

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DOMÉSTICO POR COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO, SEDIMENTAÇÃO, FILTRAÇÃO E DESINFECÇÃO, VISANDO O REUSO

POST-TREATMENT OF DOMESTIC WASTEWATER BY COAGULATION, FLOCCULATION, SEDIMENTATION, FILTRATION AND DISINFECTION, AIMING REUSE

* Ana Cé¹

Daniel Bartiko²

Carlos Magno de Souza Vidal³

Jeanette Beber de Souza³

Mirelly Manica³

Recibido el 2 de febrero 2018; Aceptado el 16 de octubre de 2018

Abstract

The high demand of water resources has been considered one of the responsible for the water shortage. In this context, technologies of domestic wastewater treatment have been increasingly explored in order to improve the effluent quality. This improvement is needed for the wastewater discharge into water bodies or for wastewater reuse (non-potable use). Among the used treatments, the processes of coagulation, flocculation, sedimentation, filtration and disinfection have gained special attention. The present study evaluated the performance of coagulation, flocculation and sedimentation processes and from the results, it was made the coagulation diagrams and it was also found three conditions. These conditions showed as following values of remaining turbidity (2.4, 1.05 and 0.98 uT), without the high coagulant dosage and acidifier (50 to 60 mg.L⁻¹ of FeCl₃.6H₂O and 0 to 25 mg.L⁻¹ of HCl (0.5 mol.L⁻¹), respectively). In addition, a sedimentation rate was 1.5 cm.min⁻¹ with a relatively low hydraulic retention time. Once the three conditions had been found was simulated the conditions for coagulation/flocculation and sedimentation again. It was also simulated the subsequent steps, which was filtration and disinfection. In the last experiment was found parameter values that meet in NBR 13.969/97 and USEPA (2012) guidelines for different types of reuse (urban, industrial, agriculture, etc.).

Keywords: coagulation diagrams, ferric chloride, reuse water, tertiary treatment, wastewater.

¹ Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil.

² Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

³ Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil.

*Autor correspondente: Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Linha Santa Bárbara s/n, Francisco Beltrão, Paraná. Caixa Postal 135. 85601-971. Brasil. Email: anaceamb@gmail.com

Resumo

A elevada demanda por recursos hídricos tem sido uma das responsáveis pela escassez da água. Nesse contexto, estão sendo cada vez mais exploradas tecnologias de tratamento de efluentes domésticos visando melhorar a qualidade dos mesmos para disposição em corpos d'água ou para reuso da água (para usos menos nobres, que não demandem água potável). Entre os tratamentos utilizados, destacam-se os processos de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. A presente pesquisa avaliou o desempenho das etapas de coagulação, floculação e sedimentação, e a partir dos resultados obtidos foram construídos os diagramas de coagulação e obtidas três condições que apresentaram valores de turbidez remanescente (2.4; 1.05 e 0.98 uT) sem o uso elevado de coagulante e acidificante (50 a 60 mg.L⁻¹ de FeCl₃.6H₂O e 0 a 25 mg.L⁻¹ de HCl (0.5 mol.L⁻¹), respectivamente), além de uma velocidade de sedimentação (1.5 cm.min⁻¹) com um tempo de detenção hidráulica relativamente baixo. Depois de determinadas às três condições, foram simuladas novamente as operações de coagulação, floculação e sedimentação e também as etapas subsequentes (filtração e desinfecção), nas quais foram obtidos valores de parâmetros que atenderam a norma NBR 13.969/97 e as diretrizes da USEPA (2012) para diferentes tipos de reuso (urbano, industrial, na agricultura, etc.).

Palavras chave: água de reúso, cloreto férrico, diagramas de coagulação, efluente doméstico, tratamento terciário.

Introdução

A crescente demanda por recursos hídricos, associada à falta de gestão adequada dos mesmos tem levado a sua escassez, principalmente quando observados aspectos qualitativos. Neste contexto, estão sendo cada vez mais exploradas tecnologias avançadas de tratamento de efluentes que possibilitem a adequação de sua qualidade antes da disposição em corpos receptores (Salgot e Folch, 2018).

