



NOTA TÉCNICA

PEGADA DE CARBONO E PEGADA HÍDRICA EM SISTEMA INTEGRADO DE ANAEROBIOSE + WETLAND CONSTRUÍDO DE FLUXO LIVRE COM SUPORTE FLUTUANTE + O₃ NO TRATAMENTO DE EFLUENTES URBANOS

Letícia Mesacasa*, Deison Antônio Taufer Fochi, Maurício Francisco Daltoé, Ênio Leandro Machado

Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul, 96815-900, Santa Cruz do Sul, Brasil.

*E-mail: lmescasa@mx2.unisc.br

Recebido em: 30/05/2022

Aceito em: 14/10/2022

RESUMO

A aplicação e avaliação de sistemas integrados de *Wetlands* construídos foi feita considerando os valores de pegada de carbono em CO₂eq e depleção das águas cinzas e azuis em m³. As análises consideradas foram de Carbono Orgânico Total - COT e Nitrogênio Total - NT, associando-se os valores de CO₂-C; CH₄-C e N₂O-N. O processo desta avaliação considerou o sistema integrado Reator Anaeróbico + *Wetland* Construído de Fluxo Livre Flutuante (WCFLF) + O₃, em unidade de bancada. A integração do sistema envolveu o uso das macrófitas *Hymenachne grumosa* e *Pistia stratiotes*, sendo este monitorado visando à adequação de potencial reúso das águas residuárias. Também foi aplicada a ozonização em reatores de unidade de bancada e piloto, no primeiro caso com difusor de ar a partir de bomba pneumática e com taxas de aplicação de 80 mg O₃ L⁻¹ efluente-h⁻¹, ambos em regime de batelada. Para os ensaios em unidade piloto, foi aplicada bomba centrífuga com sistema tipo Venturi para difusão de O₃, com tempo para recirculação de até 4 horas. Para o fluxo de referência de 400 L os valores de balanços de CO₂-C, CH₄-C e N₂O-N (mg m⁻² semana⁻¹) foram de 17622,1; 6263,4 e 47,3, respectivamente. Quanto à pegada hídrica, a redução em relação à carga poluente do efluente bruto foi de 64,4%, com efluente tratado considerando uma vazão de 135,60 m³ mês⁻¹. Portanto, o sistema integrado desenvolvido apresentou, sustentabilidade ambiental quanto aos parâmetros estudados.

Palavras-chave: *Wetlands* Construídos. Fluxo Livre Flutuante. *Hymenachne grumosa*. *Pistia stratiotes*. Ozonização.

INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional acelerado os impactos ambientais crescem na mesma medida, principalmente nas questões relacionadas à precariedade da infraestrutura de saneamento básico, que refletem diretamente na promoção da saúde e na qualidade de vida da população [1-4]. Em contrapartida, com o aumento populacional é inevitável que exista uma ampliação ao atendimento dos serviços de coleta e tratamento de esgotos domésticos no país.

De acordo com os dados coletados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), no ano de 2019, 54,1% dos brasileiros tinham acesso

à coleta de esgoto. Entretanto, aproximadamente 100 milhões de brasileiros não possuem acesso a este serviço. Analisando a coleta de esgotos no Brasil, a região Norte do país é a mais precária nesse quesito, onde apenas 12,3% da população possui acesso à coleta de esgotos, a região Nordeste atende cerca de 28,5% da população. Já a região Sudeste apresenta a maior parcela de coleta com aproximadamente 79,21%, a região Centro-Oeste com uma parcela de 57,7% e a região Sul com uma parcela de 46,3% [5].

Com relação aos esgotos tratados no país, os dados são mais preocupantes. Em 2019, apenas 49,1% dos esgotos do país eram tratados. A região Norte novamente apresentou os dados mais alarmantes com apenas 22% dos esgotos tratados. A região Nordeste

com 33,7%, a região Sudeste com 55,5%, a região Centro-Oeste com 56,8% e a região Sul com 47% dos esgotos tratados [6]. Em 2017 o país lançou aproximadamente 5.622 piscinas olímpicas de esgoto não tratado na natureza [5], conseqüentemente esses despejos sem os tratamentos adequados têm causado severos danos aos ecossistemas.

Diante da situação atual do saneamento básico, do déficit em investimentos no setor, em programas e ações do governo federal, através de uma avaliação político-institucional e da elaboração dos Cenários para a política de saneamento básico no país, foi sancionado em 2020 o Novo Marco do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020). A meta do marco, é garantir o atendimento de 99% da população com água potável e de 90%, com tratamento e coleta de esgoto, até 31 de dezembro de 2033.

