e Paola Afonsa Vieira Lo Monaco

Os sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial (SACs-EHSS) são sistemas utilizados no tratamento de águas residuárias. O principal problema operacional desses sistemas é o entupimento do meio poroso, cujo fenômeno é denominado de colmatção. Com a realização deste estudo, objetivou-se caracterizar a composição do material responsável pela colmatção do meio poroso dos SACs-EHSS e avaliar a descolmatção desses sistemas, por adição de solução nutritiva à base de nitrogênio. Para possibilitar este estudo, utilizou-se seis SACs-EHSS que encontravam-se totalmente colmatados após terem sido utilizados no tratamento de águas residuárias da suinocultura. As condições operacionais desses sistemas foram denominadas de SAC-C (SAC-EHSS 1 e SAC-EHSS 4, não cultivados, ou seja controles); SAC-T (SAC-EHSS 2 e SAC-EHSS 5 cultivados com capim tifton 85 (*Cynodon spp.*)) e SAC-A (SAC-EHSS 3 e SAC-EHSS 6 cultivados com alternantera (*Alternanthera philoxeroides*)). A caracterização do material colmatante do meio poroso de cada unidade experimental indicou que, em sua maior parte, foi composto por sólidos fixos (95, 84 e 82% nos SAC-C, SAC-T e SAC-A, respectivamente). Observou-se que os SACs cultivados acumularam/produziram mais sólidos voláteis que os sistemas não cultivados, sendo que a contribuição de tecido vegetal morto pode ter sido a principal fonte da colmatção nos SACs-EHSS estudados. Para avaliação dos efeitos da aplicação da solução nutritiva no processo de descolmatção dos SACs-EHSS, realizou-se uma comparação entre as séries de sólidos (sólidos totais - ST, sólidos voláteis totais - SVT e sólidos fixos totais - SFT) e carbono facilmente oxidável (CO_{fo}), antes e após o tratamento, além de efetuados testes de condutividade hidráulica no meio poroso saturado, e do acompanhamento no escoamento superficial no leito dos sistemas. Os resultados indicaram que a passagem da solução nutritiva, por 55 dias, no leito dos SACs-EHSS proporcionou reduções de 11 e 33%, respectivamente, no teor de SVT do

material fino colmatante dos SAC-T e SAC-A. No que se refere ao material grosseiro, essa redução foi ainda maior, sendo de 33% para o SAC-T e 62% para o SAC-A. A condutividade hidráulica em meio saturado, efetuadas ao longo dos leitos (1º, 2º e 3º terços), antes e depois da passagem da solução nutritiva nos SACs, indicaram, respectivamente, aumentos, de 7%, 13% e 0,1% no SAC-C, 21%, 11% e 7% no SAC-T. No SAC-A foi evidenciado aumento apenas no 1º terço (52%) e no 2º terço de (6%), enquanto no 3º terço houve diminuição na condutividade hidráulica no meio poroso. A redução no comprimento do leito em que havia escoamento superficial da solução nutritiva ocorreu de forma gradativa, ao longo do tempo de tratamento, não tendo sido mais observado qualquer escoamento superficial, a partir da quarta semana de passagem da solução nutritiva, no SAC-C, e a partir da quinta semana, no SAC-T. No SAC-A, apesar de ter sido observada redução de 72%, na sétima semana de tratamento, não ocorreu, no período de avaliação, cessamento, por completo, do escoamento superficial nesses leitos. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que a aplicação da solução nutritiva à base de nitrogênio contribuiu para redução no escoamento superficial nos leitos, tendo sido a redução na concentração de material orgânico morto, presente nas camadas superficiais, um dos principais fatores para essa diminuição.

ABSTRACT

MIRANDA, Suymara Toledo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2014. **Evaluation of aspects of clogging and reverse clogging in constructed wetland systems of horizontal subsurface flow.** Adviser: Antonio Teixeira de Matos. Co-advisers: Alisson Carraro Borges and Paola Afonsa Vieira Lo Monaco

Constructed wetland systems of horizontal subsurface flow (CW-SSHF) are systems used in wastewater treatment. The main operational problem of these systems is the clogging of the porous medium, a phenomenon called "clogging". With this study, we aimed to characterize the composition of the material responsible for clogging the porous medium, CWs-SSHF and evaluate reverse clogging in these systems by adding nutrient solution nitrogen-based. To make possible this study, we used six CWs-SSHF that were completely clogged after being used in the treatment of swine wastewater. The operating conditions of these systems were called: CW-C (CW-SSHF 1 and CW-SSHF 4, uncultivated, ie controls); CW-T (CW-SSHF 2 and CW-SSHF 5 cultured with tifton 85 (*Cynodon* spp.)) and CW-A (CW-SSHF 3 and CW-SSHF 6 cultured with alternantera (*Alternanthera philoxeroides*)). The characterization of clogging material of porous medium from each experimental indicated that, for the most part, was composed of fixed solids (95, 84 e 82% in CW-C, CW-T e CW-A, respectively). It was observed that the cultivated CWs accumulated/produced more volatile solids that not cultivated systems, and the contribution of dead plant tissue may have been the main source of clogging in SACs-EHSS studied. To evaluate the effects of application of nutrient solution in the reverse clogging CWs-EHSS process, we carried out a comparison between sets of solids (total solids -TS, volatile solids -TVS and fixed solids -TFS) and readily oxidizable carbon (OC_{FO}), before and after treatment, and performed hydraulic conductivity tests in saturated porous media, and monitoring the runoff in the gravel of the systems. The results indicated that the passage of the nutrient solution for 55 days, in the gravel of the SACs-EHSS provided reductions of 11 and 33%, respectively TVS content of fine material from clogging CW-T and CW-A. With respect to gross material, the reduction was even greater, being 33% for the CW-T and 62% for a CW-A. The hydraulic conductivity of saturated medium, made over the beds (1st, 2nd and 3rd thirds) before and after the passage of the nutrient solution in SACs, indicated, respectively,

increases of 7%, 13% and 0,1% in CW-C, 21%, 11% and 7% CW-T. In the CW-A increase was evidenced only in 1st third (52%) and in the 2nd third (6%), while in the 3rd third there was a decrease in hydraulic conductivity in porous media. The reduction in the length of the gravel that had runoff nutrient solution occurred gradually, over time of treatment and were not observed any more runoff from the fourth week of the passage of the nutrient solution, the CW-C , and from the fifth week, the CW-T. In the CW-A, despite 72% reduction was observed in the seventh week of therapy, did not occur during the evaluation period, cessing, altogether, the runoff in these beds. Based on the results obtained, it was found that the passage of the nutrient solution based nitrogen contributed to reduction in surface runoff in the gravel, having been the reduction in the concentration of dead organic material present in the superficial layers, one of the main factors for this decrease.

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Alagados Construídos (SACs) são sistemas artificiais utilizados no tratamento de águas residuárias e que consistem em lagoas ou canais, nos quais são cultivadas macrófitas (plantas adaptadas a ambientes alagados). Os principais componentes desses sistemas são o meio suporte ou substrato (brita, areia, solo, entre outros), as espécies vegetais e os micro-organismos associados a esses constituintes. Em geral, os mecanismos envolvidos no tratamento de águas residuárias em SACs são a filtração pelo meio suporte e pelo biofilme, a degradação microbiana da matéria carbonácea e nitrogenada, a absorção de nutrientes pelas plantas e a adsorção ao meio suporte.

Existem diversas configurações para SACs, as quais podem variar conforme a forma de escoamento, espécie de planta cultivada, tipo de substrato, dentre outros. De acordo com a forma de escoamento da água residuária os SACs podem ser classificados em três tipos básicos: subsuperficial horizontal (SAC-EHSS), subsuperficial vertical (SAC-EV) e superficial (SAC-ES). Nos SACs de escoamento superficial, o efluente flui acima da superfície do meio filtrante, por entre os caules e as folhas da vegetação. Já nos SACs de escoamento subsuperficial a percolação do efluente se dá, ao longo da extensão do SAC, por entre o meio filtrante.

O SAC-EHSS tem sido estudado com maior intensidade em razão do menor potencial para geração de odores e atração de vetores, possibilidade de tratamento contínuo da água residuária, além de ser operacionalmente simples. Entretanto, em vários estudos se apontam problemas operacionais como o entupimento do meio poroso, fenômeno denominado “colmatação”. A colmatação pode proporcionar diminuição na condutividade hidráulica no meio poroso, gerando escoamento superficial das águas residuárias e o aparecimento de zonas mortas ou curtos-circuitos (PEDESCOLL et al., 2009), além de diminuir o tempo de detenção hidráulica (TDH) no sistema (USEPA, 2000), conduzindo à obtenção de menor eficiência no tratamento. Esses problemas afetam o desempenho geral do sistema de tratamento, bem como sua vida útil operacional.

Quando ocorre a colmatação do meio poroso nos SACs-EHSS, um dos procedimentos de restauração tradicional é a sua remoção e substituição. Este método, embora relativamente eficaz, é de alto custo financeiro. Outra opção de restauração da porosidade no meio é a remoção e a lavagem do meio filtrante, retornando-o novamente para o sistema. Neste caso, é eliminado o custo da aquisição de novo lote de substrato para constituir o meio poroso, mas ainda há o custo para a eliminação e tratamento/disposição final dos biossólidos extraídos do lote de material suporte descartado.

Nos últimos anos, os estudos de descolmatação têm sido feitos *in situ*, utilizando-se técnicas menos invasivas aos sistemas e que evitem deixá-los fora de operação por prolongados períodos de tempo, sendo elas: a aeração, a retrolavagem, além da utilização de processos que incluem o repouso do sistema, e a adição de substâncias químicas, tal como peróxido de hidrogênio, ou de minhocas, para sua recuperação.

Com base no que foi observado na literatura sobre o assunto, verifica-se a necessidade de maiores estudos de técnicas para a descolmatação de SACs-EHSS a fim de viabilizar sua operação por maior período de tempo. Nesse sentido, por hipótese, a adição de solução nutritiva de nitrogênio em SACs-EHSS, pode proporcionar aceleração na atividade microbiana e radicular das plantas no meio poroso e, com isso, a sua descolmatação.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a descolmatação de sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial (SACs-EHSS) em repouso, por adição de solução nutritiva e cultivo de duas espécies vegetais.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram:

- Caracterizar a composição do material responsável pela colmatação do meio poroso;
- Avaliar o efeito do cultivo do capim tifton 85 (*Cynodon* spp.) e da alternantera (*Alternanthera philoxeroides*) no processo de colmatação e descolmatação dos sistemas;
- Avaliar a eficiência da aplicação de solução nutritiva no processo de descolmatação do sistema;
- Monitorar o escoamento superficial nos SACs-EHSS após a aplicação da solução nutritiva;
- Monitorar a condutividade hidráulica em meio saturado nos SACs-EHSS, após a aplicação da solução nutritiva.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Sistemas alagados construídos

As primeiras pesquisas realizadas sobre a utilização de sistemas alagados construídos aplicados no tratamento de águas residuárias foram desenvolvidas pelos pesquisadores alemães Seidel e Kickuth (IWA, 2000).

No Brasil, um dos primeiros registros da tentativa de utilização de sistemas alagados construídos para purificação de águas foi feita por Salati e Rodrigues (1982), com a construção de um lago artificial nas proximidades de um córrego altamente poluído (Rio Piracicamirim) localizado em Piracicaba/SP.

Os SACs têm sido amplamente utilizados como alternativa eficiente para o tratamento de águas residuárias em todo o mundo. Em comparação com tecnologias convencionais de tratamento de esgoto, os SACs têm provado ser vantajosos devido aos baixos custos de implantação, operação e manutenção, consumo de energia e à elevada eficiência (NIVALA; ROUSSEAU, 2009). Porém, desvantagens como complexidade biológica e hidrológica do sistema e elevada demanda de área para construção, podem ser destacadas.

Esses sistemas são aplicados para tratar diferentes tipos de águas residuárias: incluindo os efluentes domésticos (BRASIL; MATOS, 2008), de laticínios (MATOS et al., 2008) de indústria têxtil (SAEED; SUN, 2013), de suinocultura (MATOS et al., 2011), de abatedouro (SOROKO, 2007), de curtumes (SAEED et al., 2012) e de indústrias diversas, além de lixiviados de aterro sanitário (MANNARINO et al., 2006), águas subterrâneas contaminadas, águas pluviais urbanas e, também, águas relativamente limpas dos rios e lagos, como pré-tratamento para sistemas de abastecimento humano (KADLEC; WALLACE, 2008).

Quanto ao tipo de escoamento hidráulico, os SACs podem ser classificados como sendo de escoamento superficial (SAC-ES) ou de escoamento subsuperficial, os quais podem ser subdivididos em sistemas de escoamento horizontal subsuperficial (SAC-EHSS) e escoamento vertical (SAC-EV).

Os SACs-ES são caracterizados por possuírem áreas em que a água está visível e a vegetação é composta por macrófitas flutuantes e, ou, emergentes. A água residuária ao passar pelo SAC-ES é tratada por meio dos processos de

sedimentação, filtração, oxidação, redução, adsorção e precipitação (KADLEC; WALLACE, 2008). São sistemas rasos (<0,4 m) e, em geral, utilizados para o tratamento terciário de águas residuárias. Segundo Kadlec e Knight (1996), a configuração deste tipo de SAC torna-se especialmente adequada para projetos de restauração ambiental.

O sistema de escoamento vertical é preenchido com material filtrante (brita, areia, cascalho, por exemplo), operado por batelada, proporcionando-se o esvaziamento sistemático da camada filtrante, assemelhando-se, por essa razão, aos filtros intermitentes de areia (USEPA, 2000).

Os SACs-EHSS, objetos deste estudo, são constituídos basicamente de canais preenchidos por material suporte (usualmente cascalho, areia grossa ou brita) que proporciona grande porosidade e alta condutividade hidráulica ao meio poroso (USEPA, 2000). Esse material dá suporte ao crescimento de macrófitas e de biofilme, sendo por onde o efluente a ser tratado irá escoar. O efluente percola longitudinalmente e é submetido ao tratamento durante o contato com o substrato, biofilme e as raízes e rizomas.

Dentre as plantas utilizadas nos SACs-EHSS, as macrófitas emergentes são as mais adequadas, visto que a lâmina de água, neste sistema, permanece abaixo da superfície do meio suporte. As macrófitas são capazes de extrair macro e micronutrientes necessários ao seu crescimento, além de transferir oxigênio para o substrato, possibilitando a formação de sítios aeróbios em torno das raízes. Estas plantas também favorecem o desenvolvimento dos filmes biologicamente ativos que propiciam a degradação dos compostos orgânicos, proporcionando a depuração da água residuária (KADLEC; WALLACE, 2008). Diversas são as espécies de plantas cultivadas em SACs, dentre elas, a taboa (*Thypha* sp.) (FIA, et al., 2012; MATOS et al., 2009; 2010; 2013), a alternantera (*Alternanthera* sp.) (MATOS et al., 2009, 2010), o capim-tifton 85 (*Cynodon* spp.) (FIA et al., 2012; MATOS et al., 2009; 2010; 2012), capim-elefante cv. Napier (*Pennisetum purpureum* Schum) (MATOS et al., 2010; 2012), o azevém (FIA et al., 2010), aveia preta (FIA et al., 2010; EUSTÁQUIO JÚNIOR et al., 2012) *Mentha aquática* (AVELAR, 2012), plantas ornamentais como o lírio amarelo (CHAGAS et al., 2011), entre outras espécies.

3.2. Colmatação em sistemas alagados construídos

A colmatação é um fenômeno caracterizado pelo entupimento do meio poroso, pelo qual o meio filtrante dos SACs perde gradualmente, as características hidráulicas iniciais, isto é, ocorre a diminuição na porosidade e na condutividade hidráulica no meio. Apesar dos SACs serem projetados para operar por décadas, a concepção ou a operação inadequada do sistema pode reduzir a sua vida útil para apenas alguns anos. Originalmente, as previsões de longevidade para os SACs eram da ordem de 50 a 100 anos (CONLEY et al., 1991, citados por NIVALA et al., 2012). No entanto, com a experiência que se obteve operando esses tipos de sistemas, a estimativa foi reduzida para 15 anos (COOPER et al., 1996, citados por NIVALA et al., 2012), posteriormente 10 anos (WALLACE; KNIGHT, 2006; KNOWLES et al., 2011), 8 anos (GRIFFIN et al., 2008, citados por NIVALA et al., 2012) e 4 anos (CASELLES - OSORIO et al., 2007).

O entupimento do meio poroso inclui vários processos relacionados com o acúmulo de diferentes tipos de sólidos, o que leva a uma redução na capacidade de infiltração/percolação no mesmo (CASELLES-OSORIO et al., 2007; HUA et al., 2014; KNOWLES et al., 2010). De acordo com Pedescoll et al. (2009), a colmatação ocorre devido ao acúmulo de material associados ao tratamento e a fatores de caráter operacional. A quantidade e a composição desse material variam de acordo com cada sistema, devido às diferentes formas de manejo, formatos, características da água residuária e condições ambientais, as quais estão submetidos os SACs. Tanner et al. (1998) acrescentaram a influência das características dos sólidos presentes, tais como proporção entre as frações lábil, estável e inerte dos sólidos, e os padrões espaciais das acumulações.

De acordo com Garcia et al. (2007), Kadlec e Wallace (2008), Cooper (2010), Paoli e von Sperling (2013) e Knowles et al. (2011), os principais mecanismos que contribuem na colmatação do meio filtrante são a deposição de sólidos orgânicos e inorgânicos na superfície dos SACs, deposição de precipitados químicos, crescimento de biofilme e desenvolvimento de raízes e rizomas das plantas no leito de material poroso.

A seguir, serão apresentados os principais fatores e mecanismos que proporcionam a colmatação em SACs.

3.2.1. Sólidos

Os sólidos presentes na água residuária são um dos principais contribuintes para a colmatação de SACs. Esse material se acumula nos SACs devido aos processos de filtração e sedimentação que ocorrem quando a água residuária escoar através do meio poroso, raízes e rizomas das plantas (ALCABAR, 2010).

Águas residuárias contêm sólidos em tamanhos diversos, o que irá influenciar diretamente no mecanismo de sua remoção nos SACs. Kadlec e Wallace (2008) afirmaram que a sedimentação de partículas de dimensões maiores é o principal mecanismo de remoção de sólidos em SACs-EHSS e que isso ocorre, predominantemente, nos primeiros metros de escoamento no leito.

Os sólidos presentes nas águas residuárias podem ser de origem orgânica ou inorgânica, o que determinará sua biodegradabilidade. Quanto mais biodegradáveis são essas partículas, mais rapidamente poderão ser eliminadas do leito dos SACs. Tanner et al. (1998) estudaram SACs-EHSS para tratar águas residuárias de laticínios e descobriram que 80% da matéria orgânica que as constituíam eram facilmente biodegradáveis. No entanto, Casselles-Osorio et al. (2007) observaram que a quantidade de matéria orgânica dos sólidos acumulados em seis diferentes SACs-EHSS, tratando águas residuária municipais, foi geralmente abaixo de 20% e os testes de biodegradabilidade realizados, tanto em meio aeróbio como anaeróbio, indicaram acúmulo de um material orgânico muito recalcitrante e que não podia ser facilmente biodegradado. Nguyen (2000), no tratamento de efluentes da atividade leiteira, também mostrou que mais de 90% da matéria orgânica acumulada no meio poroso era composta por frações recalcitrantes e 63-96% encontravam-se na forma de ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas.