O tratamento dos efluentes, quando feito com o auxílio de técnicas avançadas, permite obter água com qualidade capaz de atender usos menos nobres (aqueles que não demandam água potável), ação denominada reuso e que vem ganhando crescente destaque na gestão dos recursos hídricos, mostrando-se como uma eficiente ferramenta na racionalização do uso da água (Rizzo *et al.*, 2018), apresentando-se como uma solução a longo prazo para as crescentes demandas municipais, industriais e agrícolas deste recurso (Lyu *et al.*, 2015).

No entanto, o Brasil ainda não tem normatização específica para o reuso da água em âmbito federal, assim são adotadas orientações técnicas elaboradas por instituições particulares ou padrões referenciais internacionais (Crea, 2010). É o caso de diretrizes da USEPA (2012) - *United States Environmental Protection Agency* - que estabelecem orientações, aplicações, parâmetros da qualidade da água de acordo com a finalidade proposta para a água de reuso.

No Brasil, existem leis em nível municipal e estadual que tratam sobre o tema, como por exemplo, a Lei nº 16.174 de 22 de abril de 2015, do município de São Paulo, que estabelece “regramento e medidas para fomento ao reuso de água para aplicações não potáveis, oriundas do polimento do

efluente final do tratamento de esgoto, de recuperação de água de chuva, da drenagem de recintos subterrâneos e de rebaixamento de lençol freático.”

Ademais, a Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) dispõe “modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água em todo o território nacional.” (Art.1º).

Existe ainda norma (NBR 13.969/97) definida pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), a qual fornece classificação, aplicações e padrões de qualidade para o reuso de águas.

As tecnologias de tratamento usualmente adotadas (as quais geralmente empregam processos físicos seguidos de mecanismos biológicos para a remoção de sólidos e material orgânico biodegradável contido no efluente) mostram-se ineficientes na obtenção de efluente que não cause impactos quando lançado em um corpo hídrico ou que possa ser reutilizado para usos menos nobres.

Assim, o tratamento terciário de efluentes domésticos por coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção, mostram-se como uma alternativa para obter um efluente com características adequadas para reuso em atividades que demandam qualidade menos restritiva. É o caso dos trabalhos de Üstün *et al.*, (2011) e Tonetti *et al.*, (2012) no tratamento terciário de esgoto sanitário para produção de água de reuso.

Na coagulação ocorre a desestabilização de partículas em suspensão na água, as quais se chocam e formam flocos em etapa posterior, denominada floculação (Sánchez-Martín *et al.*, 2010). A maior parte dos flocos é removida no decantador pela ação gravitacional (uma vez que os mesmos apresentam peso específico maior que da água). Do decantador, o efluente sai bastante clarificado e é encaminhado à filtração, etapa que tem como finalidade reter as partículas (que não foram removidas no decantador) através da passagem da água por uma camada filtrante, constituída basicamente por areia e/ou outros elementos porosos (Angreni, 2009). A etapa de desinfecção, no final do processo, tem por finalidade destruir ou inativar organismos patogênicos, de modo a evitar problemas adversos à saúde caso haja contato indevido ou acidental com o efluente (USEPA, 2012).

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho dos processos de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção no pós-tratamento de efluente doméstico, proveniente de filtro biológico ascendente antecedido por Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado (RALF), verificando a possibilidade de reuso do efluente tratado para fins menos nobres, por meio do atendimento aos Padrões de Lançamento da Resolução Conama nº 430 de 2011, aos padrões de qualidade para água de reuso estabelecidos pela NBR 13.969/1997 e às diretrizes para reuso da água da USEPA (2012).

Material e Métodos

Os ensaios da presente pesquisa foram executados em duas etapas. Na primeira, realizaram-se ensaios de coagulação/floculação e sedimentação, a partir dos quais foram obtidos dados para a elaboração de diagramas de coagulação, os quais serviram de base para avaliar a eficiência desses ensaios (levando-se em conta a turbidez residual das amostras) sob diferentes condições operacionais (dosagem de coagulante, pH de coagulação e velocidade de sedimentação). Para a elaboração dos diagramas de coagulação foram utilizados os *softwares* Origin 8 e o CorelDraw 2016 (ambos com a versão Trial). A partir das melhores condições operacionais obtidas para a coagulação, floculação e sedimentação foram realizados novos ensaios, nos quais foram também simuladas as operações de filtração e desinfecção.