No entanto, conforme mostra a revisão do PLANASAB [7], para alcançar a universalização em abastecimento de água e esgotamento sanitário, em 2033, são necessários R\$ 357,15 bilhões para as áreas urbana e rural, sendo R\$ 142,15 bilhões para o abastecimento de água e R\$ 215 bilhões para esgotamento sanitário, considerando recursos para implantação, ampliação e reposição.

Uma das alternativas para atingir esse marco em relação a coleta e tratamento de esgotos, seriam a implantação de sistemas descentralizados de esgotos. Os sistemas descentralizados de esgoto contribuem para a redução de custos de tratamento em longo prazo e favorecem o tratamento sustentável dos efluentes. Em relação aos custos com a rede de esgoto, os valores de um sistema descentralizado podem reduzir cerca de 60% do valor total, comparado ao tratamento centralizado do esgotamento sanitário [8].

Além dos aspectos de custos, o gerenciamento sustentável do uso das águas é um dos vários segmentos das tecnologias limpas para o constante desenvolvimento do gerenciamento ambiental das águas residuárias. Para este desenvolvimento os parâmetros associados com pegada ecológica [9], agregarão cada vez mais itens como pegada de CO₂eq, pegada hídrica e de energia [10].

Em um trabalho desenvolvido por Mander *et al.* [11] a partir da referência de banco de dados com 158 artigos, associando cálculos de CO₂eq com análises de carbono orgânico total e nitrogênio total, onde possibilitou valores de correlações significativas entre COT e CO₂-C; CH₄ - C e entre os valores de emissão de NT com N₂O - N para os três tipos principais de *Wetlands* construídos (WCs). Foram avaliados WCs de fluxo livre flutuante (WCFLF), bem como, de fluxos subsuperficial e vertical. Também foram estudadas as zonas

climáticas temperada, boreal, quente, mediterrânica e tropical, trazendo um maior potencial de aplicação para as expressões de cálculos das emissões de gases de efeito estufa em outros sistemas de *Wetlands* construídos com configurações semelhantes.

Estudar estes aspectos de pegada ecológica podem permitir ainda mais benefícios de atendimentos das resoluções que evoluem no critério de qualidade ambiental quanto ao tratamento de águas residuárias (Resolução 355/2017 do CONSEMA-RS e a CONAMA 357/2005, CONAMA 430/2011). Pode permitir também que o perfil de tecnologias limpas para o tratamento de efluentes esteja no foco de novas oportunidades de negócios: o reuso das águas, especialmente na região sudeste; os sistemas descentralizados de tratamento de esgotos, com menor investimento em redes de distribuição; reduzir as emissões de gases de efeito estufa; recuperar nutrientes e gerar empregos com inclusão social [12].

Em alguns casos pode haver necessidade de se corrigir também a concentração de outros parâmetros além de DQO, DBO₅, NTK e fósforo total, como íons inorgânicos, poluentes orgânicos prioritários e a cor, principalmente se a destinação final do processo for a reutilização deste efluente como água de reuso. Esgotos com grandes frações de água residuárias industriais podem requerer um tratamento especializado, dependendo dos constituintes particulares de sua composição, como metais pesados, pesticidas, compostos de enxofre, entre outros [13-14].

Em um estudo realizado por Sallanko e Okkonen (2009) [15], apresentaram experiências com efluentes pós *Wetland* construído de fluxo subsuperficial referenciado valores de DBO₇ de 9,6 mg L⁻¹, DQO de 17,0 mg L⁻¹, cor real de 62 mg Pt L⁻¹ e COT de 17,5 mg L⁻¹ e com o processo de ozonização, ocorreu a redução da concentração de COD da água de forma mais eficaz com menores quantidades de O₃. Na amostra de águas residuárias pós WC, a DQO foi reduzida em 4,0 mg L⁻¹ usando 2,7 mg L⁻¹ de ozônio durante 15 minutos.

Outros estudos de integração dos *Wetlands* construídos com ozonização para efluentes urbanos foram desenvolvidos por Horn *et al.* (2014) [16 - 17]. Nestes casos foram diferenciados os fatos de que o primeiro trabalho foi desenvolvido com ozonização catalítica em regime de batelada, aproximadamente 90 L m⁻² d⁻¹ e o segundo em fluxo contínuo, com a ozonização somente, com carga de 58 L m⁻² d⁻¹, tendo sistemas sequenciais de *Wetlands* Construídos de Fluxo Horizontal Subsuperficial (WCFHSS) e *Wetlands* Construídos de Fluxo Vertical (WCFV). Com outras configurações de WCs não são encontrados trabalhos na literatura, abrindo espaço para continuidade das pesquisas.