3.2.2. Formação de Biofilme

Os biofilmes são compostos, principalmente, por bactérias, fungos, algas e micro invertebrados. Em SAC-EHSS, o biofilme (crescimento de micro-organismos no espaço poroso do substrato) é considerado fator importante no processo de colmatação (CHAVAN; DHULAP, 2013). Os biofilmes geralmente formam colônias filamentosas ou agregados, em condições saturadas, e o

desenvolvimento desta rede de conexões são eficientes na captura de partículas (MAYS; HUNT, 2005, citados por KNOWLES et al., 2011).

O desenvolvimento do biofilme depende, em grande parte, da qualidade da matéria orgânica presente na água residuária. Caselles-Osório e Garcia (2006) encontraram menor condutividade hidráulica em SACs-EHSS alimentados com solução de glicose que os que foram alimentados com solução de amido. Eles atribuíram o decréscimo da condutividade hidráulica no SACs-EHSS alimentado com solução de glicose, a um maior crescimento do biofilme, visto que a glicose é material orgânico mais facilmente biodegradável.

Em SACs-EHSS muito rasos, onde há predominância de ambiente aeróbio, o crescimento de biofilme é favorecido (CHAZARENC et al., 2009) por ser esse grupo de bactérias de mais rápido crescimento.

3.2.3. Contribuição vegetal

Nos SACs cultivados, as plantas juntamente com o substrato constituem o suporte físico para o crescimento aderido de micro-organismos e, por conseguinte, o desenvolvimento do biofilme. A contribuição de plantas no processo de colmatação dos SACs é assunto que está sendo pesquisado e discutido por vários autores, tais como Cooper et al. (2005), Rousseau et al. (2005), Fu et al. (2013); Knowles et al. (2010) e Paoli e von Sperling (2013).

Um dos primeiros argumentos foi de que o crescimento das raízes iria amenizar o processo de colmatação do leito do SAC, uma vez que a estrutura tubular das raízes proporcionaria aumento na macroporosidade do meio poroso (KICKUTH; KÖNEMANN, 1988, citados por KNOWLES et al., 2011). Fisher (1990), citado por Knowles et al. (2011), observou que a expansão das raízes em um SAC-EHSS aumentou em 60 mm a profundidade do sistema na zona de entrada, ao longo de três anos, o que amenizaria o entupimento. Brasil e Matos (2008) observaram um incremento da condutividade hidráulica em SACs-EHSS, nos primeiros 4 meses após o plantio da taboa, e atribuíram esse aumento à abertura de novos caminhos para escoamento da água residuária, decorrente do desenvolvimento das raízes e rizomas das plantas. Fu et al. (2013) estudaram duas espécies diferentes de plantas, a *Canna indica* e a *Cyperus alternifolius*, para avaliar o processo do abrandamento da colmatação em SACs. Os autores

observaram que houve suavização na colmatação na fase inicial de operação do sistema, proporcionada pela penetração das raízes e rizomas das plantas no substrato, absorção de contaminantes e o crescimento de micro-organismos, em decorrência da disponibilização de oxigênio, em nível radicular, pelas mesmas. Isso tudo proporcionou maior taxa de mineralização dos compostos orgânicos e, conseqüentemente, diminuição no processo de colmatação do meio poroso.

Em outros estudos foi demonstrado, entretanto, que a presença das raízes não impediu a ocorrência de escoamento superficial em SACs (BRIX, 1994; COOPER et al., 2005; KNOWLES et al., 2010; FERRES, 2012). Ferres (2012) encontrou maiores valores de condutividade hidráulica nos SACs-EHSS não cultivados comparativamente aos cultivados. Os valores variaram de 1449 a 1973 m d^{-1} nos cultivados com alternantera (*Alternanthera philoxeroides*) de 1392 m d^{-1} a 2390 m d^{-1} nos sistemas cultivados com tifton 85 (*Cynodon* spp.) e de 2123 a 2834 m d^{-1} nos sistemas não cultivados. Segundo Pedescoll et al. (2011), as raízes e rizomas das plantas podem contribuir para o entupimento subsuperficial, principalmente nos primeiros centímetros superficiais do leito. Já a parte aérea contribui para a obstrução da superfície, reduzindo o escoamento da água residuária ao longo do SAC. No estudo de Tanner e Sukias (1995), as taxas de acúmulo de matéria orgânica foram de 1,2 a 2,0 $\text{kg m}^{-2} \text{ano}^{-1}$ de matéria seca maiores nos SAC-EHSS cultivados que nos não cultivados. Torna-se, no entanto, necessário esclarecer que redução na condutividade hidráulica superficial, ou seja, no sentido vertical descendente do leito, tem sido, em muitos trabalhos, interpretada como redução na condutividade hidráulica na seção de escoamento, que tem sentido horizontal, o que é um equívoco na interpretação dos resultados.

3.2.4. Efeitos químicos

A precipitação de compostos químicos insolúveis no interior dos SACs-EHSS pode contribuir com o processo de colmatação. Kadlec e Wallace (2008) afirmaram que a precipitação de compostos químicos é estimulada por interações biológicas, ou seja, os sistemas que tratam efluentes industriais podem ser mais rapidamente colmatados se tanto a atividade biológica como a concentração de determinados compostos químicos forem elevadas.

A composição da água residuária e as condições ambientais a que o SAC está sujeito irão influenciar na formação de compostos insolúveis que permanecerão como material colmatante (PEDESCOLL et al., 2011). A formação de precipitados é governada pelo potencial redox do meio e, segundo Albacar (2010), ambientes anaeróbios (com um potencial redox inferior a -100 mV) podem promover a combinação dos componentes da água residuária com o cálcio, o alumínio e, ou, silicatos presentes no meio granular, ocasionando a formação de precipitados que ocupam os espaços intersticiais do meio poroso, estabelecendo-se, assim, uma cimentação nesses locais.

Nivala et al. (2007) observaram a ocorrência de incrustações à base de ferro no meio poroso de um SAC-EHSS aerado, utilizado no tratamento de chorume de lixo urbano. Os autores atribuíram o fenômeno à precipitação de hidróxidos de ferro, devido às condições altamente oxidantes do meio.

3.3. Métodos de avaliação do processo de colmatção

Em geral, existem três maneiras de medir a extensão e o impacto do entupimento em meios porosos: (1) medições de condutividade hidráulica, para indicar a magnitude da obstrução da colmatção, (2) teste com traçadores, para entender a influência da obstrução do meio poroso no escoamento e (3) a caracterização do material colmatante, para elucidar o grau e a natureza da obstrução (NIVALA et al., 2012).

Serão abordados, a seguir, apenas os métodos de avaliação da condutividade hidráulica e a caracterização do material colmatante, que foram os utilizados no presente estudo.

3.3.1. Condutividade Hidráulica

Condutividade hidráulica é uma medida indireta da colmatção que disponibiliza informações acerca das propriedades hidráulicas do sistema. É uma propriedade que expressa a facilidade com que a água se movimenta no meio (expresso em unidades de espaço por tempo). Assim, quanto menor a condutividade hidráulica, maior será a resistência do meio poroso à passagem da água e, portanto, maior será o grau da colmatção.

A condutividade hidráulica no leito dos SACs-EHSS pode ser alterada por fatores de difícil controle, tais como a ocorrência de escoamento superficial, curto circuito e obstrução da porosidade (USEPA, 2000). Segundo Kadlec e Wallace (2008), a condutividade hidráulica em um meio poroso é afetada pelo tamanho, forma, arranjo e distribuição das partículas. Nivala et al. (2012) acrescentaram, ainda, os fatores como presença de raízes, restos vegetais, sólidos orgânicos e inorgânicos e micro-organismos.

A primeira equação utilizada para quantificar o movimento da água no solo foi introduzida por Henry Darcy, em 1856. Com essa equação, conhecida como equação de Darcy, estabelece-se que a quantidade de água que passa por unidade de tempo e de área pelo meio poroso saturado é proporcional ao gradiente de potencial total da água nesse meio. A constante de proporcionalidade foi denominada, por Darcy, de condutividade hidráulica, hoje conhecida como condutividade hidráulica em meio saturado (K_o).

A equação de Darcy pode ser empregada para a determinação da condutividade hidráulica em SACs-EHSS, de acordo com a Equação 1:

$$K_o = \frac{Q_M}{A_s \cdot (dh/ds)} \quad (\text{Equação 1})$$

em que,

K_o – condutividade hidráulica em meio saturado ($m\ d^{-1}$);

Q_M – vazão média ($m^3\ d^{-1}$);

A_s – área da seção transversal do leito ocupada pela água residuária (m^2);

dh/ds – gradiente hidráulico ($m\ m^{-1}$).

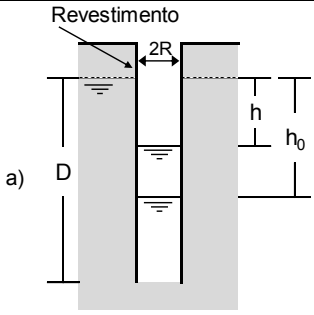
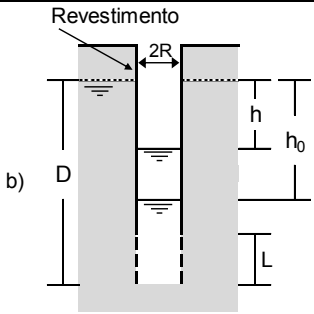
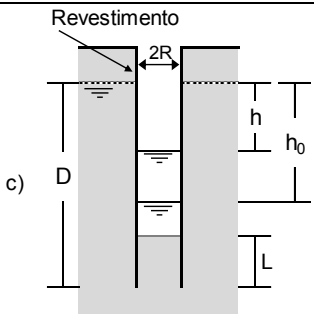
Segundo Queiroz (1995), os métodos utilizados para a determinação da condutividade hidráulica podem ser diretos e indiretos. Nos métodos diretos, a condutividade hidráulica é medida em laboratório ou em campo (*in situ*). Nos métodos indiretos, a condutividade hidráulica é determinada por intermédio de correlações empíricas. Dentre os métodos mais utilizados em laboratório destacam-se os dos permeômetros de carga constante e carga variável. Nos

métodos *in situ*, geralmente se utilizam piezômetros ou as medições são feitas em furos de trado.

A medição de condutividade hidráulica para avaliar o grau de colmatção em SACs- EHSS não é um procedimento simples. As dificuldades surgem tendo em vista que o meio filtrante, na maioria das vezes, é constituído de brita, sendo praticamente impossível coletar amostras indeformadas do material para a realização dos testes de laboratório, de forma padronizada e controlada. Por esta razão, a maior parte das técnicas que são utilizadas para estudar a condutividade hidráulica em SACs é baseada em procedimentos *in situ* (REYNOLDS et al., 2000). Um dos métodos utilizados é o permeâmetro Guelph (MASTRORILLI et al., 2001; LANGERGRABER et al., 2003), *Constant head method* (KNOWLES; DAVIES, 2009), e o método de *falling head test* (CASELLES OSORIO et al., 2007; PEDESCOLI et al., 2009; PAOLI; von SPERLING, 2013). Outro teste que pode ser realizado *in situ* é o método de Hvorslev (FERRES, 2012), o qual foi descrito pela primeira vez por Hvorslev, em 1951.

Hvorslev (1951) descreveu várias equações, as quais são soluções analíticas aplicadas a diferentes geometrias dos piezômetros e condições do aquífero (FETTER, 1994). No Quadro 1 estão apresentadas algumas dessas geometrias, para aquíferos não confinados.

Quadro 1. Geometria dos piezômetros de Hvorslev para aquíferos livres, e seus respectivos fatores de forma (F) e equações para o cálculo da condutividade hidráulica em meio saturado (K_0)

Diagrama	Fator forma (F)	Equação para " K_0 "
 <p>a)</p>	$F = \frac{11R}{2}$	$K_0 = \frac{2\pi R}{11(t - t_0)} \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h}\right)$ <p>Para $6'' < D < 60''$</p>
 <p>b)</p>	$F = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{L}{R}\right)}$	$K_0 = \frac{R^2}{2L(t - t_0)} \cdot \ln\left(\frac{L}{R}\right) \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h}\right)$ <p>Para $\frac{L}{R} > 8$</p>
 <p>c)</p>	$F = \frac{11\pi R^2}{2\pi R + 11L}$	$K_0 = \frac{2\pi R + 11L}{11(t - t_0)} \cdot \ln\left(\frac{h_0}{h}\right)$

Fonte: Ferres (2012) adaptado de NAVFAC (1986).

3.3.2. Caracterização do material colmatante

O tamanho e formato das partículas do material colmatante dos SACs irão alterar a porosidade e condutividade hidráulica do meio poroso, ao longo do tempo, limitando a vida útil dos sistemas (KADLEC; WALLACE, 2008).

Os substratos estão expostos à degradação mecânica durante o transporte e o seu acondicionamento para formação do leito dos SACs, bem como durante a operação do sistema, o que proporciona entupimento do meio poroso no sistema (PESCOLL et al., 2009).

Pedescoll et al. (2009) utilizaram a análise de difração de raio X, a fim de comparar a composição mineral do meio poroso e a composição dos sólidos acumulados em SACs-EHSS. Os resultados das análises revelaram que a fração mineral do meio poroso e a dos sólidos acumulados, em ambos os SACs-EHSS avaliados, era composta, principalmente, de carbonato de cálcio (CaCO_3) e de quartzo (SiO_2), diferindo apenas nas proporções relativas. Segundo os autores, a semelhança entre a composição mineral do meio poroso e a dos sólidos acumulados nos SACs-EHSS sugere que a fração inorgânica do material colmatante pode ter origem no pó presente na matéria prima do substrato utilizado para a formação do leito, ou ser resultado da sua desintegração, por ocasião de sua disposição no SAC.

Paoli e von Sperling (2013), trabalhando com SACs-EHSS preenchidos com escória de alto-forno, realizaram a caracterização e distribuição dos sólidos presentes ao longo do meio filtrante dos sistemas. Foram amostrados oito pontos, coletados a 20 cm de profundidade (meia profundidade do leito) e coletados 0,5 L de material contendo escória, biomassa aderida e em suspensão junto com o efluente do local. Os autores efetuaram a quantificação e caracterização dos sólidos através das análises de sólidos totais, fixos e voláteis. Os mesmos observaram que dos sólidos presentes nos leitos das unidades, cerca de 80% deles foram caracterizados como sendo fixos, ou seja, sólidos recalcitrantes de difícil degradação pelos micro-organismos.

3.4. Processos de descolmatação

Segundo Nivala et al. (2012), as estratégias para diminuir a colmatação em SACs podem ser divididas em duas categorias: *estratégias preventivas*, que visam retardar ou minimizar os efeitos negativos associados ao entupimento; e *estratégias de restauração*, que são idealizadas para que se possa recuperar sistemas que apresentem problemas hidráulicos ou baixa eficiência no tratamento.

Estratégias preventivas incluem abordagens como melhores práticas de gestão (TURON et al., 2009), ajustes na vazão de entrada e na carga aplicada (WINTER; GOETZ, 2003), pré-tratamento da água residuária (LA VARGA et al., 2013) e alterações nas condições de operação hidráulica, incluindo-se a aplicação

do efluente de modo intermitente, além de realização de retrolavagem e, ou inversão no sentido do escoamento (BEHRENDTS et al., 2007).

As *estratégias restauradoras* incluem a substituição do substrato colmatado por um substrato novo (WALLACE; KNIGHT, 2006; KNOWLES et al., 2011; NIVALA et al., 2012); a escavação, lavagem e reutilização do substrato (KADLEC; WALLACE, 2008); a aplicação de produtos químicos (como por exemplo, o H₂O₂ ou o NaClO) (NIVALA; ROUSSEAU, 2009); e, mais recentemente, a introdução de minhocas para desobstrução do meio poroso dos sistemas (LI et al., 2011).

A seguir serão apresentadas algumas das estratégias utilizadas para prevenir ou restaurar os problemas causados pela colmatação em SACs.

3.4.1. Substituição ou lavagem do substrato

Quando ocorre o entupimento do meio poroso nos SACs, um dos procedimentos de restauração tradicional é a remoção e substituição do substrato. Este método, embora relativamente eficaz, é de alto custo financeiro. Kadlec e Wallace (2008) relataram que o custo dessa operação, em Minnesota, EUA, é de 10% a 19% do custo da construção inicial do sistema de tratamento.

Outra opção de restauração da porosidade no meio é a remoção e a lavagem do substrato, retornando-o, novamente, para o sistema após efetuada essa operação (COOPER et al., 2005). Nesse caso, elimina-se o custo da aquisição de um novo meio poroso, mas ainda há o custo para a eliminação e tratamento/disposição final dos bio-sólidos extraídos do material suporte. Murphy et al. (2009) relataram economia estimada de 55%, ao utilizarem essa estratégia em substituição à baseada na escavação e eliminação do substrato de um SAC-EHSS de 300 m².

3.4.2. Manutenção dos sistemas alagados construídos

Para prevenir a colmatação do meio poroso deve-se, periodicamente, limpar os sistemas de pré-tratamento, retirando o lodo, limpar os distribuidores e coletores de água, remover o lodo acumulado sobre a superfície do SAC, especialmente na entrada, e fazer o corte ou retirada das plantas nele cultivadas (VYMAZAL; KRÖPFELOVÁ, 2008).

Cooper et al. (2005, 2008) monitoraram no Reino Unido, SACs-EHSS, utilizados para tratamento terciário de esgoto doméstico e que apresentavam problemas de distribuição da água residuária na entrada, deposição de material orgânico, empocamento superficial e problemas nos coletores de saída. Os autores observaram que o escoamento superficial ocorreu em 132 de um total de 255 sistemas avaliados, e que nesses sistemas havia acumulações de até 15 cm de lodo sobre a superfície dos leitos. Os autores sugeriram passos de manutenção para prevenir a colmatação, incluindo limpeza e remoção de material depositado na superfície do leito, especialmente na entrada dos sistemas. Os autores também propuseram que a recuperação dos leitos entupidos deveria ocorrer antes que a colmatação alcançasse a região de saída dos mesmos.

3.4.3. Alterações das condições hidráulicas e operacionais

O funcionamento intermitente dos SACs pode ser usado para minimizar os efeitos do entupimento no substrato. Langergraber et al. (2003) trabalharam com SAC-EV em escala piloto e verificaram que, após um mês de funcionamento do sistema, sob carga hidráulica aplicada de 250 mm d^{-1} , ocorreu sua colmatação. Os autores utilizaram um tempo de repouso de 14 dias para recuperação do SAC-EV, o que possibilitou que o sistema voltasse a operar, normalmente.