Assim sendo, com base nos aspectos

anteriormente citados, o objetivo do trabalho foi desenvolver estudos em unidade integrada com Reator Anaeróbio + *Wetland* Construído de Fluxo Livre Flutuante (WCFLF) + O₃ para a remediação de efluente da etapa preliminar da ETE do campus da UNISC em Santa Cruz do Sul. Foram verificadas as potencialidades deste sistema de atender a resolução CONSEMA 355/2017 [18] e a norma ABNT NBR 13969/1997 [19], bem como, aplicar os estudos de Mander *et al.* [11] e Morera *et al.* [20] para avaliar as pegadas de carbono e hídrica, visando a sustentabilidade para sistema de tratamento de efluentes descentralizado.

TECNICA

Operação e desempenho do sistema RA + WCFLF + O₃

A unidade Reator Anaeróbio + WCFLF + O₃ foi montada na ETE da UNISC-RS, conforme Figura 1. A ETE da instituição opera no tratamento das águas residuárias geradas no campus, excluindo os efluentes gerados nos laboratórios de ensino e restaurantes. Conforme a Coordenação Ambiental da Prefeitura do Campus da UNISC, a ETE opera com vazão média variando de 100 m³ dia⁻¹ a 110 m³ dia⁻¹. O efluente tratado é encaminhado para a rede coletora municipal, e desta, acaba sendo descartado indiretamente pelas galerias e canal pluvial municipal, no Arroio Lajeado. O Arroio Lajeado apresenta vazão média de 588,2 m³ dia⁻¹ [21]. O volume médio de efluente tratado é da ordem de 220 m³ dia⁻¹ com valores máximos de vazão de 10 m³ h⁻¹, especialmente no período noturno pós-aula [16]. A ETE está localizada em uma área mais afastada dos prédios de ensino e possui cota mais baixa em relação a estes, o que permite que o escoamento dos efluentes até a estação ocorra por gravidade (Figura 1). Em escala real, é constituída pelas seguintes etapas de tratamento: gradeamento, desarenador, tanque equalizador, Reator anaeróbio de fluxo ascendente de manta de lodo (UASB), biofiltro aerado, decantador e leito de secagem de lodo.

O WCFLF foi concebido com volume útil de 400 L e área superficial de 4,2 m². Já o reator anaeróbio tem 1600 L de volume útil, tendo sido carregado em batelada, a cada sete dias com velocidade ascensional de 1 m h⁻¹. O efluente oriundo do tanque equalizador da ETE da UNISC foi utilizado considerando tempo de detenção de no máximo 10 horas. Nos horários de carga o tempo de detenção foi entre 2 a 4 h. A coleta e preservação das amostras bem como os procedimentos de análise citados a seguir foram feitos em acordo com Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater-APHA/AWWA (2012) [22]. Foram

caracterizados os parâmetros Cor Absorciométrica (420 nm); Coliformes totais (aplicação das placas 3MTM Petrifilm™); Condutividade; COT (Carbono Orgânico Total); DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxigênio após cinco dias); Fósforo Solúvel; IC (Carbono Inorgânico); Nitrogênio Amoniacal; pH; STD (Sólidos Totais Dissolvidos); CT (Carbono Total); NT (Nitrogênio Total) e Turbidez.

Já os procedimentos de ozonização foram feitos em escala de bancada, sendo que na etapa de construção foi desenvolvido também a unidade de ozonização piloto (Figura 1). Apesar da montagem da unidade piloto a taxa de geração de ozônio não se mostrou efetiva para a realização dos testes de tratamento. Desta forma os dados apresentados são pertinentes a ozonização com difusor de ar (escala de bancada). As taxas de aplicação de O₃ foram acompanhadas com caracterização analítica aplicando método espectrofotométrico. O método de Flamm [23] foi utilizado no processo com o auxílio de kitassato de 250 mL com a solução de ácido bórico (H₃BO₃) 0,1 M e iodeto de potássio 5% m/v (sendo está aplicada na absorção de O₃ na passagem da corrente de ar no gerador de ozônio com a duração variando entre 10-20 s).

Além disso, foram realizados ensaios para determinação da vazão de ar aplicada no sistema pelo método do bolhometro. Três medições com pressão constante de bomba foram medidas. A determinação de ozônio (O₃) gerado foi avaliada a partir do reator utilizado, cuja capacidade geradora de O₃ foi acompanhada inicialmente em escala de bancada.

Pegada de Carbono e Pegada Hídrica dos Sistemas RA + WCs

A determinação da pegada de carbono foi aplicada para o desempenho do sistema RA + WCFLF + O₃ com ênfase somente na carga poluente dos efluentes, visando avaliar o efeito de desempenho para emissões de CO₂, CH₄ e N₂O, considerando os dados de expressões desenvolvidos por Mander *et al.* [11]. Foi considerada a unidade funcional como o volume de efluente tratado e o fluxo de referência de 200 L.

Já a avaliação da Pegada Hídrica foi feita a partir dos estudos de Morera *et al.* [20]. Para esta situação, os valores para Pegada das Águas Azuis (WFB_{Blue}) foram referenciados com estimativas de gasto de energia da operação dos sistemas e de evaporação e evapotranspiração nos WCs, considerando os dados de Horn [16]. Para a Pegada das Águas Cinzas (WFG_{Grey}), os dados da CONAMA 357 de 2005 [24], bem como da CONSEMA 355 de 2017 [18] foram referenciados para aplicação na expressão:

$$WFG_{Grey} = Q_e \frac{(C_e - C_{max})}{(C_{max} - C_{nat})}$$

Onde a vazão por semana foi considerada a unidade da

pegada:

Q_e = vazão de efluente;

C_e = concentração de entrada para DQO, NT e fósforo solúvel (este substituindo fósforo total);

C_{max} = concentração máxima permitida para descarte de acordo com a CONSEMA 355/2017;

C_{nat} = concentrações das especificações do corpo d'água receptor como classe 3 em acordo com a CONAMA 357/2005.

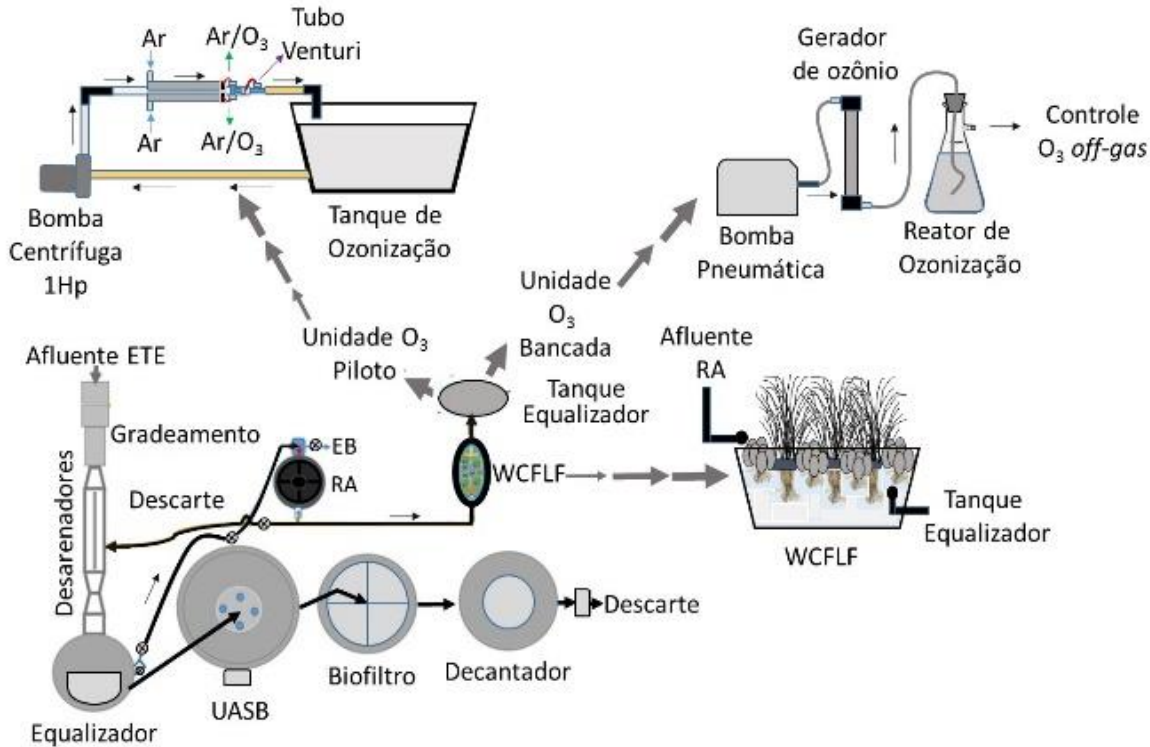


Figura 1 – Unidade de estudos do sistema RA + WCFLF + O₃ com Ozonizador em Escala de Bancada. EB – Efluente Bruto; RA – Reator Anaeróbio; WCFLF – Wetland Construído de Fluxo Livre Flutuante.

RESULTADOS REPRESENTATIVOS

Desempenho geral do sistema com Ozonizador em Unidade de Bancada

O desempenho do sistema integrado Reator Anaeróbio + WCFLF + O₃ pode ser observado na Tabela 1.