Hua et al. (2014) avaliaram o efeito do repouso em SAC-EV, em escala de laboratório. Os autores observaram que, após os períodos de repouso de 3, 7 e 10 dias, tanto a porosidade efetiva como a condutividade hidráulica aumentaram gradualmente. Na camada superior (0 a 10 cm) do leito dos SACs-EV, a condutividade hidráulica aumentou 2,0, 2,6 e 3,5 vezes, respectivamente, para os três períodos de repouso. Os mesmos autores explicaram que existem duas principais razões para a diminuição no entupimento, decorrente do repouso do sistema: primeiramente isso se deve à diminuição no biofilme dos SACs, em razão da ação dos micro-organismos de entrarem em estado endógeno de respiração e, em segundo lugar, devido à oxigenação no meio poroso, que possibilita rápida mineralização do material orgânico presente. Os mesmos autores ressaltaram que o período de repouso ideal deve conciliar os efeitos do tempo de repouso sobre as condições propícias à sobrevivência das plantas e a recuperação do espaço poroso nos SACs.

Outra modificação operacional utilizada é a retrolavagem. Segundo a ASABE (1994), a retrolavagem é definida como o procedimento de passagem da água através do filtro, em sentido contrário ao do escoamento de filtragem, com o objetivo de remover partículas orgânicas e inorgânicas retidas no meio filtrante. Fei et al. (2010), trabalhando com SAC-EV em escala de bancada, investigaram os efeitos do tratamento da retrolavagem na remoção de poluentes, bem como a influência sobre as características hidráulicas dos SACs. Os autores estudaram três condições operacionais definidas como "água de baixa pressão", "água de alta pressão" e "união de ar e água", variando as taxas de descarga entre 9 e 15 L m⁻² s⁻¹. Os mesmos observaram que, após a união do ar e da água de retrolavagem, ocorreu aumento nas taxas de remoção de DQO em até 75%, tendo sido considerado o melhor tratamento na desobstrução dos filtros. Após a retrolavagem, houve aumento tanto na condutividade hidráulica como no tempo de detenção hidráulica.

A aeração artificial é outra técnica estudada para descolmatação do meio poroso de SACs. Ouellet-Plamondon et al. (2006) pesquisaram o efeito da aeração artificial na eficiência do tratamento de água residuária da aquicultura, em SACs-EHSS plantados e não plantados, nos períodos de inverno e de verão. Os autores observaram que não houve diferença aparente na remoção de sólidos suspensos totais entre os SACs plantados e não plantados, em ambas as estações. No entanto, houve pequena, mas significativa, melhoria na remoção de sólidos suspensos totais nos sistemas aerados ($p \leq 0,05$), tanto no verão como no inverno. Segundo os autores, a ligeira melhoria na remoção de SST nos SACs-EHSS aerados provavelmente ocorreu devido à ação física da aeração, proporcionando a manutenção de espaços vazios na parte inicial do leito, além da ação biológica, pelo estímulo à degradação do material orgânico pelas bactérias heterotróficas.

Nivala et al. (2007) estudaram o efeito da aeração em SACs-EHSS utilizados para tratar percolado de aterro sanitário, verificando grande melhoria no desempenho desse sistema de tratamento. A eficiência na remoção de DBO com a aeração foi de até 97%, já no sistema sem aeração ficou entre 75% e 81%.

3.4.4. Aplicação agentes químicos

A aplicação *in situ* de agentes químicos tem sido considerada alternativa promissora para o processo de descolmatação do meio poroso de SACs, principalmente por não exigir a escavação e lavagem ou substituição do substrato acondicionado no SAC.

Em laboratório, Behrends et al. (2007) avaliaram a eficiência do peróxido de hidrogênio concentrado (30%), de fertilizantes nitrogenados em diferentes formas, e da combinação entre essas substâncias na descolmatação de meios porosos de SACs. Os autores observaram que os tratamentos que receberam H₂O₂ tiveram reduções significativas na concentração de sólidos voláteis, especialmente quando combinados com a aplicação de fertilizantes nitrogenados.

Nivala e Rousseau (2009) relataram a desobstrução do meio poroso de SAC-EHSS e SAC-EV utilizando peróxido de hidrogênio concentrado (35%). No SAC-EHSS, em operação há oito anos, no tratamento de esgoto doméstico, 1600 L de H₂O₂ concentrado (35%) foram injetados diretamente no leito. Os autores verificaram que a água empoçada na superfície do SAC diminuiu imediatamente após a injeção da solução. No SAC-EV, utilizado por onze anos no tratamento de água residuária de laticínios, 100 L de H₂O₂ concentrado (35%) foram aplicados na superfície do leito do sistema. Devido ao excesso de matéria orgânica acumulada na parte superior do SAC-EV, a maior parte do peróxido reagiu com o material acumulado na superfície, sendo insuficiente para promover a desobstrução dos poros em subsuperfície.

Hua et al. (2010) pesquisaram, em SAC-EV, a utilização de soluções de NaOH (Hidróxido de Sódio), HCl (ácido clorídrico) e NaClO (hipoclorito de sódio) e detergente, para reduzir o entupimento e restaurar condutividade hidráulica no meio poroso do sistema, tendo sido o experimento conduzido em escala de laboratório. A aplicação de detergente gerou a formação de muita espuma, mas nenhum efeito prático na descolmatação. A condutividade hidráulica no meio poroso aumentou, no entanto, com o aumento na dose aplicada de NaOH, HCl e NaClO. A aplicação de NaClO proporcionou recuperação de 69% na condição original de condutividade hidráulica no meio poroso. A porosidade efetiva no sistema aumentou 15%, 18%, e 23% para os tratamentos nos quais se aplicaram HCl, NaOH e NaClO, respectivamente, comparativamente ao que passou

somente água da rede local de distribuição. Os resultados mostraram, também, que as soluções reagentes não proporcionaram nenhum efeito negativo, em longo prazo, no desenvolvimento das plantas e do biofilme formado no sistema.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização e caracterização do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, instalada na Área Experimental de Armazenamento e Pré-Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais.

A casa de vegetação possui 12 m de comprimento por 8 m de largura, pé-direito de 2,5 m e janelas ao longo de uma das laterais. Essas janelas foram mantidas abertas durante o período diurno, para evitar o aumento da temperatura no seu interior (Figura 1).



Figura 1: Vista da casa de vegetação onde foram implantados os SACs.

O experimento foi constituído por SACs-EHSS, confeccionados em fibra de vidro, com dimensões de 0,6 m de altura x 0,5 m de largura x 2,0 m de comprimento, preenchidas com brita gnáissica “número zero” ($D_{60} = 9,1$ mm, coeficiente de uniformidade – $CU D_{60}/D_{10} = 3,1$ e volume de vazios inicial de $0,398 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) até a altura de 0,55 m, deixando uma borda livre de 0,05 m (o nível d’água foi mantido a 0,05 m abaixo da superfície do material suporte), sem declividade de fundo e que já estavam em operação desde julho de 2011, no tratamento de águas residuárias da suinocultura (FERRES, 2012). No

experimento conduzido por Ferres (2012), os tratamentos impostos foram os seguintes:

- SAC-C: dois SACs-EHSS controles, não cultivados (SAC-EHSS 1 e SAC-EHSS 4);
- SAC-T: dois SACs-EHSS cultivados com capim tifton 85 (*Cynodon spp.*) (SAC-EHSS 2 e SAC-EHSS 5);
- SAC-A: dois SACs-EHSS cultivados com alternantera (*Alternanthera philoxeroides*) (SAC-EHSS 3 e SAC-EHSS 6).

Como todos os SACs-EHSS, ao final do experimento conduzido por Ferres (2012), encontravam-se totalmente colmatados, foi realizada uma caracterização do material colmatante e avaliada a dinâmica da descolmatção com a aplicação de uma solução nutritiva de nitrogênio.

Na formulação da solução considerou-se a recomendação de uma relação nitrogênio: fósforo (N:P) da ordem de 5:1, a qual possibilita maior desenvolvimento de micro-organismos (METCALF; EDDY, 2003) e, com base nos resultados de caracterização química prévia do material colmatante em todos os SACs, verificou-se a necessidade de adicionar nitrogênio ao meio, para se obter a referida relação N:P. Assim, foi preparada semanalmente solução nutritiva à base nitrogênio, misturando-se 8 kg do fertilizante ureia (45% de N) em 3,5 L de água destilada. A solução era armazenada em reservatórios e bombeada por meio de bombas dosadoras *Comcept Plus* (Prominent) para o interior dos sistemas, com uma vazão de 46,06 mL min⁻¹, calculada considerando-se o volume útil dos SACs-EHSS dividido pelo tempo de detenção hidráulica (TDH), fixado em 3 dias. O volume útil dos SACs-EHSS corresponde ao produto do volume total (2,0 m de comprimento x 0,50 m de largura x 0,55 m de profundidade) pela porosidade do material suporte. A aferição das bombas era realizada uma vez por dia e, caso fosse necessário, eram ajustadas.

Na saída de cada unidade experimental, foi instalado um sistema de drenagem composto por um tubo de PVC de 32 mm, que ocupava toda a largura do leito, com furos de aproximadamente 5 mm. A esses sistemas de drenagem foram conectados tubos de descarga e controle de nível conduzindo o efluente a reservatórios graduados.

As espécies vegetais cultivadas nos tanques de tratamento foram o capim tifton 85 (*Cynodon spp.*) e a alternantera (*Alternanthera philoxeroides*). O experimento foi constituído por duas unidades experimentais sem vegetação (SAC-EHSS 1 e SAC-EHSS 4), duas cultivadas com capim tifton 85 (SAC-EHSS 2 e SAC-EHSS 5) e duas cultivadas com alternantera (SAC-EHSS 3 e SAC-EHSS 6). Uma representação esquemática do sistema pode ser visualizada na Figura 2.

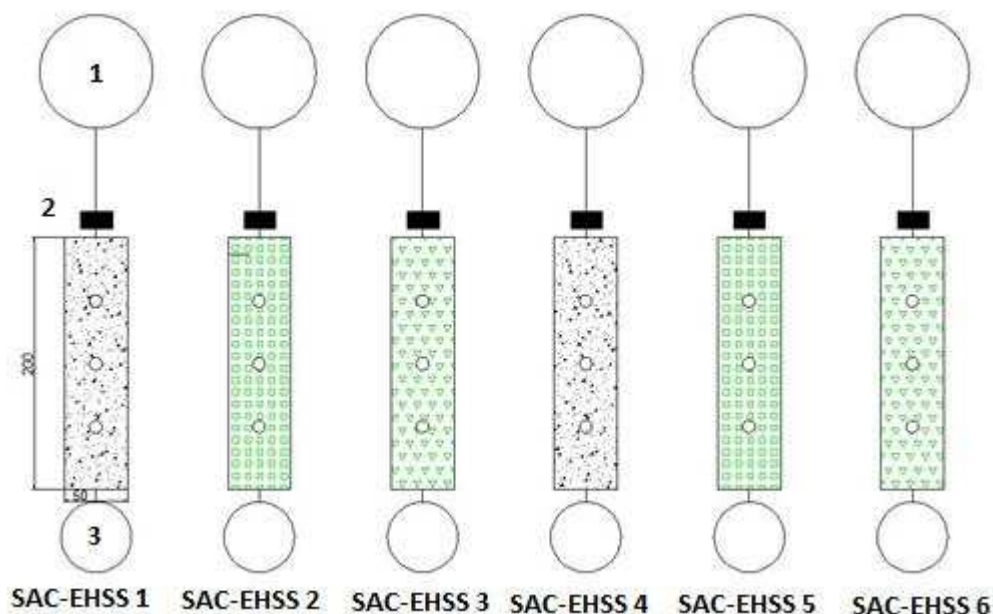


Figura 2: Planta baixa do sistema, em que: 1 – Recipiente de armazenagem da água afluenta; 2 – bomba dosadora; 3 – Recipiente de coleta da água efluenta; SAC-EHSS 1 e 4 – sem vegetação; SAC-EHSS 2 e 5 – cultivados com capim tifton 85 e SAC-EHSS 3 e 6 – cultivados com alternantera.

O experimento foi iniciado no dia 07 de dezembro de 2013, com a aplicação da solução nutritiva, de forma contínua, durante 24 h, no início do leito dos SACs-EHSS (Figura 3), sendo conduzido até o dia 01 de fevereiro de 2014. Durante esse período, foram efetuados 2 cortes nas plantas, um antes do início do experimento e o outro no quadragésimo dia.



Figura 3: Vista geral dos SACs -EHSS, após o início do experimento.

4.2. Variáveis Avaliadas

4.2.1. Monitoramento das condições climáticas

Para o monitoramento das condições climáticas, dentro da casa de vegetação, foi instalado um termo-higrômetro, para obtenção das temperaturas máximas e mínimas diárias, além da umidade relativa do ar interno. Foram também instalados, três termômetros digitais (Figura 4) para registrar as temperaturas máximas e mínimas da água residuária no interior do leito, sendo um no SAC-EHSS 2 (com o capim tifton 85), um no SAC-EHSS 4 (sem vegetação) e um no SAC-EHSS 6 (com alternantera). Os valores registrados no termo-higrômetro e nos termômetros eram coletados diariamente, pela manhã, por volta das oito horas.



Figura 4: Detalhe da instalação dos termômetros no meio poroso dos SACs-EHSS.

4.2.2. Amostragem e análises do efluente

As coletas do afluente (solução nutritiva) e efluente dos SACs-EHSS foram realizadas semanalmente, obtendo-se, então, um total de oito amostras durante o período de monitoramento dos sistemas.

As análises físicas, químicas e bioquímicas das amostras foram realizadas no Laboratório de Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. As seguintes variáveis foram analisadas: demanda química de oxigênio (DQO), pelo método do refluxo aberto; demanda bioquímica de oxigênio (DBO,) pelo método iodométrico; sólidos totais, pelo método gravimétrico; sólidos voláteis e fixos totais, obtidos após a calcinação do material em mufla, sob temperatura de 550°C, por 2 h; fósforo total e solúvel, por espectrofotometria; e nitrato por espectrofotometria; conforme apresentado em Matos (2012) e *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 2012). O nitrogênio total (NT) foi quantificado utilizando-se o processo semimicro Kjeldhal com adição de ácido salicílico, seguindo o método apresentado por Matos (2012).

A medição das vazões do afluente e efluente dos SACs foi realizada semanalmente, de maneira direta, utilizando-se um cronômetro e recipientes graduados. Para medição da vazão afluente, coletava-se a solução nutritiva em

provetas de 250 mL, durante um minuto. O volume efluente foi coletado individualmente em caixas de polietileno graduadas (Figura 5), com capacidade de 100 L no período de 12 h. Esse procedimento foi realizado nos períodos diurno e noturno, além de ter sido aproveitado para estimativa da perda de água por evaporação nos SACs-EHSS controle e evapotranspiração nos SACs-EHSS vegetados.



Figura 5: Detalhe da instalação das caixas de polietileno graduadas utilizadas para medição da perda de água nos sistemas por evaporação ou evapotranspiração.

4.2.3. Amostragem e caracterização dos sólidos presentes no meio poroso

Em cada unidade experimental, realizou-se uma análise prévia do material colmatante do meio poroso, procedendo-se às seguintes etapas para a coleta do material colmatante:

- drenagem prévia de toda a água presente no leito dos SACs-EHSS;
- coleta de três amostras de material suporte juntamente com sólidos retidos nos seus interstícios, em cada SAC-EHSS, uma em cada terço do leito. Para isso, cravou-se um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro e 60 cm de altura no leito, sendo retirado, manualmente, todo material contido no seu interior (Figura 6);



Figura 6: Vista, em planta, do tubo de PVC cravado no leito do SAC-EHSS, onde se coletava o material colmatante.

- Nos SACs-EHSS cultivados com plantas coletaram-se, primeiramente, os primeiros 20 cm do material, separando-os do restante (abaixo dos 20 cm) presente no tubo, para análise em separado, totalizando 6 amostras diferentes em cada SAC-EHSS. Não foi realizada a mesma análise nos SACs não cultivados, pois ao cravar o tubo de PVC nesses sistemas, observava-se um rebaixamento do material suporte, o que proporcionava, uma mistura das camadas superiores com as inferiores, fato também notado durante a coleta manual do material suporte. Além disso, nos SACs cultivados tinha-se a noção exata da camada

compacta, fato que nos SAC sem plantas não dava para se observar, ficando difícil saber em que momento parar a coleta;

- O material coletado nos SACs foi disposto, de forma espalhada, sobre uma bancada, por 48h, a fim de se obter sua secagem ao ar (Figura 7);



Figura 7: Detalhe do material coletado no meio filtrante dos SACs-EHSS em processo de secagem sobre a bancada.

Após a secagem, o material foi encaminhado ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC) do Departamento de Engenharia Civil, da UFV, onde foi passado por peneiras com malhas de diferentes tamanhos (19,1; 12,7; 9,25; 6,35; 4,76 e 2,38 mm), com o intuito de efetuar sua separação por granulometria e possibilitar a remoção da maior parte dos sólidos aderidos ao meio suporte (brita gnáissica). Os sólidos aderidos ao meio suporte que se soltaram foram coletados em um recipiente que ficava na parte inferior às peneiras (bandeja de fundo) (Figura 8);



Figura 8: Detalhe do conjunto de peneiras utilizado na separação granulométrica do meio suporte e parte do material orgânico aderido ao meio suporte.

- No Laboratório de Solo e Resíduos Sólidos do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, todo material da bandeja de fundo foi passado por outras duas peneiras com aberturas menores de 1 mm e 0,212 mm. O material retido e o que passou na peneira de abertura 0,212 mm foram acondicionados em recipientes diferentes;

- O restante do material suporte foi lavado utilizando-se um volume máximo de 1,5 L de água destilada, de forma a proporcionar a maior remoção possível do material orgânico aderido. Utilizou-se um recipiente de plástico e uma peneira com malha de 1,3 mm para facilitar o procedimento da lavagem do meio suporte (Figura 9).



Figura 9: Detalhe da peneira e do recipiente de plástico.

- As suspensões geradas na lavagem de cada amostra de material suporte foram colocadas em béqueres de 2 L e secadas em chapa aquecida sob temperatura de 60°C;

- Em seguida, a secagem do resíduo contido nos béqueres foi complementada em estufa com ventilação forçada de ar, sob temperatura de 65°C, por 24 h. Todas as amostras após serem secadas em estufa foram destorroadas, com auxílio de um almofariz, e passadas, novamente, na peneira de malha 0,212 mm;

- Ao final foram analisados os materiais que passaram na peneira de malha 0,212 mm, denominado “material fino”, e o que passou na peneira de malha 1 mm, mas que ficou retido na peneira de malha 0,212 mm, denominado “material grosseiro”. Optou-se por fazer essa separação uma vez que, após a lavagem de todo o material suporte, observou-se ainda a presença de material orgânico aderido às partículas de menor dimensão do material suporte (Figura 10);



Figura 10: Divisão do material a ser analisado. Na parte cima, o denominado “material fino” e na parte de baixo o “material grosseiro”.

Após esses procedimentos, foram realizadas as seguintes análises no material orgânico seco: teor de sólidos totais, pelo método gravimétrico; teor de sólidos voláteis e fixos totais, obtidos após a calcinação do material em mufla, sob temperatura de 550 °C, por 2 h; teor de fósforo total e solúvel, por espectrofotometria; teores de nitrato, por espectrofotometria, conforme descrito por Matos (2012) e *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 2012). O teor de nitrogênio total (NT) foi quantificado utilizando-se o processo semimicro Kjeldhal com adição de ácido salicílico, seguindo o método apresentado por Matos (2012).

Com intuito de avaliar a eficiência do processo de tratamento na remoção do material orgânico colmatante do meio poroso dos SACs-EHSS, ou seja, da aplicação da solução nutritiva, foram realizados, ao final do experimento, os mesmos procedimentos de caracterização do meio poroso, descritos anteriormente.

4.2.4. Teste de condutividade hidráulica e acompanhamento da redução no escoamento superficial

Para o acompanhamento do processo de descolmatção dos SACs-EHSS realizou-se o teste de condutividade hidráulica e o acompanhamento da redução no avanço do escoamento superficial da solução nutritiva aplicada.

Para realização dos testes de condutividade hidráulica foram utilizados tubos de PVC, com 75 mm de diâmetro e 0,50 m de comprimento, os quais foram cravados de forma permanente a uma profundidade molhada de 10 cm nas distâncias de 0,33; 1,0 e 1,67 m do início de cada leito dos SACs-EHSS. Realizou-se duas medições, sendo uma antes e outra depois da passagem da solução nutritiva no sistema.

O procedimento consistia na aplicação da água no tubo (piezômetro) de 75 mm de diâmetro, obtendo-se uma carga hidráulica de 0,40 m na forma de um pulso, medindo-se o tempo que a água demorava a infiltrar/percolar no meio poroso dos SACs-EHSS. Para medir a diferença de nível de água dentro do tubo, ao longo do tempo, foi utilizado um transmissor de nível hidrostático da HYTRONIC®, modelo TSH/100M/P/02 (0 a 1 mca), conectado aos módulos conversor 7520 e A/D 7018, e esses, a um computador. Para a coleta e o armazenamento dos dados, foi utilizado o programa computacional “Sistema de Aquisição de Dados”, desenvolvido por Batalha (2011).

A estimativa da condutividade hidráulica em meio saturado foi obtida utilizando-se a Equação (caso “c” do Quadro 1) que, assim como a Equação 2, é obtida pela combinação do princípio da conservação de massa e da lei de Darcy (NAVFAC, 1986).

$$K_o = \frac{\pi.D + 11.L}{11.t} \cdot \ln \frac{h_0}{h} \quad (\text{Equação 2})$$

em que,

K_o = condutividade hidráulica em meio saturado ($m s^{-1}$);

h_0 = altura inicial de água dentro do tubo (m);

h = altura do nível de água dentro do tubo no tempo t (m);

D = diâmetro interno do tubo (m);

L = altura do tubo submerso (m);

t = tempo (s).

O procedimento empregado foi o proposto por Hvorslev (1951), citado por Fetter (1994), no qual são empregadas as variáveis do piezômetro e da curva, em

escala semi-logarítmica, ou seja, (h/h_0) x tempo. De acordo com essa solução e a partir da Equação 2, a condutividade hidráulica em meio saturado pode ser obtida por:

$$K_o = \frac{\pi.d + 11.L}{11.t_{37}} \quad (\text{Equação 3})$$

em que,

t_{37} = tempo de retardo básico (s).

O tempo de retardo básico corresponde ao tempo decorrido até que o nível d'água atinja 37% do nível inicial, ou seja, $h/h_0 = 0,37$.

Os valores de condutividade hidráulica em meio saturado, obtidos utilizando-se a Equação 3, representam a condutividade hidráulica vertical em meio saturado, estando, isso, associado às características geométricas do piezômetro utilizado.

O valor de K_o , determinado para as condições ambientais, foi recalculado para a temperatura de referência de 20°C. Para isso, a temperatura do líquido no interior de cada SAC-EHSS foi obtida em cada teste, utilizando-se um termômetro de mercúrio. Para a correção da condutividade hidráulica em meio saturado, aplicou-se a Equação 4:

$$K_{o20} = K_{oe} \left(\frac{\eta_e}{\eta_{20}} \right) \quad (\text{Equação 4})$$

em que,

K_{o20} = condutividade hidráulica em meio saturado com líquido mantido sob temperatura-padrão de 20°C (m d^{-1});

K_{oe} = condutividade hidráulica em meio saturado experimental (m d^{-1});

η_e = viscosidade dinâmica da água sob temperatura ambiente ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$);

η_{20} = viscosidade dinâmica da água sob temperatura de 20 °C ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$).

Os valores de viscosidade utilizados nos cálculos foram aqueles tabelados referentes aos da água limpa (INCROPERA; DE WITT, 2003).

4.3. Análise estatística dos dados

O experimento foi instalado em esquema de parcelas subdivididas, tendo nas parcelas, os tratamentos, e nas subparcelas, o terço de cada SAC-EHSS. O delineamento foi inteiramente casualizado com duas repetições. Os dados foram estudados por meio de análise de variância e regressão. Para o fator qualitativo, as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade. Para o fator quantitativo, os modelos foram escolhidos baseados na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se, para isso, o teste “t” para dados pareados, adotando-se os níveis de 5 e 10% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o programa estatístico SAEG® (RIBEIRO Jr., 2001).

A fim de avaliar o processo de colmatção e descolmatção dos sistemas, realizou-se uma análise descritiva, baseada nos fenômenos físicos, químicos e biológicos observados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados e discutidos por tópicos, apresentando-se, primeiramente, aqueles relacionados às condições ambientais, em seguida os referentes ao processo de colmatação e, por último, a avaliação dos processos de descolmatação dos SACs-EHSS.

5.1. Condições Ambientais

Os valores máximos e mínimos da umidade relativa e da temperatura do ar internos e externos à casa de vegetação estão apresentados nas Figuras 11 e 12, respectivamente.

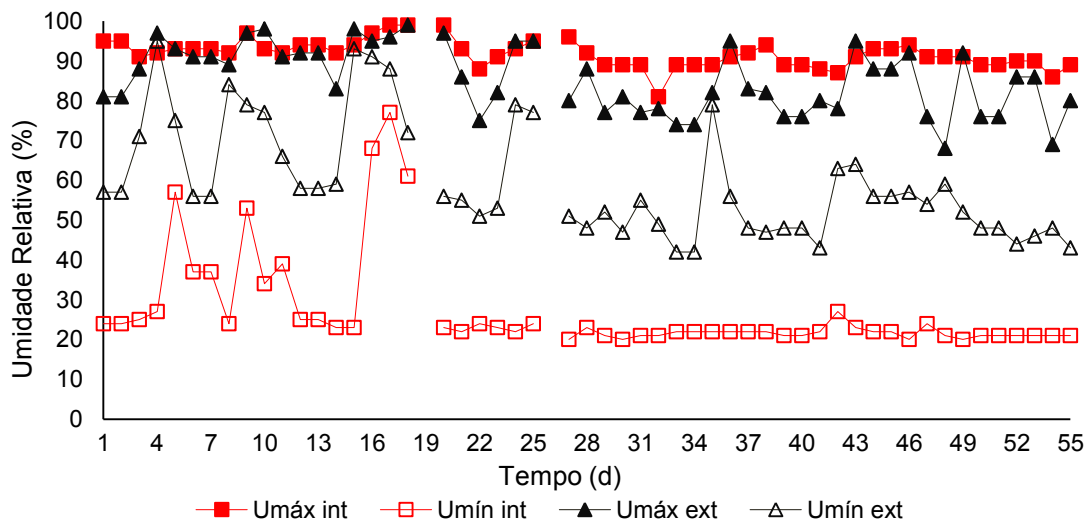


Figura 11: Umidades relativas máximas e mínimas no ar interior e exterior à casa de vegetação.

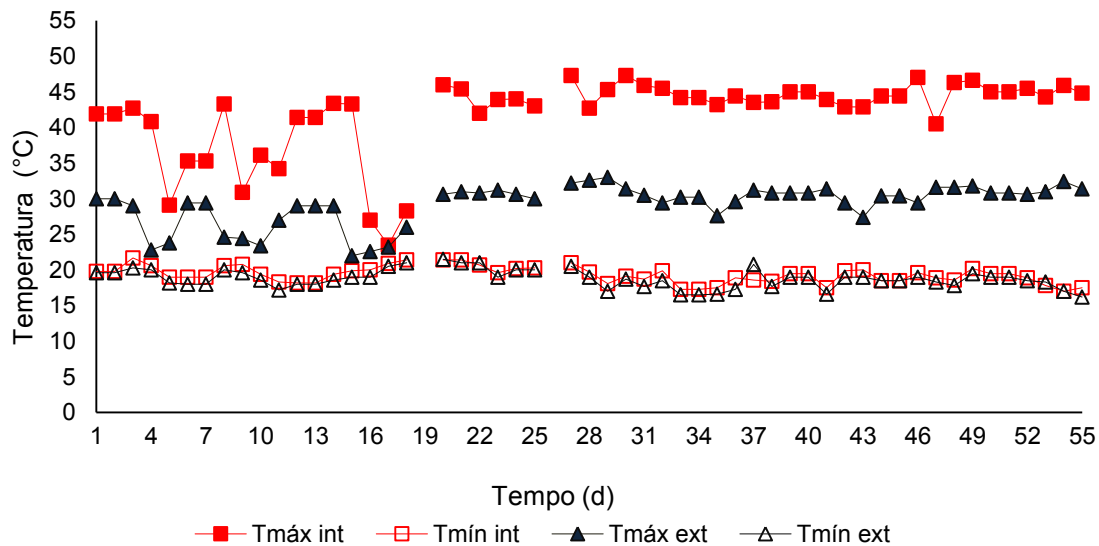


Figura 12: Temperaturas máximas e mínimas do ar interior e exterior à casa de vegetação.

A umidade relativa mínima média do ar interno ficou consideravelmente abaixo das medidas no ambiente externo à casa de vegetação, enquanto as diferenças entre as máximas médias foram menores.

As temperaturas máximas e mínimas do ar interno à casa de vegetação se mantiveram superiores aos valores de temperatura do ar externo ambiente, tendo a temperatura média no interior da casa de vegetação sido de 30,6°C, enquanto a do ambiente externo, sido de 24°C.

Apesar das elevadas temperaturas do ar no interior da casa de vegetação, a temperatura média do líquido (Figura 13) no SAC-EHSS 4 (sem vegetação), no SAC-EHSS 2 (cultivado com capim tifton 85) e no SAC-EHSS 6 (cultivado com alternantera), durante o período de condução do experimento, foram de 22,2°C, 27,8°C, 27,3 °C, respectivamente, sendo os valores extremos mínimos e máximos registrados de 18,4°C, 23,5°C, 23,2°C e 30,4°C, 32,7°C, 33,3°C, respectivamente.

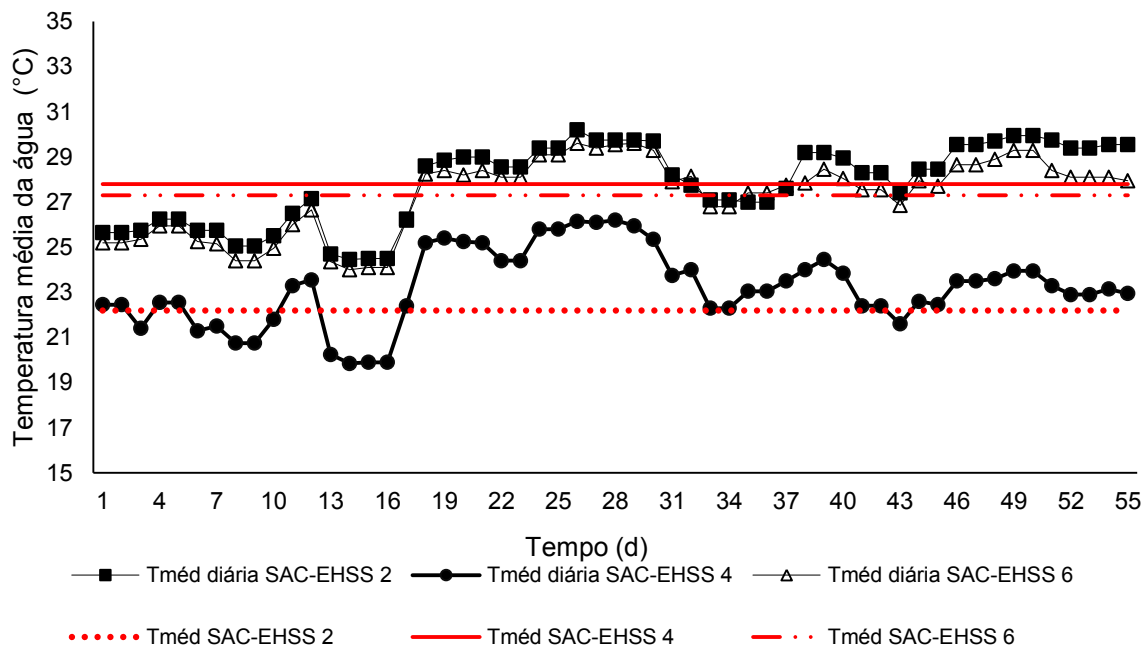


Figura 13: Valores das temperaturas médias da água interior no SAC-EHSS 4 (sem vegetação), no SAC-EHSS 2 (cultivado com capim tifton 85) e no SAC-EHSS 6 (cultivado com alternantera).

Observa-se que a temperatura média do líquido no interior do SAC sem vegetação foi menor do que nos SACs plantados. Essa diferença deve-se à renovação foliar, formando finas, mas densas, camadas de biomassa morta sobre a superfície dos SACs e à presença de uma camada compacta nos primeiros 20 cm dos SACs, como consequência da presença e acúmulo de raízes e rizomas das plantas. Essas camadas funcionaram como isolantes térmicos no sistema, impedindo maior perda de energia do leito dos SACs-EHSS para a atmosfera, notadamente pelo resfriamento evaporativo.

A temperatura afeta a velocidade de decomposição da matéria orgânica, uma vez que controla o crescimento dos micro-organismos (von SPERLING, 2005). Akratos e Tsihrintzis (2007) estudaram o efeito da temperatura no desempenho de cinco SACs-EHSS em escala piloto, no que se refere à remoção da matéria orgânica, nitrogênio e fósforo. Os autores verificaram que as temperaturas de águas residuárias variaram entre 2,0 e 26,0°C, sendo que, nos períodos com temperaturas maiores que 15°C ocorreu maior remoção das variáveis analisadas. Taylor et al. (2010), avaliando o efeito sazonal de 19 espécies vegetais na remoção de carbono orgânico (medido como DQO) em

SACs-EHSS, verificaram que os efeitos da presença de plantas sobre a remoção de DQO nos SACs está relacionado com a menor variação sazonal nas condições ambientais da rizosfera, o que minimiza a tendência da atividade microbiana em declinar sob condições de mais baixas temperaturas. Além disso, os autores constataram que sob menores temperaturas do ar, as remoções nos sistemas cultivados foram maiores que as obtidas no controle não cultivado. De forma contrária, outros autores verificaram pequena, ou nenhuma influência da temperatura sobre eficiência de remoção de DQO ou DBO em SACs (GARCIA et al., 2005; VYMAZAI; KRÖPFLOVÁ, 2008; KADLEC; WALLACE, 2008).

5.2. Evaporação e Evapotranspiração

Na Tabela 1 estão apresentadas as vazões médias afluentes (Q_A), efluentes (Q_E) e perda de água por evaporação/evapotranspiração (Δ).

Tabela 1. Vazões médias afluentes e efluentes dos SACs e estimativa das lâminas de água perdidas por evaporação/evapotranspiração nos SACs

Tratamentos	Q_A ($m^3 d^{-1}$)	Q_E ($m^3 d^{-1}$)	Δ ($mm d^{-1}$)
SAC-C	0,06614	0,06401	2,13
SAC-T	0,06655	0,06052	6,03
SAC-A	0,06649	0,05819	8,30

Q_A – vazão média afluente aos SACs-EHSS; Q_E – vazão média efluente aos SACs-EHSS;

Δ – estimativa de perda de água nos SACs-EHSS;

Em que, SAC-C, SAC-T e SAC-A – SACs-EHSS controles, cultivados com tifton 85 e cultivados com alternantera, respectivamente.

Pode-se observar, analisando-se os resultados apresentados na Tabela 1 que as vazões efluentes de solução nutritiva aplicada aos SACs foram menores que as afluentes, e que os sistemas com vegetação apresentaram vazões médias efluentes menores que o SAC controle. Tal fato deve-se às maiores perdas de água por evapotranspiração, no caso dos SACs-EHSS cultivados, e por evaporação, nos SACs-EHSS não-cultivados.

A vazão efluente dos SACs-EHSS foi, em média, 4; 9 e 13% menor do que a vazão afluente da solução nutritiva aplicada, respectivamente, aos sistemas sem planta (controle), aos sistemas cultivados com tifton 85 e aos sistemas

cultivados com alternantera. Essa redução na vazão afluyente, decorrente da perda de água, foi semelhante à verificada por Fia (2009), que obteve variação de 8 a 13% entre sistemas não cultivados e cultivados respectivamente, e por Ferres (2012), que obteve perdas de 2, 8 e 10% respectivamente, em sistemas sem planta, cultivados com tifton 85 e aos sistemas cultivados com alternantera. No entanto, foram relativamente menores às encontradas por Rossmann et al. (2013), que obtiveram perdas de 13 e 24% em sistemas não-cultivados e cultivados, respectivamente, sendo todos os trabalhos conduzidos nos mesmos SACs-EHSS, em ambiente protegido.

Quando comparadas a experimentos conduzidos em ambiente desprotegido, as percentagens de água perdida em relação à lâmina afluyente são bem inferiores. Paoli (2010) obteve perdas de 23 e 29%, para sistemas não cultivados e cultivados (taboa), respectivamente, e Brasil e Matos (2008) encontraram variação entre 11 e 27%, em quatro SACs-EHSS cultivados com taboa.

As diferenças entre os valores encontrados em ambientes protegidos e não protegidos já eram esperadas, uma vez que no interior de casas de vegetação a evapotranspiração é, em geral, menor do que a verificada em ambiente não protegido. Esse comportamento é atribuído, basicamente, à redução na incidência da radiação em ambientes protegidos, devido à reflexão e absorção da cobertura plástica (FURLAN, 2001) e à redução na ação dos ventos, fazendo com que não haja o transporte horizontal de energia, removendo, próximo às plantas, o ar contendo grande quantidade de vapor d'água (PEREIRA et al., 2007).

A perda de água nos SACs-EHSS cultivados foi 2,8 (SAC-T) e 3,9 (SAC-A) vezes maiores que as medidas no SAC-C controle. Estas estimativas estão dentro da faixa dos valores encontrados por Fia (2009), que obtiveram razões variando de 1,5 a 5,4 para SACs-EHSS cultivados com tifton 85 e taboa (*Typha latifolia*), em casa de vegetação, porém menores que a razão encontrada por Ferres (2012) que, trabalhando sob semelhantes condições climáticas, em casa de vegetação e utilizando as mesmas espécies vegetais, obteve razões de 3,5 e 4,7 em SACs-EHSS cultivados com tifton 85 e alternantera. Os menores valores encontrados de perda de água por evaporação/evapotranspiração, quando comparados com Ferres (2012), devem-se à maior ocorrência de chuvas no período de condução

deste experimento, elevando assim a umidade relativa do ar e, conseqüentemente, reduzindo a perda de água no sistema.