O sistema integrado Reator Anaeróbio + WCFLF + O₃ apresentou um bom desempenho, com uma redução significativa nos principais parâmetros avaliados. Principalmente na DBO₅, onde ocorreu a redução de 142,35 mg L⁻¹ para 66,6 mg L⁻¹, no COT, com redução de 59,5 mg L⁻¹ para 30,1 mg L⁻¹, Fósforo total, com redução de 0,9 mg L⁻¹ para 0,74 mg L⁻¹ e Nitrogênio total, com redução de 84,3 mg L⁻¹ para 51,87 mg L⁻¹ e Coliformes totais/ *Escherichia coli* (UFC/100mL) com redução de >10⁶/ >10⁶ para 36000/ <18. Destaca-se também a redução na Cor Absorciométrica ($\lambda = 420$ nm), onde

passou de 0,767 nm para 0,07 nm.

Considerando os resultados dos parâmetros avaliados, o enquadramento do efluente tratado de acordo com a CONSEMA 357/2005 é de Classe IV. Uma vez que esse enquadramento pode ser considerado devido aos limites atingidos pelo parâmetro de Coliformes totais/ *Escherichia coli*. Pode-se observar também que ao considerar apenas o parâmetro Cor Absorciométrica, o enquadramento do efluente seria na Classe I.

Pegada de Carbono e Pegada Hídrica com RA + WCFLF + O₃ em Unidade de Bancada

Para os resultados de controle dos gases de efeito estufa foram considerados o período semanal dos ensaios nas expressões desenvolvidas por Mander, et al. [11]. Os dados podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 1 – Dados de caracterização dos efluentes tratados com o processo Reator Anaeróbio + WCFLF + O₃ a partir do tanque equalizador da ETE UNISC - Unidade de Santa Cruz do Sul.

Parâmetros	Efluente Bruto	Efluentes Tratado com Sistema Reator Anaeróbio + WCFLF + O ₃	Limites CONSEMA/RS 355/2017 (200 ≤ Q < 500)	CONAMA 357/2005 Limites para Classe 1*
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	142,35	66,6	100	3
COT (mg L ⁻¹)	59,5	30,1	-	-
IC (mg L ⁻¹)	91,1	70,2	-	-
CT (mg L ⁻¹)	150,6	92,4	-	-
Fósforo Total Solúvel/Coloidal (mg L ⁻¹)	0,9	0,74	4	3,7 mg/L N-NH ₃ com pH entre 7,5 e 8,0
STD (mg L ⁻¹)	596	372	-	-
N-NH ₃ (mg L ⁻¹)	53,6	27,2	20	0,1 (ambiente lótico e tributários de ambientes intermediários)***
N- Total (mg L ⁻¹)	84,3	51,87	-	6 a 9
pH	7,4	8,8	Entre 6-9	-
Turbidez (UT)	97,7	9,4	-	100
Coliformes totais/ <i>Escherichia coli</i> (UFC/100mL)	>10 ⁶ / ^{>} 10 ⁶	36000/ <18	10 ⁶	2500
Condutividade (µScm ⁻¹)	1081	974	-	Virtualmente ausentes
Cor Absorciométrica (λ = 420 nm)	0,767	0,07	Não deve conferir mudança de coloração (cor verdadeira) ao corpo hídrico receptor	CONAMA 357/2005 Limites para Classe 1

*Resultados também associados com ABNT 13969 de 1997.

Tabela 2 – Principais indicadores de efeito estufa nos Ensaios com o Sistema UASB WCFLF + O₃ com referência nos estudos de Mander, et al. (2014) [11].

Balanco CO₂-C (mg m⁻² semana⁻¹)	
Y = 5,4 + (5869/x) R² = 0,62	
Saída WCFLF + O ₃	17622,1
Redução %	70
Balanco CH₄-C (mg m⁻² semana⁻¹)	
Y = 0,11x+1,00 R² = 0,62	
Saída WCFLF + O ₃	6263,44
Redução %	70
Balanco N₂O-N (mg m⁻² semana⁻¹)	
Y = 0,001X+0,011 R² = 0,56	
Saída WCFLF + O ₃	47,34
Redução %	70

Observa-se que o balanço de CO₂-C apresentou uma saída semanal de 17.622,1 mg m³.

Enquanto o balanço CH₄-C semanal apresentou uma saída semanal de 6.263,44 mg m³ e o balanço de saída semanal de N₂O-N foi de 47,34 mg m³. Onde apresentaram uma redução de emissões de gases de efeito estufa de até 70%. Demonstrando assim uma significativa redução nos gases de efeito estufa.