5.3. Caracterização do material colmatante

A caracterização do material colmatante do meio poroso de cada unidade experimental foi realizada em amostras coletadas anteriormente à passagem da solução nutritiva.

5.3.1. Série de sólidos

Na Tabela 2 está apresentado um resumo da análise de variância das variáveis: sólidos totais (ST), sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis totais (SVT) e carbono orgânico facilmente oxidável (CO_{fo}), referentes às condições operacionais (SAC-C, SAC-T e SAC-A) e às posições (1º terço, 2º terço e 3º terço do leito dos SACs-EHSS).

Tabela 2. Resumo da análise de variância das variáveis sólidos totais (ST), sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis totais (SVT) e carbono orgânico facilmente oxidável (CO_{fo}), submetidos às condições operacionais (SACs-EHSS controle (SAC-C), cultivados com tifton 85 (SAC-T) e cultivados com alternantera (SAC-A)).

FV	GL	Material Fino				Material Grosseiro			
		Quadrado Médio				Quadrado Médio			
		ST	SFT	SVT	CO _{fo}	ST	SFT	SVT	CO _{fo}
Vegetação(V)	2	5,0**	257,8**	257,8**	27,5**	12,1**	404,2**	404,2**	47,2**
Resíduo (a)	3	0,2	1,1	1,1	0,9	1,0	9,5	9,5	3,0
Posição(P)	2	1,1 ^{ns}	75,2*	75,2*	11,1*	2,9*	113,9*	113,9*	11,2*
V x P	4	0,1 ^{ns}	9,9 ^{ns}	9,9 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,6 ^{ns}	13,9 ^{ns}	13,9 ^{ns}	1,3 ^{ns}
Resíduo (b)	6	0,3	12,8	12,8	1,0	0,4	17,8	17,8	1,4
CV (%) Parcela		0,4	1,2	7,6	19,4	1,0	3,5	24,2	39,3
CV (%) Subparcela		0,6	4,1	26,6	20,4	0,7	4,8	33,1	26,9

ns, ** e *: não significativo, significativo a 1 e 5% de probabilidade, pelo teste F, respectivamente.

FV – fonte de variação; GL – graus de liberdade; CV – coeficiente de variação

A análise de variância dos dados demonstrou não existir interação significativa entre os fatores vegetação e posição. Isto significa que os mesmos irão interferir de forma independente no processo de colmatção dos SACs em

estudo. Assim, os efeitos dos fatores vegetação e posição serão discutidos isoladamente.

Na Tabela 3 estão apresentados as médias das concentrações de ST, SVT, SFT e CO_{fo}, avaliando-se a interferência da presença de plantas.

Tabela 3. Valores médios em (dag kg⁻¹) de sólidos totais (ST), sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis totais (SVT) e carbono orgânico facilmente oxidáveis (CO_{fo}), submetidos às condições operacionais (SACs-EHSS controle (SAC-C), cultivados com tifton 85 (SAC-T) e cultivados com alternantera (SAC-A)).

Tratamento	Material Fino				Material Grosseiro			
	ST	SFT	SVT	CO _{fo}	ST	SFT	SVT	CO _{fo}
SAC-C	98,76 A	93,95 A	6,04 C	2,40 B	99,32 A	96,78 A	3,28 B	1,21 B
SAC-T	97,18 B	84,37 B	15,63 B	5,70 A	96,97 B	83,07 B	16,93 A	5,86 A
SAC-A	97,20 B	81,42 C	18,58A	6,41 A	96,77 B	81,99 B	18,00 A	6,25 A

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

SAC-C, SAC-T e SAC-A – SACs-EHSS sem cultivo, cultivados com tifton 85 e cultivados com alternantera, respectivamente.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 3, pode-se verificar que houve diferença significativa entre todas as variáveis analisadas, quando comparando os sistemas plantados e o não plantado, tanto para o material fino quanto para o grosseiro.

Em relação aos ST, esperava-se que os teores de ST fossem maiores nos SACs-EHSS plantados, pela maior produção de material orgânico no sistema. Entretanto, como essa variável é relativa à matéria fresca, na qual se inclui o efeito do conteúdo de água e tendo, proporcionalmente, mais água no material sólido dos SACs cultivados que naquele não cultivado, esse efeito foi ocultado.

Assim como nas pesquisas de Tanner e Sukias (1995), Caselles-Osório et al. (2007) e Pedescoll et al. (2009), a maior parte dos sólidos acumulados no leito dos SACs foi de material não degradável, caracterizados pela fração de sólidos fixos. Para os autores citados, a fração de sólidos fixos foi de 90, 85 e 75% respectivamente. Nesta pesquisa, a fração dos sólidos fixos (média de material fino e grosseiro) foi ainda maior, sendo de 95, 84 e 82%, para os SAC-C, SAC-T e SAC-A, respectivamente.

Observa-se que o teor de SFT foi maior no sistema não plantado, embora a colmatação nos SACs tenha ficado mais evidente nos sistemas cultivados, assunto que será discutido de forma mais aprofundada em item a ser apresentado posteriormente. Esses resultados dão indicativos de que não seria a variável SFT a de melhor associação com a colmatação do meio poroso, sendo melhor associação obtida com teor de SVT. O teor de SVT nos SAC-T e SAC-A foi 2,6 e 3,1 vezes maior, respectivamente, que no SAC-C, no que se refere ao material fino, e 5,2 e 5,5 vezes no que se refere ao material grosseiro. Neste caso, a contribuição dos depósitos de material orgânico produzidos pelas plantas foi mais importante que a contribuição externa de sólidos da água residuária, e que, portanto, pode ter sido a principal fonte da colmatação nos SACs-EHSS estudados. O mesmo foi comprovado por Tanner e Sukias (1995), que encontraram taxas de acúmulo de material orgânico maiores nos SACs-EHSS cultivados que nos não cultivados.

Knowles et al. (2011) afirmaram que a biodegradabilidade da matéria orgânica acumulada nos SACs é que prediz o seu impacto sobre a colmatação. Inicialmente, pensava-se que a matéria orgânica iria se decompor suficientemente rápido, de modo que apenas os sólidos inorgânicos contribuiriam para o entupimento do sistema. No entanto, a partir dos dados obtidos, pode-se confirmar que a colmatação do meio poroso dos SACs ocorreu principalmente pelo acúmulo de matéria orgânica, que se evidencia pelos teores de SVT.

Na Tabela 4 estão apresentadas as médias dos teores de ST, SVT e SFT e CO_{fo} , analisando-se a interferência da posição (1º terço, 2º terço e 3º terço do leito dos SACs-EHSS).

Tabela 4. Valores médios em ($dag\ kg^{-1}$) de sólidos totais (ST), sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis totais (SVT) e carbono orgânico facilmente oxidável (CO_{fo}) no material sólido presente nos interstícios do meio poroso, em relação a posição no leito dos SACs-EHSS.

Posição	Material Fino			Material Grosseiro			
	SFT	SVT	CO_{fo}	ST	SFT	SVT	CO_{fo}
1º terço	82,65 B	17,35 A	6,24 A	96,88 B	82,36 B	17,63 A	5,91 A
2º terço	87,56 AB	12,44 AB	4,75 AB	98,01 A	88,74 AB	11,26 AB	4,19 AB
3º terço	89,53 A	10,47 B	3,53 B	98,16 A	90,69 A	9,31B	3,22 B

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4 houve diferença significativa nos teores de ST do 1º terço para o 2º e 3º terços do leito dos SACs-EHSS, para o material grosseiro, embora se esperasse encontrar maior concentração desses sólidos no 1º terço dos leitos, uma vez que trata-se da zona de entrada do afluente nos SACs-EHSS e que age como um filtro, retendo grande parte dos sólidos presentes na água residuária aplicada.

Pode-se observar que o teor de SVT diminuiu ao longo do comprimento dos SACs-EHSS, sendo maior nos seus 1º e 2º terços, que correspondem aos trechos mais próximos ao local de aporte da matéria orgânica nos sistemas. Também são nessas posições que se encontram os maiores teores de material de mais fácil degradação, o que pode ser evidenciado pela análise de CO_{fo} .

5.3.2. Diferença na concentração de sólidos presentes na camada superior e inferior dos SACs plantados

Na fase de amostragem do material dos SACs cultivados foi observada a presença de uma camada compacta, onde havia um gradiente vertical de distribuição dos sólidos, tendo um maior acúmulo na camada próxima à superfície, conforme pode ser observado nas Figuras 14 e 15, onde estão apresentados os resultados obtidos nos SACs-EHSS cultivados com o capim tifton 85 e com a alternantera, respectivamente. Este perfil parece ser motivado pelo crescimento das raízes das plantas e deposição de sólidos sobre o meio suporte, oriundos da água aplicada e dos restos vegetais.

As amostras coletadas nos SACs plantados foram extraídas manualmente de dentro dos tubos de PVC, a partir da camada superficial do leito, e apresentaram de 5 a 19 cm de espessura, sendo que as maiores espessuras foram observadas nos SACs que estavam plantados com alternantera. Alguns autores têm evidenciado a presença dessa camada em SACs-EHSS, com espessuras variando de 10 a 30 cm (TANNE; SUKIAS, 1995; ALBACAR, 2010; KNOWLES et al., 2011).



Figura 14: Amostra extraída a partir da camada superficial do leito do SAC-EHSS cultivado com o capim tifton 85.



Figura 15: Amostra extraída a partir da camada superficial do leito do SAC-EHSS cultivado com alternantera.

Muito tem sido estudado a respeito das funções e os benefícios das plantas no tratamento das águas residuárias: remoção de nutrientes da água residuária; transferência de oxigênio para o substrato; servir de suporte (rizomas e raízes) para o crescimento de biofilme de bactérias, além de melhoria na permeabilidade do substrato (BRIX, 1997; KADLEC; WALLACE, 2008). Em algumas pesquisas foram enfocadas as diferenças no crescimento e na quantificação da biomassa das raízes nos SACs.

Chen et al. (2007) estudaram o crescimento da raiz de oito espécies de plantas em SACs, com dois diferentes tipos de raízes (rizomáticas e fasciculadas), no intuito de descobrir qual tipo de raiz melhor se adaptava nesses sistemas, para

a descontaminação das águas residuárias. Os autores observaram que o crescimento das raízes fasciculadas foi mais rápido e proporcionou maior massa e área superficial que o das rizomáticas, concluindo que, por essas razões, o cultivo de espécies vegetais de sistema radicular fasciculado em SACs favorece a descontaminação de águas residuárias.

Poucos são, no entanto, os estudos referentes à forma de propagação do sistema radicular das plantas e sua influência no processo de colmatção dos SACs. Neste estudo, houve maior acúmulo de material orgânico e inorgânico no meio poroso dos SACs cultivados com a alternantera do que nos SACs cultivados com o capim tifton 85. O grande acúmulo de material morto na superfície e camada superficial dos SACs cultivados com alternantera deve-se, no entanto, ao fato dela ter sido atacada por pragas.

Desse modo, conforme já comentado no item Material e Métodos, considerou-se relevante o estudo, em separado, do material colmatante coletado nos primeiros 20 cm e o coletado na camada mais profunda, abaixo dos primeiros 20 cm nos SACs cultivados.

Na Tabela 5 apresentam-se os dados referentes à estatística descritiva das variáveis correspondentes a série de sólidos realizados a profundidade de 0 a 20 cm e de 20 cm até o fundo dos SACs, para os sistemas cultivados com o capim tifton 85 (SAC-T) e alternantera (SAC-A) ao longo dos SACs (1º terço, 2º terço, 3º terço do leito).

Tabela 5. Estatística descritiva dos valores médios das variáveis em dag kg⁻¹, relativas à série de sólidos (ST, SVT e SFT), em amostras coletadas em duas profundidades, nos SACs-EHSS estudados.

Profundidade (cm)	Sólidos	Trat.	Material Fino			Material Grosso			
			1º terço	2º terço	3º terço	1º terço	2º terço	3º terço	
(0 a 20)	ST	SAC-T	Média	94,1	96,5	95,5	93,0	95,5	95,5
			CV	0,93	0,24	1,60	0,64	0,27	2,45
		SAC-A	Média	95,0	95,7	95,8	91,7	95,3	95,7
			CV	0,12	0,36	1,49	1,85	0,71	2,19
	SVT	SAC-T	Média	32,0	19,0	21,8	37,9	25,1	25,3
			CV	2,93	4,63	4,44	1,25	4,29	5,73
		SAC-A	Média	39,6	31,2	20,4	45,9	28,6	21,2
			CV	1,70	1,67	1,34	5,13	8,71	1,72
	SFT	SAC-T	Média	68,0	81,0	78,2	62,1	74,9	74,7
			CV	12,19	1,09	12,36	7,63	1,43	19,44
		SAC-A	Média	60,4	68,8	79,6	54,1	71,4	78,8
			CV	1,11	0,76	3,44	4,35	3,49	4,65
(Abaixo de 20)	ST	SAC-T	Média	98,9	99,0	99,1	99,0	99,3	99,5
			CV	0,33	0,07	0,41	0,17	0,16	0,26
		SAC-A	Média	98,6	99,0	99,1	99,2	99,3	99,5
			CV	0,03	0,31	0,06	0,39	0,15	0,08
	SVT	SAC-T	Média	7,7	7,6	5,7	5,4	4,9	3,0
			CV	0,65	0,21	0,32	0,36	0,46	0,55
		SAC-A	Média	8,8	5,9	5,7	5,7	3,9	2,6
			CV	0,69	0,24	0,45	0,47	0,41	0,34
	SFT	SAC-T	Média	92,3	92,4	94,3	94,6	95,1	97,0
			CV	0,54	1,73	1,91	0,21	2,36	1,71
		SAC-A	Média	91,2	94,1	94,3	94,3	96,1	97,4
			CV	0,66	1,53	0,27	2,85	1,69	0,09

SAC-T e SAC-A – SACs-EHSS, cultivados com tifton 85 e cultivados com alternantera, respectivamente.

CV – coeficiente de variação

Analisando-se os dados apresentados na Tabela 5, pode-se observar que a maior diferença nos valores da série de sólidos entre as profundidades está na porcentagem de SVT, sendo que o teor de SVT nos sistemas cultivados com tifton 85, na profundidade de 0 a 20 cm, foi 4,2; 2,5 e 3,8 vezes maior que os obtidos na profundidade abaixo de 20 cm, respectivamente para o 1º, 2º e 3º terços dos leitões, no que se refere ao material fino, e 7,0, 5,1 e 8,4, respectivamente, no que se refere ao material grosseiro. Já para os sistemas cultivados com a alternantera (SAC-A) a relação da profundidade de 0 a 20 cm em relação ao material coletado em maiores profundidades (abaixo de 20 cm) também foi maior: 4,5; 5,3 e 3,6 nos

1º, 2º e 3º terços dos SACs-EHSS, respectivamente em relação material fino, e 8,7, 3,0 e 7,1, respectivamente, no material grosseiro. A maior presença desse material orgânico na camada superior dos SACs-EHSS se deve, aparentemente, a contribuição dos depósitos de matéria orgânica morta por parte das plantas e pela deposição de sólidos sobre o meio suporte.

Ressalta-se, também, a importância de terem sido realizadas as análises nas duas granulometrias (fina e mais grosseira) do material, uma vez que constatou-se maior presença de material orgânico grosseiro que fino, na profundidade de 0 a 20 cm do perfil dos SACs-EHSS cultivados.

5.3.3. Teores de nitrogênio e fósforo no material colmatante dos SACs-EHSS

Nas Tabelas 6 e 7 está apresentado o resumo da análise de variância das variáveis: nitrogênio total (NT), nitrogênio amoniacal (N-Amoniacal), nitrato (N-NO_3^-), fósforo total (PT) e fósforo disponível (PD), respectivamente, referentes às condições operacionais (SAC-C, SAC-T e SAC-A) e às posições (1º terço, 2º terço e 3º terço do leito dos SACs-EHSS).

Tabela 6. Resumo da análise de variância do teor de nitrogênio total (NT), nitrogênio amoniacal (N- Amoniacal) e nitrato (N-NO₃⁻), submetidos às condições operacionais (SAC-C, SAC-T e SAC-A) e às posições (1º terço, 2º terço e 3º terço dos leitos).

Fonte de Variação	GL	Material Fino			Material Grossoiro		
		Quadrado Médio			Quadrado Médio		
		NT	N-Amoniacal	N-NO ₃ ⁻	NT	N-Amoniacal	N-NO ₃ ⁻
Vegetação(V)	2	1,5E+07**	2146278**	1,2E07*	1,9E+08**	4657917**	130397**
Resíduo (a)	3	579181	195017	159779	1694490	207973	31272
Posição (P)	2	3,0E+07 ^{ns}	521553 ^{ns}	127354 ^{ns}	6,3E+07 ^{ns}	1322789 ^{ns}	12296 ^{ns}
V x P	4	3227825 ^{ns}	176632 ^{ns}	39241 ^{ns}	1,1E+07 ^{ns}	208293 ^{ns}	97763 ^{ns}
Resíduo (b)	6	5814963	371558	305872	1,0E+07	260702	58045
CV (%) Parcela		7,89	2,21	31,73	15,18	25,84	31,97
CV(%) Subparcela		24,99	30,61	43,90	36,88	28,93	43,56

ns, ** e *: não significativo, significativo a 1 e 5% de probabilidade, pelo teste F, respectivamente.

FV – fonte de variação; GL – graus de liberdade; CV – coeficiente de variação

SAC-C, SAC-T e SAC-A – SACs-EHSS sem cultivo, cultivados com tifton 85 e cultivados com alternantera, respectivamente.

Tabela 7. Resumo da análise de variância do teor de fósforo total (PT) e fósforo disponível (PD), submetidos às condições operacionais (SAC-C, SAC-T e SAC-A) e às posições (1º terço, 2º terço e 3º terço dos leitos).

Fonte de variação	GL	Material Fino		Material Grossoiro	
		Quadrado Médio		Quadrado Médio	
		PT	PD	PT	PD
Vegetação(V)	2	1,4E+08*	1,7E+08*	1,9E+08*	1,5E+08*
Resíduo (a)	3	2,3E+07	1,9E+07	1,8E+07	1,5E+07
Posição (P)	2	1,3E+08 ^{ns}	9,4E+07 ^{ns}	2,2E+08 ^{ns}	1,3E+07 ^{ns}
V x P	4	3,8E+07 ^{ns}	3,0E+07 ^{ns}	2,1E+07 ^{ns}	2,3E+07 ^{ns}
Resíduo (b)	6	4,5E+07	3,4E+07	2,5E+07	1,9E+07
CV (%) Parcela		35,12	50,55	39,63	51,14
CV(%) Subparcela		49,20	69,35	46,40	57,07

ns, *: não significativo, significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F, respectivamente.

FV – fonte de variação; GL – graus de liberdade; CV – coeficiente de variação

SAC-C, SAC-T e SAC-A – SACs-EHSS sem cultivo, cultivados com tifton 85 e cultivados com alternantera, respectivamente.

A análise de variância demonstrou que, em relação a todas as variáveis analisadas, só existe diferença significativa no que se refere ao efeito da vegetação, nas diferentes condições operacionais (SAC-C, SAC-T e SAC-A) a que os SACs-EHSS foram submetidos.

Na Tabela 8 estão apresentadas as médias dos teores de nitrogênio total (NT), nitrogênio amoniacal (N-Amoniacal) e nitrato (N-NO₃⁻) e na Tabela 9 as médias dos teores de fósforo total (PT) e fósforo disponível (PD) no material presente nos interstícios do material poroso dos SACs-EHSS submetidos às diferentes condições operacionais.

Tabela 8. Valores médios em (mg kg⁻¹) de nitrogênio total (NT), nitrogênio amoniacal (N-Amoniacal) e nitrato (N-NO₃⁻) no material presente nos interstícios do material poroso dos SACs-EHSS submetidos às condições operacionais SAC-C, SAC-T e SAC-A.

Tratamento	Material Fino			Material Grosseiro		
	NT	N-Amoniacal	N-NO ₃ ⁻	NT	N-Amoniacal	N-NO ₃ ⁻
SAC-C	3941,8C	1357,5B	85,82C	2062,5B	765,1B	23,0B
SAC-T	11335,7B	2070,5AB	874,1A	11039,5A	2101,7A	737,3A
SAC-A	13666,5A	2545,8A	819,3B	12624,9A	2427,9A	899,1A

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

SAC-C, SAC-T e SAC-A – SACs-EHSS sem cultivo, cultivados com tifton 85 e cultivados com alternantera, respectivamente.

Tabela 9. Valores médios em (mg kg⁻¹) de fósforo total (PT) e fósforo disponível (PD) no material presente nos interstícios do material poroso dos SACs-EHSS submetidos às condições operacionais SAC-C, SAC-T e SAC-A.

Tratamento	Material Fino		Material Grosseiro	
	PT	PD	PT	PD
SAC-C	8141,7B	2772,5B	4481,9B	1977,4B
SAC-T	15385,9AB	9907,6AB	15297,9A	8882,2AB
SAC-A	17440,8A	13190,7A	12336,9A	11859,6A

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

SAC-C, SAC-T e SAC-A – SACs-EHSS sem cultivo, cultivados com tifton 85 e cultivados com alternantera, respectivamente.

De acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 8 e 9, houve diferença significativa entre todas as variáveis analisadas comparando-se com as condições operacionais dos SAC-C e SAC-A, tanto para o material fino como para o grosseiro, sendo maiores os valores médios obtidos na condição operacional SAC-A. No que se refere ao SAC-T, as diferenças foram significativas em relação ao SAC-C para as variáveis NT, N-NO₃⁻, para o material fino e NT, N-Amoniacal, N-NO₃⁻ e PD, para o material grosseiro, novamente os maiores valores das médias foram obtidos nos SACs-EHSS cultivados com plantas. Pode-se inferir que a presença de plantas nos SACs contribuiu para a permanência de nutrientes em virtude da maior retenção de sólidos (material orgânico) ricos nesses nutrientes.

Observa-se que o teor de nitrogênio total, nitrogênio amoniacal e de nitrato são maiores no material fino e grosseiro dos SACs cultivados que nos não cultivados. Acredita-se que isso se deva à maior concentração desses nutrientes no tecido morto das plantas, constituintes importantes do material colmatante do meio poroso (Tabela 8). A mesma observação pode ser feita em relação ao fósforo (Tabela 9).

Esses resultados qualitativos do material colmatante do meio poroso corroboram as indicações de que o material orgânico morto das plantas é importante contribuinte para a colmatação do meio, o que também indica que técnicas de descolmatação devem vislumbrar meios de proporcionar mineralização do material orgânico morto das plantas.

O principal intuito de caracterizar os nutrientes nitrogênio e fósforo nos SACs foi verificar se haviam condições ótimas, em termos nutricionais, para que os micro-organismos atuassem de forma eficiente na degradação do material orgânico presente nos sistemas. Para se possibilitar maior desenvolvimento de micro-organismos no meio, recomenda-se a manutenção de uma relação N:P da ordem de 5:1 para sistemas aeróbios e anaeróbios (METCALF; EDDY, 2003). De acordo com os resultados apresentados na Tabela 8, a relação N:P no material sólido coletado nos SACs-EHSS submetidos às condições operacionais SAC-C, SAC-T e SAC-A foi 0,5; 0,7 e 0,8, respectivamente, ou seja, bem abaixo do recomendado. Isso indicou que, por hipótese, o estabelecimento de uma relação ideal de N:P, proporcionada com a aplicação de uma solução nutritiva de ureia

(45% de N), poderia conduzir à mais rápida degradação do material orgânico colmatante e, com isso, desobstrução parcial dos poros.

5.4. Monitoramento das características químicas do afluente e efluente dos SACs-EHSS após início da aplicação da solução nutritiva

Para acompanhar a influência da passagem da solução nutritiva nos SACs, foram realizadas análises semanais de nitrogênio total (NT), demanda química de oxigênio (DQO), e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) no afluente e efluente dos SACs-EHSS, durante o período experimental.

Devido ao fato da solução nutritiva ser composta apenas por uma mistura de água e uréia (45% de N), realizou-se o acompanhamento da concentração de nitrogênio total no afluente, ao longo dos 55 dias de monitoramento (Figura 16).

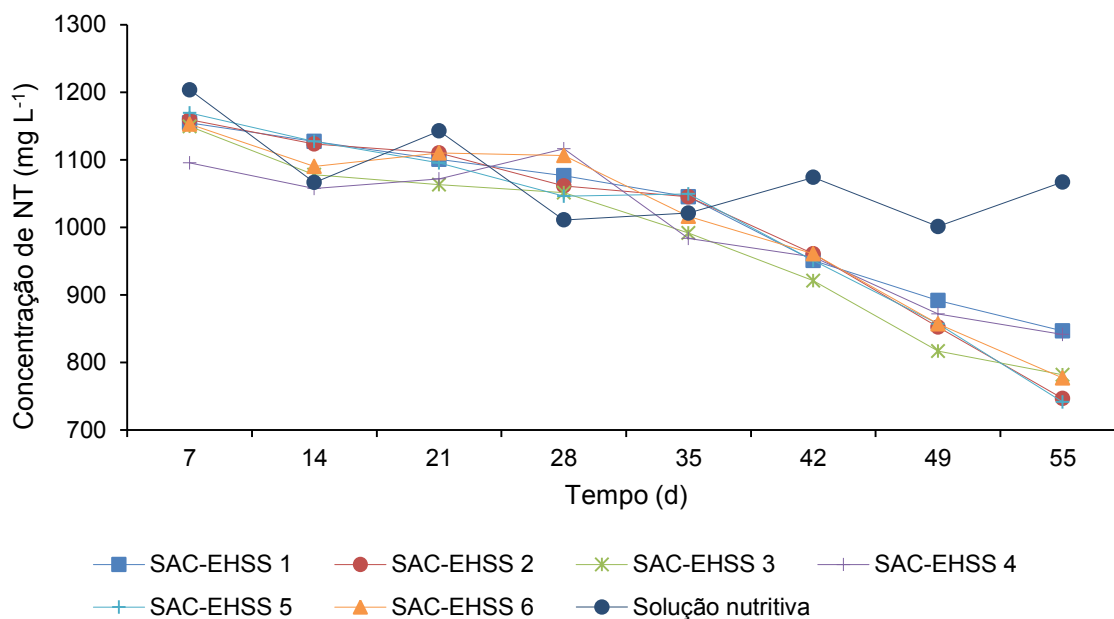


Figura 16: Série temporal da concentração de NT na solução nutritiva afluente e efluente dos SACs-EHSS sem vegetação (SAC-EHSS 1 e SAC-EHSS 4), cultivado com capim tifton 85 (SAC-EHSS 2 e SAC-EHSS 5) e cultivado com alternantera (SAC-EHSS 3 e SAC-EHSS 6).

De acordo com a Figura 16, podem ser observadas pequenas variações nos valores de NT na solução nutritiva afluente durante o período de monitoramento dos SACs-EHSS, o que poderia ser esperado em razão da solução nutritiva ser preparada semanalmente, o que pode gerar pequenas alterações na concentração previamente planejada.

Na mesma Figura também estão apresentadas as variações de nitrogênio total no efluente dos SACs-EHSS, ao longo do período experimental. Durante as quatro primeiras semanas, os valores da concentração de NT no afluente e efluente praticamente não diferiram, ou seja, não estava ocorrendo nenhuma perda/consumo de nitrogênio nos sistemas. A partir do vigésimo oitavo dia, iniciou-se um decaimento na concentração efluente de NT em todos os SACs-EHSS, sendo mais expressivo nos SACs-EHSS vegetados. Duas são as principais hipóteses para o ocorrido: o nitrogênio serviu como fonte de nutriente para o crescimento dos micro-organismos e parte dele foi absorvido pelas plantas.

Segundo Metcalf e Eddy (2003) o carbono, nitrogênio e o fósforo são macronutrientes essenciais para processos biológicos e a ausência ou presença em quantidade insuficiente de um deles pode limitar o crescimento dos micro-organismos e prejudicar o funcionamento dos sistemas biológicos. Então, com a aplicação da solução nutritiva a base de nitrogênio, procurou-se estabelecer condições ótimas, em termos nutricionais, para o crescimento dos micro-organismos, de modo que atuassem de forma mais eficiente na degradação do material orgânico. Essa redução do material orgânico foi constatada pelo decaimento dos valores das concentrações de DBO e DQO da água efluente em todos os sistemas (Figura 17 e Figura 18), respectivamente.

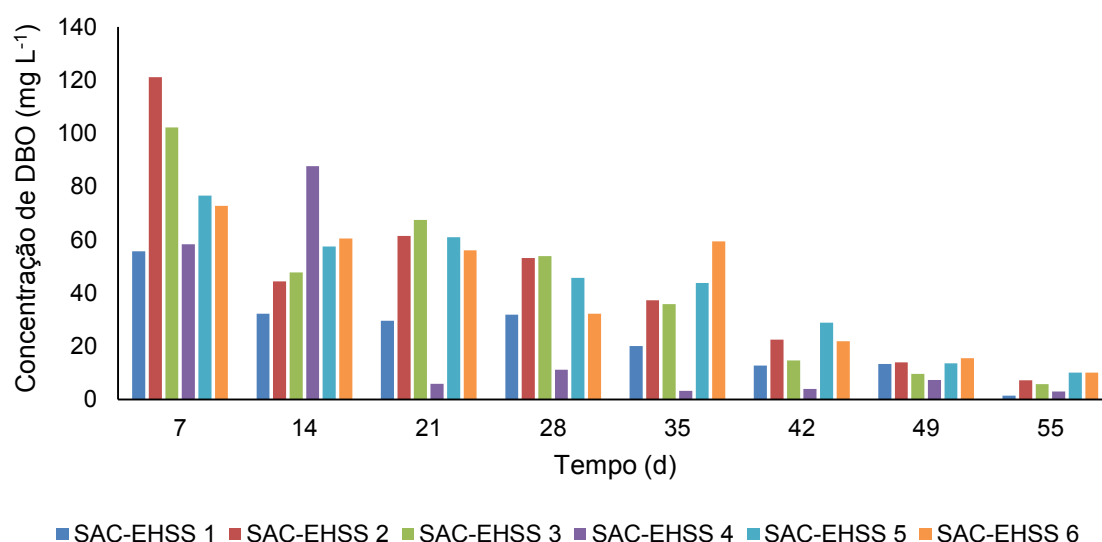


Figura 17: Série temporal das concentrações efluentes de DBO nos SACs-EHSS sem vegetação (SAC-EHSS 1 e SAC-EHSS 4), cultivado com capim tifton 85 (SAC-EHSS 2 e SAC-EHSS 5) e cultivado com alternantera (SAC-EHSS 3 e SAC-EHSS 6).

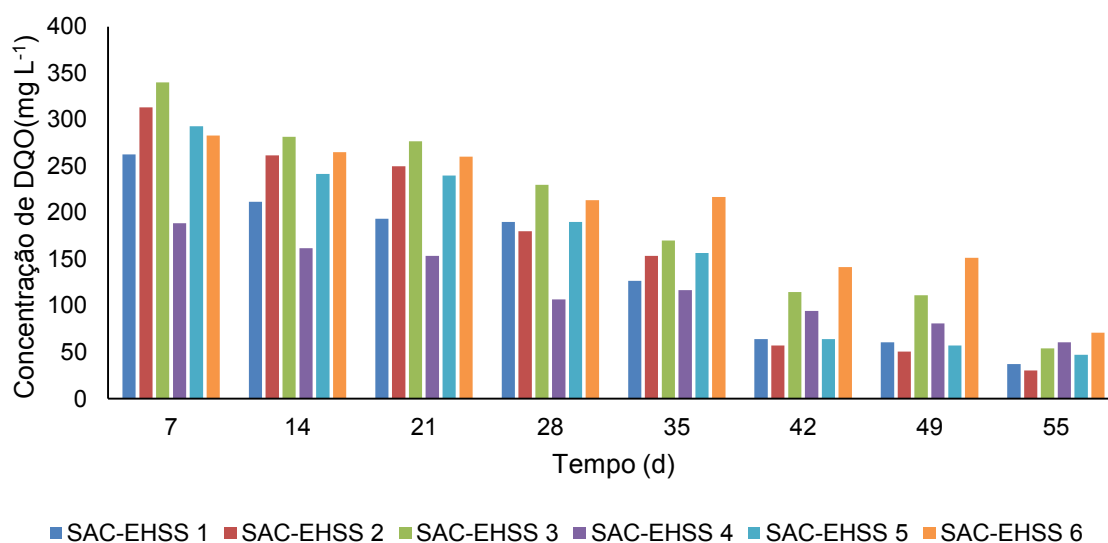


Figura 18: Série temporal das concentrações efluentes de DQO nos SACs-EHSS sem vegetação (SAC-EHSS 1 e SAC-EHSS 4), cultivado com capim tifton 85 (SAC-EHSS 2 e SAC-EHSS 5) e cultivado com alternantera (SAC-EHSS 3 e SAC-EHSS 6).

Pode-se observar que houve redução nas concentrações de DBO e DQO do efluente dos SACs-EHSS com o decorrer do tempo de aplicação da solução nutritiva, durante o período experimental. Inicialmente, os efluentes dos SAC-EHSS 1, SAC-EHSS 2, SAC-EHSS 3, SAC-EHSS 4, SAC-EHSS 5 e SAC-EHSS 6 apresentavam concentrações de DBO de 56 mg L^{-1} , 121 mg L^{-1} , 102 mg L^{-1} , 58 mg L^{-1} , 77 mg L^{-1} e 73 mg L^{-1} respectivamente, e, após 55 dias da passagem da solução nutritiva, essas concentrações reduziram para 1 mg L^{-1} , 7 mg L^{-1} , 6 mg L^{-1} , 3 mg L^{-1} , 10 mg L^{-1} e 10 mg L^{-1} , respectivamente, o que representou um decaimento de 97%, 94%, 94%, 95%, 87%, 86%, respectivamente, nas concentrações de DBO. No que se refere à DQO, inicialmente os SAC-EHSS 1, SAC-EHSS 2, SAC-EHSS 3, SAC-EHSS 4, SAC-EHSS 5 e SAC-EHSS 6 apresentavam concentrações de 263 mg L^{-1} , 313 mg L^{-1} , 340 mg L^{-1} , 189 mg L^{-1} , 293 mg L^{-1} e 283 mg L^{-1} , respectivamente, e, após 55 dias da passagem da solução nutritiva, essas concentrações reduziram para 37 mg L^{-1} , 30 mg L^{-1} , 53 mg L^{-1} , 60 mg L^{-1} , 47 mg L^{-1} e 71 mg L^{-1} respectivamente, representando um decaimento nas concentrações de DQO de 86%, 90%, 84%, 68%, 84%, 75%, respectivamente. Com esse acompanhamento da água residuária efluente, pode-se inferir que parte do material orgânico presente (mais lábil) nos sistemas foi

sendo degradado com o tempo, em virtude do aporte de nutrientes. Isso fez com que a fonte de material orgânico solúvel no meio fosse se esgotando durante a referida aplicação, o que, indiretamente, indicou desobstrução do meio poroso. Esses resultados indicaram, assim, que no tratamento de descolmatação de SACs em repouso, o monitoramento da qualidade do efluente produzido pode ser efetivo no controle do processo.

5.5. Avaliação de alterações físico-hídricas no leito dos SACs em decorrência do processo de descolmatação

Para avaliação dos efeitos da aplicação da solução nutritiva no processo de descolmatação dos SACs-EHSS, realizou-se uma comparação entre as séries de sólidos (ST, SVT e SFT) e carbono facilmente oxidável (CO_{fo}), antes e após o tratamento, além de testes de condutividade hidráulica, com acompanhamento no escoamento superficial nos sistemas, estando os resultados apresentados nos itens a seguir.

5.5.1. Análise estatística entre as séries de sólidos e carbono facilmente oxidável, antes e após a passagem da solução nutritiva nos SACs-EHSS

Na Tabela 10 estão apresentados os valores médios das séries de sólidos e carbono facilmente oxidável, antes e após a passagem da solução nutritiva, bem como a diferença dos mesmos. Foi realizada a análise estatística da diferença para saber se a passagem da solução nutritiva contribuiu no processo de descolmatação dos SACs-EHSS.

Tabela 10. Valores médios em (dag kg⁻¹) de sólidos totais (ST), sólidos fixos totais (SFT), sólidos voláteis totais (SVT) e carbono orgânico facilmente oxidável (CO_{fo}), antes (A) e depois (D) da passagem da solução nutritiva nos SACs-EHSS e a diferença entre eles (A-D).

Material Fino												
	ST			SFT			SVT			CO _{fo}		
TRAT.	A	D	A - D	A	D	A - D	A	D	A - D	A	D	A - D
SAC-C	98,77	98,50	0,27 ^{ns}	93,95	94,78	-0,83 [#]	6,05	5,22	0,83 [#]	2,40	2,27	0,13 ^{ns}
SAC-T	97,18	96,78	0,40 ^{ns}	84,37	86,04	-1,67 [*]	15,63	13,96	1,67 [*]	5,70	4,97	0,73 [#]
SAC-A	97,20	97,80	-0,60 ^{ns}	81,42	87,49	-6,07 [*]	18,58	12,51	6,07 [*]	6,41	4,40	2,01 [*]
Material Grosseiro												
	ST			SFT			SVT			CO _{fo}		
TRAT.	A	D	A - D	A	D	A - D	A	D	A - D	A	D	A - D
SAC-C	99,32	99,30	0,02 ^{ns}	96,72	96,98	-0,26 ^{ns}	3,28	3,02	0,26 ^{ns}	1,21	0,80	0,41 ^{ns}
SAC-T	96,97	96,73	0,24 ^{ns}	83,07	88,66	-5,59 [*]	16,93	11,33	5,59 [*]	5,86	3,93	1,93 [*]
SAC-A	96,77	98,74	-1,97 ^{ns}	82,00	93,19	-11,19 [*]	18,00	6,81	11,19 [*]	6,25	3,15	3,10 [*]

ns; *, #- não significativo; significativo a 5 e 10 % de probabilidade, pelo teste "t", respectivamente.