O cálculo da Pegada Hídrica considerou valores de concentrações naturais em acordo com o relatório de Consolidação do Conhecimento sobre os Recursos Hídricos da Bacia do Rio Pardo e Elaboração do Programa de Ações da Sub-Bacia do Rio Pardino, publicado em 2004 através do DRH/SEMA [25]. Neste caso os valores médios de DBO₅ máximo de 1,64 mg L⁻¹ O₂, N-NH₃ de 0,27 mg L⁻¹ e P total de 0,049 mg L⁻¹ foram calculados (Tabela 3).

A pegada hídrica total de águas cinzas do efluente bruto foi de 135,60 m³ mês⁻¹ onde seriam necessários 135,60 m³ mês⁻¹ de corpo hídrico para neutralizar a carga poluente. No entanto, após o tratamento realizado pelo sistema integrado estudado a pegada hídrica passou 69,95 m³ mês⁻¹ necessitando assim de 69,95 m³ mês⁻¹ de corpo hídrico para neutralizar a carga poluente. Esses dados demonstram a eficiência do tratamento com um sistema integrado,

onde a redução da pegada foi de 64,4%.

Tabela 3 – Pegada Hídrica para o sistema de tratamento RA + WCFV + O₃

Efluente Bruto			
Parâmetros	DBO₅	N-NH₃	Psolúvel
	g m ⁻³	g m ⁻³	g m ⁻³
Carga poluente	142,35	53,6	0,9
WF Gray* m ³ mês ⁻¹	103,48	14,84	17,27
Total WF Gray* = 135,60 m³ mês⁻¹			
WF Blue** = 0			
Total WF = 135,60 m³ mês⁻¹			
Efluente Tratado - RA + WCFLF + O₃			
	DBO ₅	N-NH ₃	Psolúvel
	g m ⁻³	g m ⁻³	g m ⁻³
Total WF Gray* m ³ mês ⁻¹ →	48,25	7,50	14,20
WF Blue** = 0,8 m³ mês⁻¹ (Energia) + 0,24 m³ mês⁻¹ (Evapotranspiração) = 1,04 m³ mês⁻¹			
WF - RA + WCFLF + O₃ = 69,95 m³ mês⁻¹			

*Dados considerando cálculos de WF_{Gray} e WF_{Blue} a partir de Morera et al. [20].

DISCUSSÃO

O desempenho geral do sistema com o ozonizador, quando avaliado a resolução CONSEMA 355/2017, bem como, a norma ABNT 13969/97 [19] indicam necessidades e potencialidades do sistema de tratamento proposto. As necessidades estabelecem o controle dos fatores de carga para os sistemas Reator Anaeróbio e o WCFLF. Outro aspecto será temporizar cargas de efluentes para o sistema Reator Anaeróbio + WCFLF. O sistema em batelada perde com o comparativo real de uma residência (ou conjunto de famílias) em vazões de até 2 m³ d⁻¹ de efluentes gerados em conjuntos de propriedades que representassem unidades de sistemas descentralizados. Isto proporcionará maior aproximação dos compromissos com a 355/2017 do CONSEMA [18].

Quanto ao reuso, os compromissos com a ABNT 13969/97 [19] indicam ainda a melhor

condição do efluente tratado para a Classe IV, apesar dos valores apresentados estarem mais aceitáveis no parâmetro *Escherichia coli* (como referencial microbiológico apenas – não oficialmente aceito com a norma) para a Classe III. O controle operacional do sistema descentralizado torna variável a frequência de controle com exigência máxima, uma vez que a Classe II permite o contato direto com usuários e a Classe III deve ter no mínimo um controle diário de microrganismos, agregando se possível, os indicadores operacionais, como cor aparente e turbidez.

Assim, o reuso recomendado seria para a Classe IV em cultivos principalmente de pomares, cereais, forragens, pastagens para gados, e outros cultivos, sendo através de do escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual. Coliforme fecal inferior a 5 000 NMP/100 mL e oxigênio dissolvido acima de 2,0 mg/L são as exigências. As aplicações devem ser interrompidas pelo menos 10 dias antes da colheita. Valores de oxigênio dissolvido foram acima de 4,0 mg L⁻¹ após ozonização do efluente do WCFLF.

Quanto ao balanço de pegada de carbono, parâmetros como temperatura da água / solo / ar, umidade no solo ou no material do filtro, carga poluente, presença de plantas aerênquimas, regime hidrológico pulsante (carregamento intermitente) e lençol freático mais profundo são extremamente influentes sobre o efeito estufa nos WCs.

A redução para a pegada hídrica foi significativa, porém deve ser destacado que o uso de ozônio não foi efetivo para redução de parâmetros de carga eutrofizante e de depleção de oxigênio, mas sim, para cor.

Conclui-se que o desenvolvimento do estudo em unidade integrada com Reator Anaeróbio + *Wetland* Construído de Fluxo Livre Flutuante (WCFLF) + O₃ para a remediação de efluente da etapa preliminar da ETE do campus da UNISC em Santa Cruz do Sul é possível de ser aplicada. Entretanto é necessária a adequação dos fatores de carga para o reator UASB, bem como seu regime de operação com frequente descarte de lodo (UASB como sistema positivo no solo, assim como com dispositivo de drenagem de lodo a cada três meses). O lodo pode ser destinado para composteira, desde que previamente tratado com cal.

A proporção de CO₂-C, CH₄-C e N₂O-N foi verificada como representativa nas cargas em batelada do sistema WCFLF operado e concebido neste trabalho. Destaca-se que a carga poluente, a presença de plantas aerênquimas e o regime hidrológico pulsante (carregamento intermitente) devem ser variados para verificar eficiência dos itens anteriormente citados neste trabalho.

A Pegada Hídrica teve redução da carga poluente em relação ao efluente bruto com redução da WF de 64,4%, no entanto, o uso do ozônio não muito

efetivo para a redução da carga eutrofizante. Com isso, estudos de Análise de Ciclo de Vida são fundamentais para avaliar de forma completa os benefícios ambientais do sistema.

CARBON FOOTPRINT AND WATER FOOTPRINT IN AN INTEGRATED SYSTEM WITH ANAEROBIC REACTOR + FREE-FLOW CONSTRUCTED WETLAND WITH FLOATING SUPPORT + O₃ IN URBAN WASTEWATER TREATMENT

ABSTRACT: The application and evaluation of integrated Constructed Wetlands systems was conducted considering the values of CO₂eq and depletion of gray and blue waters in m³. The considered analyzes were Total Organic Carbon - TOC and Total Nitrogen - TN, associating the values of CO₂-C; CH₄-C and N₂O-N. The process of this evaluation considered the integrated system composed of Anaerobic Reactor + Floating Free Flow Constructed Wetland (FLFCW) + O₃, in a bench unit. The integration of the system involved the use of two macrophyte species, *Hymenachne grumosa* and *Pistia stratiotes*, while the wastewater was monitored aiming at the adequacy of the standards regarding the reuse of wastewater. Ozonation was also applied in bench and pilot-scale reactors, in the first case with air diffuser from a pneumatic pump and with application rate of 80 mg O₃ L⁻¹ effluent⁻¹ h⁻¹, both in batch regime. For the tests in the pilot unit, a centrifugal pump with a Venturi-type system was applied for the O₃ diffusion, with a recirculation time of up to 4 hours. Based on a reference flow of 400 L, the balance values of CO₂-C, CH₄-C and N₂O-N (mg m⁻² week⁻¹) were 17622.1; 6263.4 and 47.3, respectively. Concerning the water footprint, the reduction in relation to the polluting load of the raw effluent was 64.4%, considering a treated effluent flow of 135.60 m³ month⁻¹. Therefore, the developed integrated system presented a promising environmental sustainability regarding the parameters studied.

Keywords: Constructed Wetlands. Floating Free Flow. *Hymenachne grumosa*. *Pistia stratiotes*. Ozonation.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos apoios de bolsa e financeiro a CAPES, FAPERGS e CNPq, com os projetos CNPQ 307257/2015-0 e Edital 02/2017-PqG.