SAC-C, SAC-T e SAC-A – SACs-EHSS sem cultivo, cultivados com tifton 85 e cultivados com alternantera, respectivamente.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 10, a passagem da solução nutritiva no leito dos SACs-EHSS proporcionou reduções significativas no teor de sólidos voláteis, ou seja, parte do material orgânico presente no meio foi degradado, contribuindo assim, para desobstrução dos poros do meio filtrante.

Observa-se que, nos sistemas cultivados, a redução nos teores de SVT, após a passagem da solução nutritiva, foi mais expressiva, sendo de 11 e 33% para os SAC-T e SAC-A, respectivamente, no material fino. No que se refere ao material grosseiro, essa redução foi ainda maior, sendo de 33% para o SAC-T e 62% para o SAC-A. Uma possível hipótese para maior redução dos SVT no SAC-A, seria devido à presença de um sistema de aeração nas plantas (aerênquima) adaptado aos ambientes alagados que aumenta a troca de gases entre a parte mais profunda dos SACs e a atmosfera, favorecendo a decomposição da matéria orgânica pelos micro-organismos, enquanto, o capim tifton não apresenta essa estrutura.

A maior redução nos teores de SVT do material grosseiro está associado ao fato de ser esse material mais lábil que o mais fino (ver CO_{f0} dos materiais na Tabela 10). Assim, a degradação da matéria orgânica do material grosseiro foi preponderante no processo de descolmatação dos sistemas em estudo.

A massa retirada de material grosseiro colmatante foi de 20,6; 30,3 e 33,0 g cm^{-3} de amostra coletada, respectivamente para os SACs-EHSS controle (SAC-C), cultivados com tifton 85 (SAC-T) e cultivados com alternantera (SAC-A). Ou seja, a massa de material grosseiro nos SACs cultivados foram maiores 32 e 37%, respectivamente, nos SAC-T e SAC-A em relação aos SACs não cultivados. Dessa forma, pode inferir que a massa de material grosseiro colmatante, presente nos SACs cultivados, são predominantemente constituídas por tecido morto das plantas, que são mais fáceis de degradar, assim, apesar da colmatação ser mais rápida nos SACs cultivados, o processo de descolmatação também ocorre de maneira mais rápida.

5.5.2. Medição da condutividade hidráulica em meio saturado

Foram realizados duas medições da condutividade hidráulica em meio saturado, uma antes (Medição 1) e a outra após (Medição 2) à passagem da solução nutritiva nos SACs. Nas Figuras 19, 20 e 21 estão apresentados,

respectivamente, os resultados de condutividade hidráulica ao longo do SAC-EHSS controle (SAC-C), cultivado com tifton 85 (SAC-T) e cultivado com alternantera (SAC-A). Na Figura 22 é apresentado um gráfico com os valores médios de condutividade hidráulica em um SAC-EHSS com brita e água limpas (valores obtidos no teste de condutividade hidráulica realizado por Ferres (2012)).

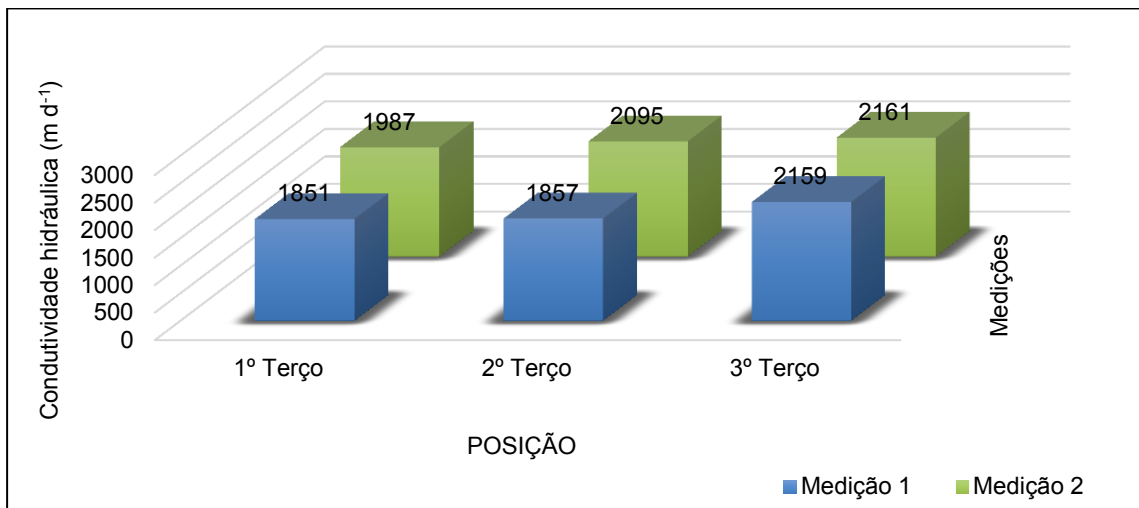


Figura 19: Distribuição da condutividade hidráulica no meio filtrante ao longo do 1º, 2º e 3º terços do leito do SAC-EHSS controle (SAC-C), nas medições 1 e 2.

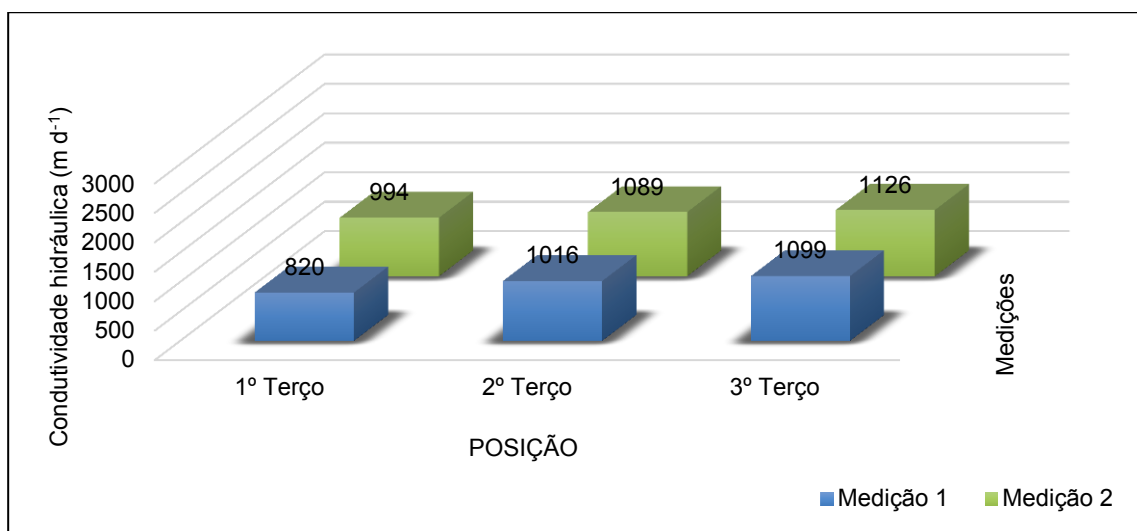


Figura 20: Distribuição da condutividade hidráulica no meio filtrante ao longo do 1º, 2º e 3º terços do leito do SAC-EHSS cultivado com tifton 85 (SAC-T), nas medições 1 e 2.

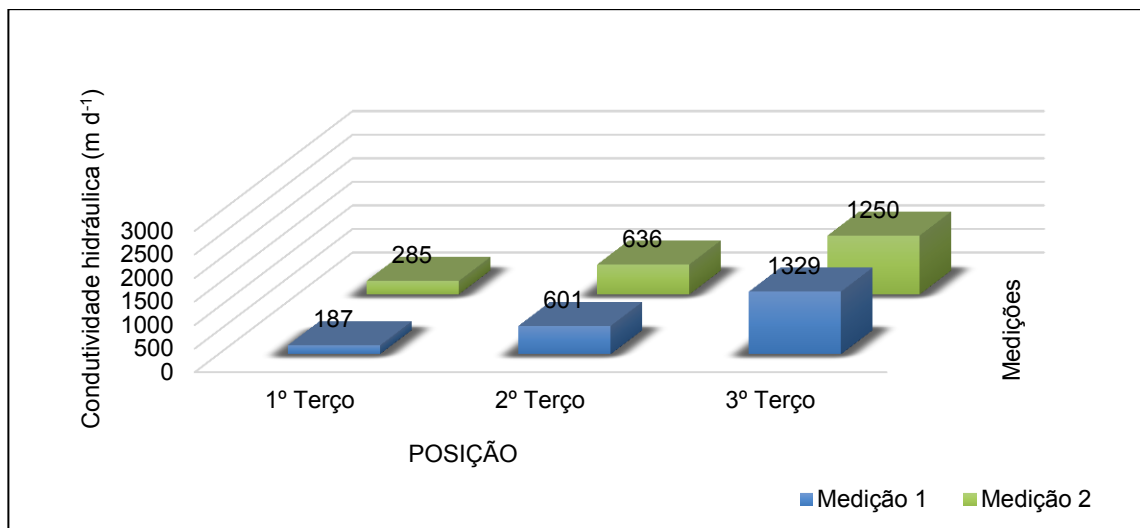


Figura 21: Distribuição da condutividade hidráulica no meio filtrante ao longo do 1º 2º e 3º terços do leito do SAC-EHSS cultivados com alternantera (SAC-A), nas medições 1 e 2.

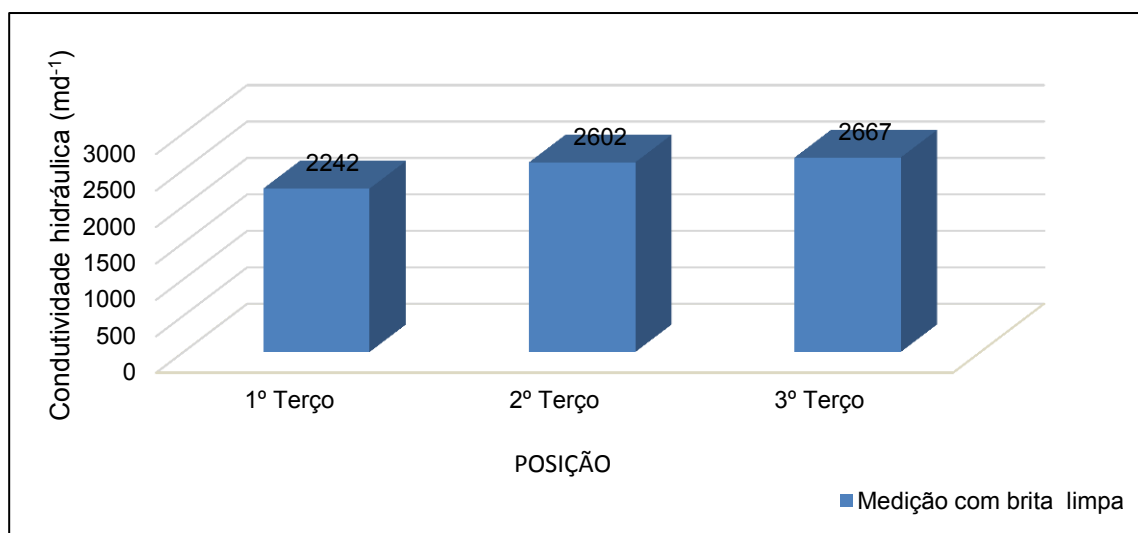


Figura 22: Distribuição da condutividade hidráulica no meio filtrante ao longo do 1º 2º e 3º terços do leito do SAC-EHSS com brita e água limpas.

Nota-se que o SAC-C, SAC-T e SAC-A apresentaram menores valores de condutividade hidráulica saturada que o sistema contendo brita “limpa” (SAC sem uso), mesmo após a passagem da solução nutritiva. Comparando-se a condutividade hidráulica na medição 2 dos SACs-EHSS estudados com a do SAC-EHSS contendo brita limpa, apresentados por Ferres (2012), teria que haver uma recuperação de 11, 19 e 19%, respectivamente, no 1º, 2º, e 3º terços dos SACs-EHSS sem vegetação; de 56, 58 e 59 %, respectivamente no 1º, 2º, e 3º terços dos SACs-EHSS cultivados com tifton 85; e de 87, 76 e 53%,

respectivamente, no 1º, 2º, e 3º terços dos SACs-EHSS cultivados com alternantera, para restabelecimento das condições hidrodinâmicas iniciais dos sistemas.

Pode-se observar que o SAC-C (sem planta), mesmo após a passagem da solução nutritiva, ainda apresentou maiores valores de condutividade hidráulica saturada que os sistemas plantados SAC-T e SAC-A, o que ficou evidenciado tanto na medição 1 como na medição 2. Supõe-se que essa diferença se deva à contribuição dos depósitos de matéria orgânica morta por parte das plantas nos SACs cultivados, o que pode ter contribuído no processo de colmatação dos sistemas e, conseqüentemente, na diminuição da condutividade hidráulica no meio poroso.

Alguns autores também identificaram maior redução na condutividade hidráulica em meio saturado nos SACs plantados. Ferres (2012), trabalhando com SACs-EHSS utilizados no tratamento de água residuária de suinocultura, e aplicando a mesma metodologia utilizada para estimar a condutividade hidráulica utilizada neste trabalho, também encontrou maiores valores de condutividade hidráulica saturada nos SACs-EHSS não plantados. Os valores variaram de 2123 a 2834 m d⁻¹, nos sistemas não cultivados; de 1392 m d⁻¹ a 2390 m d⁻¹, nos sistemas cultivados com tifton 85 (*Cynodon spp.*); e de 1449 a 1973 m d⁻¹, nos cultivados com alternantera (*Alternanthera philoxeroides*). Paoli e von Sperling (2013) também trabalharam com SACs-EHSS plantado e não plantado, no tratamento de efluente de um reator UASB e verificaram que a condutividade hidráulica em meio saturado no primeiro foi menor e menos uniforme ao longo do comprimento dos SACs, em relação ao segundo. Além disso, observaram variação de 7 a 41 m d⁻¹ na condutividade hidráulica na zona de entrada do meio poroso do SAC-EHSS cultivado, e no não cultivado de 67 a 166 m d⁻¹, enquanto que a variação na zona de saída (18 m de distância da entrada do SAC-EHSS) foi de 30 a 107 m d⁻¹, no SAC plantado e no não plantado foi de 198 a 324 m d⁻¹.

Realizando-se uma comparação dos valores de condutividade hidráulica antes (medição 1) e após a passagem da solução nutritiva (medição 2) ao longo dos sistemas, verificou-se um incremento de 7%, 13% e 0,1% nessa variável, quando medida no respectivamente no 1º terço, 2º terço e 3º terço do SAC-C; e 21%, 11% e 7%, no SAC-T. No SAC-A, foi evidenciado aumento na condutividade hidráulica apenas no 1º terço de 52% e no 2º terço de 6%, já no 3º terço houve

diminuição na condutividade hidráulica, resultado que não corrobora com os apresentados anteriormente. Supõe-se que o fato da alternantera ter sido atacada por uma praga, provocando sua morte, contribuiu para redução da eficiência na recuperação na condutividade hidráulica nos terços, sendo mais evidente no 3º terço, uma vez que o mesmo se encontrava menos colmatado anteriormente. Assim, além de prejuízos à degradação do material orgânico acumulado, houve maior aporte de matéria orgânica na parte superficial e subsuperficial do SAC, o que proporcionou diminuição da condutividade hidráulica no sistema.

Verifica-se que foi no 1º terço dos SACs cultivados que ocorreu maior recuperação na condutividade hidráulica em meio saturado, por ser esse o local de teor de material orgânico mais lábil, conforme pode ser verificado na Tabela 4. Com a degradação desse material, houve aumento na porosidade no início dos leitos e, conseqüentemente, na condutividade hidráulica no meio poroso. O inverso foi verificado no 3º terço, no qual não houve recuperação e, às vezes até piora na condutividade hidráulica no meio poroso saturado. Acredita-se que isso se deva ao transporte, por arraste, de material particulado para o terço final dos SACs-EHSS, ao ser aplicada a solução nutritiva.

5.5.3. Escoamento superficial da solução nutritiva aplicada nos SACs-EHSS

Na Figura 23 está apresentado o comprimento do leito em que havia escoamento superficial durante o período de aplicação da solução nutritiva nos SACs-EHSS.

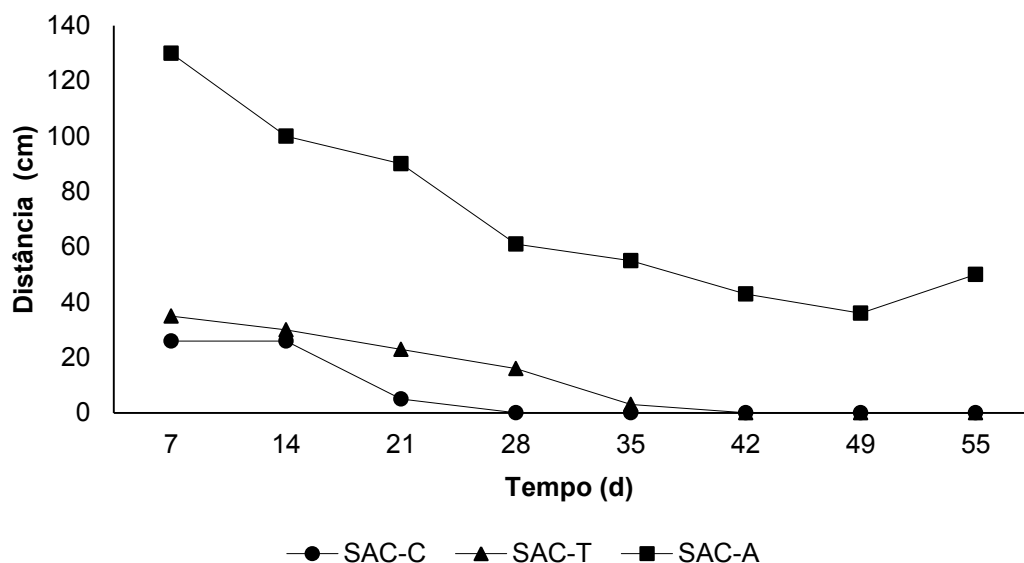


Figura 23: Comprimento do leito em que ocorria escoamento superficial nos tratamentos SAC-C (SAC-EHSS sem vegetação), SAC-T (SAC-EHSS cultivado com capim tifton 85) e SAC-A (SAC-EHSS cultivado com alternantera)

A primeira medição do comprimento de escoamento superficial, realizada no sétimo dia de aplicação da solução nutritiva, indicou que o SAC-C (sem plantas), apresentou menor escoamento superficial que os sistemas cultivados SAC-T e SAC-A. Esse fato foi evidenciado durante todo período de monitoramento, podendo ter como principal interferente a contribuição dos depósitos de matéria orgânica morta por parte das plantas formando uma camada de aproximadamente 15 cm com maior concentração de material orgânico.