REFERÊNCIAS

- [1] FILHO, D. R. S. et al. Análise dos indicadores de saneamento básico e seus impactos sobre a saúde pública e coletiva em Aparecida de Goiânia, Goiás. *Brazilian Journal of Health Review*, vol. 5, n. 2, p. 5407-5427. DOI:10.34119/bjhrv5n2-121, 2022.
- [2] TEIXEIRA, J. C.; GOMES, M. H. R.; SOUZA, J. A. Associação entre cobertura por serviços de saneamento e indicadores epidemiológicos nos países da América Latina: estudo com dados secundários. *Revista Panamericana de Salud Pública*, vol. 32, p. 419-425, 2012.
- [3] SILVA, S. A. et al. Saneamento básico e saúde pública na bacia hidrográfica do Riacho Reginaldo em Maceió, Alagoas. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, vol. 22, n. 4, p. 699-709. ISSN 1809-4457. DOI: 10.1590/S1413-41522017146971, 2017.
- [4] FERREIRA, Y. B. C. Proposição de um índice de vulnerabilidade humana à insuficiência de saneamento básico em municípios de pequeno porte: a experiência do estado da Paraíba. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande*. Campina Grande, PB, 2020.
- [5] TRATA BRASIL. 2021. Esgoto. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas/no-brasil/esgoto>.
- [6] BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019. Brasília: SNS/MDR, 2020. 183 p.: il.
- [7] PLANSAB, Plano Nacional de Saneamento Básico. 2019. Disponível em <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSDRU/ArquivosPDF/Versao_Consehos_Resolu%C3%A7%C3%A3o_Alta_-_Capa_Atualizada.pdf> acesso em 12 de maio de 2021.
- [8] SUBTIL, E.; SANCHEZ, A.; CAVALHERO, A. (2016). Sistemas descentralizados de tratamento de esgoto e reuso de água. In book: *Ciência e Tecnologia Ambiental: Conceitos e Perspectivas* (pp. 201 - 220). Chapter: 9. Publisher: Editora UFABC.
- [9] CHEN, H-S. Establishment and Applied Research on *Wetland Ecosystem Evaluation Model* in Taiwan Sustainability, vol. 7, 15785–15793; doi:10.3390/su71215785, 2015.
- [10] PENRU, Y.; ANTONIUCCI, D.; AMORES BARRERO, M. J.; CHEVAUCHÉ, C. Water footprint calculation: application to urban water cycle. *Int J Interact Des Manuf*, v. 10, p. 213–216 DOI 10.1007/s12008-016-0327-2, 2016.
- [11] MANDER Ü.; DOTRO, G.; EBIE, Y.; TOWPRAYOON, S.; CHIEMCHAISRI, C.; NOGUEIRA, S.F.; JAMSRANJAV, B.; KASAK, K.; TRUU, J.; TOURNEBIZE, J.; MITSCH, W. J. Greenhouse gas emission in constructed wetlands for wastewater treatment: A review <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.006>, 2013.
- [12] SALIBA, P. D.; von SPERLING, M.; Performance evaluation of a large sewage treatment plant in Brazil, consisting of a UASB reactor followed by activated sludge. *Water Science & Technology*, 2017.
- [13] TRIPATHI, S.; TRIPATHI, D. M.; TRIPATHI, B. D. Removal of Organic Content and Color from Secondary Treated Wastewater in

Reference with Toxic Potential of Ozone During Ozonation. *Hydrology Current Research*, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7587.1000111>.

[14] SHARIF, F. Use of Ozonation and Constructed Wetlands to Remove Contaminants of Emerging Concern from Wastewater Effluent. A Dissertation Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy, August, 228 p., 2013.

[15] SALLANKO, J.; OKKONEN, J. Effect of ozonation on treated municipal wastewater. *Journal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering*, vol. 44, p. 57-61. 10.1080/10934520802515350, 2009.

[16] HORN, T. B.; ZERWES, F. V.; KIST, L. T.; MACHADO, Ê. L. Constructed wetland and photocatalytic ozonation for university sewage treatment. *Ecological Engineering*, vol. 63, p. 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.012>, 2014.

[17] MIRANDA, N. D.; OLIVEIRA, E. L.; SILVA, G. H. R. Study of constructed wetlands effluent disinfected with ozone. *Water Science And Technology*. London: Iwa Publishing, vol. 70, n. 1, p. 108-113, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/117456>>.

[18] CONSEMA. CONSELHO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE - Resolução n. 355/2017. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201707/19110149-355-2017-criterios-e-padres-de-emissao-de-efluentes-liquidos.pdf>.

[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13969: projeto, construção e operação de unidades de tratamento complementares e disposição final dos efluentes de tanques sépticos: procedimentos. Rio de Janeiro, 1997.

[20] MORERA; L, et al. Water footprint assessment in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, p. 4741 e 4748, 2016.

[21] DUPONT, A. Avaliação da eficiência da Estação de Tratamento de Esgoto da Universidade de Santa Cruz do Sul, RS, Brasil. 2010. 159 f. Dissertação (Programa de PósGraduação em Tecnologia Ambiental) - Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2010.

[22] APHA/AWWA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22. ed. Washington: APHA/AWWA/WEF, 2012.

[23] FLAMM, D. L. Analysis of ozone at low concentrations with boric acid buffered potassium iodide. *Environ. Sci. Technol.*, vol. 11, p. 978-983, 1977.

[24] CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO Nº 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

[25] DRH/SEMA. Departamento de Recursos Hídricos/Secretaria Estadual de Meio Ambiente. Consolidação do Conhecimento sobre os Recursos Hídricos da Bacia do Rio Pardo e Elaboração do Programa de Ações da Sub-Bacia do Rio Pardinho, 2004.