A redução no comprimento de escoamento superficial da solução nutritiva ocorreu de forma gradativa ao longo do tempo de tratamento, não sendo mais observado no SAC-C a partir da quarta semana e no SAC-T a partir da quinta semana. Em relação ao SAC-A, a redução do escoamento superficial foi gradual, atingindo valor máximo de 72% na sétima semana de tratamento (49 dias de aplicação da solução nutritiva), mas em nenhum momento percebeu-se o cessar do mesmo. Entretanto, a partir do quadragésimo nono dia (oitava semana de aplicação da solução nutritiva) notou-se aumento de 39% no escoamento superficial em relação ao que foi observado na sétima semana, o que coincidiu com o período em que ocorreu morte das plantas de alternantera, em decorrência do ataque de uma praga. Esses resultados demonstram a influência da presença

de tecido morto da alternantera no escoamento superficial da solução nutritiva nos sistemas em que ela foi cultivada.

Na Figura 24 é possível visualizar o escoamento superficial antes da passagem da solução nutritiva e, por ocasião do término do experimento, após efetuado o referido tratamento.



Figura 24: Presença (a) e ausência (b) de escoamento superficial nos leitos dos SACs-EHSS cultivados com tifton.

Durante todo período de monitoramento dos SACs observou-se que as plantas estabeleceram um ambiente com grande quantidade de matéria orgânica e detritos, fazendo com que nesses sistemas plantados ocorresse o processo de colmatação mais rapidamente. Em contrapartida, observou-se que nos SACs plantados a redução do escoamento superficial e o aumento da condutividade hidráulica foram proporcionalmente maiores que os medidos nos SACs não cultivados. As plantas e seus resíduos proporcionaram ambiente adequado para o desenvolvimento da comunidade microbiana, contribuindo no processo de mais rápida degradação do material orgânico retido no meio poroso dos sistemas.

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que a passagem da solução nutritiva à base de nitrogênio é efetiva na redução do escoamento superficial em SACs cultivados e pode ser utilizada na recuperação da condutividade hidráulica nesses sistemas.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A maior parte do material colmatante foi composto por sólidos fixos, sendo de 95, 84 e 82% nos SACs-EHSS controle (SAC-C), SACs-EHSS cultivados com capim tifton 85 (SAC-T) e SACs-EHSS cultivados com alternantera (SAC-A), respectivamente;
- A colmatção do meio poroso foi mais evidente nos SACs cultivados que no não cultivado, a contribuição dos depósitos de matéria orgânica morta por parte das plantas foi à principal fonte da colmatção nos SACs-EHSS estudados;
- A aplicação de uma solução nutritiva à base de nitrogênio contribuiu para redução no escoamento superficial nos leitos, tendo sido a redução na concentração de material orgânico nas camadas superficiais um dos principais fatores para essa diminuição;
- A aplicação da solução nutritiva proporcionou recuperação da condutividade hidráulica saturada nos SACs-EHSS, sendo mais expressiva no primeiro terço dos leitos;
- O escoamento superficial da solução nutritiva diminuiu de forma gradativa ao longo do tempo com a aplicação da solução nos SACs-EHSS.

7. REFERÊNCIAS

ALCABAR, A. P. **Colmatación em humedalesconstruidos de flujo subsuperficial horizontal**. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2010, 224 p. Tese de doutorado.

AKRATOS, C.S.; TSIHRINTZIS, V.A. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v.29, n.2, p.173–191, 2007.

APHA [AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION]; AWWA [AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION]; WEF [WATER ENVIRONMENT FEDERATION]. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21th ed. Washington. D.C.: APHA/AWWA/WEF, 2012, [s.n.].

ASABE - **AMERICAN SOCIETY AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS**. Media Filters for Irrigation - Testing and Performance Reporting. St. Joseph, 1994. (ANSI/ASAE S539).

AVELAR, F. F. **Desempenho de sistemas alagados construídos cultivados com Mentha aquática no tratamento de esgoto sanitário**. Viçosa: UFV, 79p. 2012. Tese de doutorado.

BEHRENDTS, L.L.; BAILEY, E.; HOUKE, L.; JANSEN, P.; SMITH, S. Non-invasive methods for treating and removing sludge from subsurface flow constructed wetlands I. In: **Proceedings of the Annual National Onsite Wastewater Recycling Association (NOWRA) Meeting, March 2007**. Baltimore, Maryland, USA, 2007.

BRASIL, M. S.; MATOS, A. T. Avaliação de aspectos hidráulicos e hidrológicos de sistemas alagados construídos de fluxo subsuperficial. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.13, n. 3, p. 323-328, 2008.

BRASIL, M. S.; MATOS, A. T.; SOARES, A. A. Plantio e desempenho fenológico da taboa (*Typha* sp.) utilizada no tratamento de esgoto doméstico em sistema alagado construído. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.12, n. 3, p. 266-272, 2007.

BRIX, H. Functions of macrophytes in constructed wetlands. **Water Science and Technology**, v. 29, n. 4, p. 71-78, 1994.

BRIX, H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? **Water Science and Technology**, v. 35, n. 5, p. 11-17, 1997.

CASELLES-OSORIO, A., PUIGAGUT, J., SEGU, E., VAELO, N., GRANES, F., GARCÍA, D., GARCÍA, J. Solid accumulation in six full-scale subsurface flow constructed wetlands. **Water Research**, p. 41, n. 6, p. 1388-1389, 2007.

CASELLES-OSORIO, A.; GARCIA, J. Effect of physico-chemical pretreatment on the removal efficiency of horizontal subsurface-flow constructed wetlands. **Environmental Pollution**, v. 146, p. 55-63, 2007.

CHAGAS, R. C.; MATOS, A. T.; CECON, P. R.; LO MONACO, P. A. V.; FRANÇA, L. G. Cinética de remoção de matéria orgânica em sistemas alagados construídos cultivados com lírio amarelo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 11, p. 1186-1192, 2011.

CHAVAN B.L.; DHULAP V.P. Developing a Pilot Scale Angular Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland for Treatment of Sewage through Phytoremediation with *Colocasia esculenta*. **International Research Journal of Environment Sciences**, v. 2, n. 2, p. 6-14, 2013.

CHAZARENC, F.; GAGNON, V.; COMEAU, Y.; BRISSON, J. Effect of plant and artificial aeration on solids accumulation and biological activities in constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v. 35, p. 1005-1010, 2009.

CHEN, W.; CHEN, Z.; HE, Q.; WANG, X.; WANG, C.; CHEN, D.; LAI, Z. Root growth of wetland plants with different root types. **Acta ecologica sinica**, v. 27, n. 2, p. 450-457, 2007.

CHIARAWATCHAI, N.; HEERS, M.; OTTERPOHL, R. Criteria for determining alternative plants to improve the resource recovery efficiency in constructed wetlands. **Water Science e Technology**: IWA Publishing, WST 58.8 2008, p. 1665 - 1670, 2008.

COOPER, D.; GRIFFIN, P.; COOPER, P. Factors affecting the longevity of sub surface horizontal flow systems operating as tertiary treatment for sewage effluent. **Water Science e Technology**. n.9, v. 51, p.127–135, 2005.

COOPER, P. Constructed wetlands after 25 years of application: A review of the developments that we have made and the problems that we still have to overcome. In: **12th International Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control**, 4 a 8 de Outubro, 2010, Venice, Italy: Palombi, v. I, p. 13-22, 2010. CD-ROM.

COOPER, P.F., JOB, J.D., GREEN, B., SHUTES, R.B.E. Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. **WRc Publications, Swindon, United Kingdom**, p. 184, 1996.

FERRES, G. C. **Variabilidade da condutividade hidráulica e de formas do nitrogênio em sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial**. Viçosa: UFV, 76p., 2012. Dissertação mestrado.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

Fia, F. L. R. **Modelos de remoção de variáveis qualitativas em sistemas alagados construídos utilizados no tratamento de águas residuárias da suinocultura**. Viçosa: UFV, 156p., 2009. Tese Doutorado.

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.

FURLAN, R.A. **Avaliação da nebulização e abertura de cortinas na redução da temperatura do ar em ambiente protegido**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, 146p., 2001. Tese Doutorado.

GARCÍA, J.; OJEDA, E.; SALES, E.; CHICO, F.; PÍRIZ, T.; AGUIRRE, P.; MUJERIEGO, R. Spatial variations of temperature, redox potential, and contaminants in horizontal flow reed beds. **Ecological Engineering**, v. 21, n. 2-3, p. 129–142, 2003.

GUOFEN, H.; WEI, Z.; LIANFANG, Z.; YUNHUI, Z. Solubilization treatment to reverse clogging in vertical flow constructed wetlands. **Water Sci. Technol**, v. 61, n.10, p.1479–1487, 2010.

HANSON, A. Unplugging the bed of a subsurface-flow wetland using H₂O₂. In: **Nehring, K. W. & Brauning, S. E. (eds.) Wetlands and Remediation II**. Battelle Institute, Columbus Ohio, p.281–287, 2002.

HUA, G.; ZENG, Y.; ZHAO, Z.; CHENG, K.; CHEN, G. Applying a resting operation to alleviate bioclogging in vertical flow constructed wetlands: An experimental lab evaluation. **Journal of Environmental Management**, v. 136, p. 47-53, 2014.

HVORSLEV, M.J. **Time lag and soil permeability in ground water observations**. U.S.: Army Corps of Engineers Water-way Experimentation Station, 1951. Bulletin 36.

IWA WINTER, K. J.; GOETZ, D. The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**, v. 48, n. 5, p. 9–14, 2003.

IWA - **International Water Association. Constructed Wetlands for Pollution Control.** Processes, Performance, Design and Operation. IWA Publishing, London. P. 156, 2000.

KADLEC, R. H.; KNIGHT, R. L. **Treatment wetlands.** Florida: CRC Press, 893p. 1996.

KADLEC, R. H.; WALLACE, R. D. **Treatment Wetlands.** 2nd ed. Florida: CRC Press, 1016p. 2008.

KANTAWANICHKUL, S.; KLADPRASERT, S.; BRIX, H. Treatment of high-strength wastewater in tropical vertical flow constructed wetlands planted with *Typha angustifolia* and *Cyperus in volucratus*. **Ecological Engineering**, v. 35, n. 02, p. 238-247, 2009.

KNOWLES, P.; DOTRO, G.; NIVALA, J.; GARCÍA, J. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors. **Ecological Engineering**, v. 37, p. 99-112, 2011.

KNOWLES, P.R.; DAVIES, P.A. A method for the in-situ determination of the hydraulic conductivity of gravels as used in constructed wetlands for wastewater treatment. **Desalination and Water Treatment**, v.1, n. 5, p. 257-266, 2009.

KNOWLES, P.R.; GRIFFIN, P.; DAVIES, P.A. Complementary methods to investigate the development of clogging within a horizontal sub-surface flow tertiary treatment wetland. **Water research**, v. 44, n. 10, p. 320-330, 2010.

LA VARGA, D.; DÍAZ, M. A.; RUIZ, I.; SOTO, M. Avoid clogging in constructed wetlands by using anaerobic digesters as pre-treatment. **Ecological Engineering**, v. 52, p. 262-269, 2013.

LANGERGRABER, G.; HABERL, R.; LABER, J.; PRESSL, A. Evaluation of substrate clogging process in vertical flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**, v. 48, n. 5, p. 25-34, 2003.

LI, H.Z.; WANG, S.; YE, J.F.; XU, Z.X.; JIN, W. A practical method for the restoration of clogged rural vertical subsurface flow constructed wetlands for domestic wastewater treatment using earthworm. **Water Science and Technology**, v. 63, n. 2, p. 283-290, 2011.

MANNARINO, C. F.; FERREIRA, J. A.; CAMPOS, J. C.; RITTER, E. Wetlands para tratamento de lixiviados de aterros sanitários: experiências no aterro sanitário de Pirai e no aterro metropolitano de Gramacho (RJ). *Eng. Sanitaria e Ambiental*, v. 11, n. 2, p. 108-112, 2006.

MASTRORILLI, M.; RANIERI, E.; SIMEONE, V. Evaluation of hydraulic conductivity in a *Phragmites* wastewater treatment plant. **Transactions on Ecology and the Environment**, v. 49, p. 105 -111, 2011.

MATOS, A. T. **Qualidade do meio físico ambiental: práticas de laboratório**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2012.

MATOS, A. T.; FREITAS, W.S.; BORGES, A.C. Estudo cinético da remoção de matéria orgânica de águas residuárias da suinocultura em sistemas alagados construídos cultivados com diferentes espécies de vegetais. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 6, p. 1179, 2011.

MATOS, A. T.; ABRAHÃO, S. S.; LO MONACO, P. A. V.; SARMENTO, A. P.; MATOS, M. P. Capacidade extratora de plantas em sistemas alagados utilizados no tratamento de águas residuárias de laticínios. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 1311-1317, 2010.

MATOS, A. T.; FREITAS, W.S.; LO MONACO, P.A.V. Capacidade extratora de diferentes espécies vegetais cultivadas em sistemas alagados utilizados no tratamento de águas residuárias da suinocultura. **Ambiente & Água**, v. 4, n. 2, p. 31-45, 2009.

MATOS, A. T.; ABRAHÃO, S. S.; PEREIRA, O. G. Desempenho agrônomo de capim Tifton 85 (*Cynodon* spp.) cultivado em sistemas alagados construídos utilizados no tratamento de água residuária de laticínios. **Ambiente & Água**, v. 3, n. 1, p. 43-53, 2008.

METCALF & EDDY, Inc. **Wastewater Engineering: treatment and reuse**. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1.819p. 2003.

MURPHY, C., COOPER, D.; WILLIAMS, E. Reed bed refurbishment: a sustainable approach. In: **3rd International Symposium on Wetland Pollutant Dynamics and Control (WETPOL)**, p. 20-24 September 2009, p. 193-194. NAVFAC, 1986. Soil Mechanics. Naval Facilities Engineering

NGUYEN, L. M. Organic matter composition, microbial biomass and microbial activity in gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters. **Ecological Engineering**, v. 16, n. 2, p. 199–221, 2000.

NIVALA, J.; HOOS, M.; CROSS, C.; WALLACE, S.; PARKIN, G. Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. **Science of the Total Environment**, v. 380, p. 19-27, 2007.

NIVALA, J.; ROUSSEAU, D. Reversing clogging in subsurface flow constructed wetlands by hydrogen peroxide treatment: two case studies. **Water Sci. Technol**, v. 59, n. 10, p. 2037–2046, 2009.

NIVALA, J.; KNOWLES, P.; DOTRO, G.; GARCÍA, J.; WALLACE, S. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Measurement, modeling and management. **Water Research**, v. 46, p. 1625-1640, 2012.

OUELLET-PLAMONDON, C.; CHAZARENC, F.; COMEAU, Y.; BRISSON, J. Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate. **Ecological Engineering**, v. 27, n. 3, p. 258-264, 2006.

PAOLI, A.C. de. **Análise de desempenho e comportamento de wetlands horizontais de fluxo subsuperficial baseado em modelos hidráulicos e cinéticos**. Belo Horizonte, Escola de Engenharia - UFMG, 2010. 144p. Dissertação de Mestrado.

PAOLI, A.C.; Von SPERLING, M. Avaliação das condições hidrodinâmicas de wetlands construídos de escoamento horizontal subsuperficial (unidades plantadas e não plantadas). **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 2, p. 213-222, 2013.

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 & Technology**, v. 67, n. 6, p. 1345-1352, 2013.

PARK, W.H. Integrated constructed wetland systems employing alum sludge and oyster shells as filter media for P removal. **Ecological Engineering**, n. 3, p. 1275–1282, 2009.

PEDESCOLL, A., UGGETTI, E., LLORENS, E., GRANES, F., GARCIA, D.; GARCIA, J. Practical method based on saturated hydraulic conductivity used to assess clogging in subsurface flow constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v. 35, n. 8, p. 1216-1224, 2009.

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. **WaterResearch**, v. 45, p. 3579-3589, 2011.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Meteorologia agrícola**. (Apostila LCE 306). Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, 2007.

QUEIROZ, J. E. **Parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 167 p, 1995. Tese de Doutorado.

REYNOLDS, K., OAKES, P., HASLAM, A., NOLAN, M., & DOLNIK, L. Responses to powerlessness: Stereotyping as an instrument of social conflict. *Group Dynamics: Theory, Research and Practice*, n. 4, p. 275–290, 2000.

RIBEIRO Jr., J.I. **Análises estatísticas no SAEG**. Viçosa: UFV, 2001. 301p.

ROSSMANN, M.; MATOS, A.T.; ABREU, E. C.; SILVA, F. F; BORGES, A. C. Effect of influent aeration on removal of organic matter from coffee processing wastewater in constructed wetlands. **Journal of Environmental Management**, v. 128, p. 912-919, 2013.

ROUSSEAU, D.P.L., HORTON, D., GRIFFIN, P., VANROLLEGHEM, AND DE PAUW, N. Impact of operational maintenance on the asset life of storm reed beds. **Water Science and Technology**, v. 51, n. 9, p. 243-250, 2005.

SAEED, T.; AFRIN, R.; MUYEED, A. A.; SUN, G. Treatment of tannery wastewater in a pilot-scale hybrid constructed wetland system in Bangladesh. **Chemosphere**, v. 88, n. 9, p. 1065-1073, 2012.

SAEED, T.; SUN, G. A lab-scale study of constructed wetlands with sugarcane bagasse and sand media for the treatment of textile wastewater. **Bioresource technology**, v. 128, p. 438-447, 2013.

SALATI, E.; RODRIGUES, N.S. De poluente a nutriente, a descoberta do aguapé. **Revista Brasileira da Tecnologia**, v. 13, n. 3, p. 37-42, 1982.

SOROKO, M. Treatment of wastewater from small slaughterhouse in hybrid constructed wetlands systems. **Eco hydrology & Hydrobiology**, v. 7, n. 3, p. 339-343, 2007.

TANNER, C. C.; SUKIAS, J. P. Accumulation of organic solids in gravel bed constructed wetlands. **Water Science and Technology**, v. 32, n. 3, p. 229-239, 1995.

TANNER, C.C.; SUKIAS, J.P.S.; UPSDELL, M.P. Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewater. **Water Research**, v. 32, n. 10, p. 3046-3054, 1998.

TAYLOR, C. R.; HOOK, P. B.; STEIN, O. R.; ZABINSKI, C. A. Seasonal effects of 19 plant species on COD removal in subsurface treatment wetland microcosms. **Ecological Engineering**, 2010.

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, 1995.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Manual: Constructed wetlands treatment of municipal wastewater**. Cincinnati, Ohio: USEPA, Office of Research and Development, 2000. (EPA/625/R-99/010).

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias - Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. v.1. 2. ed. DESA-UFMG. Belo Horizonte – MG. 452p. 2005.

VYMAZAL, J. Horizontal sub surface flow and hybrid constructed wetland systems for wastewater treatment. **Ecological Engineering**, v. 25, p. 478-490, 2005.

VYMAZAL, J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. **Science of the Total Environment**, v. 380, p.48-65, 2007.

VYMAZAL, J.; KRÖPFELOVÁ, L. **Wastewater treatment in Constructed Wetlands with horizontal Sub-Surface Flow**. Environmental Pollution, v. 14. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2008. 566 p.

WALLACE, S.D.; KNIGHT, R.L. Small-scale Constructed Wetland Treatment Systems: Feasibility, Design Criteria, and O&M Requirements. Alexandria, Virginia: **Water Environment Research Foundation (WERF)**, 2006.

WINTER, K. J.; GOETZ, D. The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**, v. 48, n. 5, p. 9–14, 2003.