O efluente empregado nos ensaios da presente pesquisa foi coletado na ETE Riozinho (localizada em Irati-PR) e operada pela Companhia de Saneamento do Estado do Paraná (Sanepar). O tratamento do efluente doméstico nesta ETE é realizado com o auxílio de um reator anaeróbio de leito fluidizado seguido de filtro biológico ascendente, na saída do qual foi coletado o efluente utilizado.

O coagulante utilizado nos ensaios de tratabilidade foi o cloreto férrico hexahidratado P.A ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). A concentração da solução padrão preparada para a dosagem do coagulante nos ensaios foi de $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

Caracterização do efluente bruto e tratado

Tabela 1. Parâmetros e respectivos métodos/equipamentos empregados (as).

Parâmetro	Métodos/Equipamento
Turbidez	Turbidimétrico ou Nefelométrico (2130) – (Hach 2100 Q)
pH	Potenciométrico (4500-H ⁺) – (Hanna Calibration Check, pH/ORP meter)
Condutividade e Temperatura	Condutimétrico (2510 e 2550)- (HMCDB-150)
Cor aparente	Espectrofotométrico (2120) - (HACH DR 6000)
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	Espectrofotométrico (5220 A) - (HACH DR 6000)
Fósforo total	Espectrofotométrico (4500-P) - (HACH DR 6000)
Nitrato	Espectrofotométrico (4500-NO ₃ -B) - (HACH DR 6000)
Oxigênio Dissolvido (OD)	Oximétrico - (Thermo Scientific/Orion 3Star)
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	Oximétrico - (Thermo Scientific/Orion 3Star) (5210 B)
Alcalinidade total	Titulométrico (2320)
Dureza total	Titulométrico (2340)
Sólidos Suspensos Totais (SST)	Gravimétrico (2540 D)
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	Gravimétrico (2540 C)
<i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i> – UFC.100 mL ⁻¹)	Filtração em membranas (9222) (empregando o meio de cultura seletivo) - (Chromocult Coliform Agar)
Coliformes Totais (CT – UFC.100 mL ⁻¹)	Filtração em membranas (9222) (empregando o meio de cultura seletivo) - (Chromocult Coliform Agar)

As análises físico-químicas e microbiológicas do efluente bruto e tratado foram feitas no Laboratório de Saneamento Ambiental e Qualidade da Água, do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Centro-Oeste (Unicentro). A metodologia adotada foi a descrita no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Apha et al., 2012).

Os parâmetros analisados na presente pesquisa, e respectivos métodos/equipamentos empregados são apresentados na Tabela 1.

Ensaio de coagulação, floculação e sedimentação

Primeiramente, foram realizados ensaios para otimizar as etapas de coagulação, floculação e sedimentação. Nestes, foi variada a dosagem de coagulante (de 5 a 100 mg.L⁻¹, na qual foram dosados 5 mg.L⁻¹ no primeiro ensaio, e os demais variavam-se em intervalos de 10 mg.L⁻¹), o pH de coagulação (valores de 3 a 9, obtidos com a adição de ácido clorídrico 0.5 mol.L⁻¹ ou hidróxido de sódio 0.1 mol.L⁻¹) e a velocidade de sedimentação (3.0; 1.5 e 0.5 cm.min⁻¹, que correspondem as taxas de aplicação superficial de 43.2; 21.6 e 7.2 m³.m⁻² dia⁻¹, respectivamente). A eficiência do tratamento foi avaliada em termos de turbidez remanescente da amostra decantada.

O equipamento empregado para simular a coagulação, floculação e sedimentação foi o *Jartest* (PoliControl - Modelo FlocControl III), na qual foram estabelecidas as seguintes condições para a mistura rápida e floculação: gradiente de velocidade médio de mistura rápida (G_{mr}) de 600 s⁻¹ e tempo de mistura rápida (T_{mr}) de 10 s; gradiente de velocidade médio de floculação (G_{fl}) de 40 s⁻¹ e tempo de floculação (T_{fl}) de 15 min.

Para os ensaios, preencheu-se os jarros com 2 L do efluente em estudo, adicionou-se base ou ácido e logo após o coagulante à solução, iniciou-se o processo de coagulação e em seguida foram coletadas as amostras para a determinação do pH de coagulação. Posteriormente, o efluente foi submetido à floculação. Após isso, a água floculada foi mantida em repouso para a sedimentação dos flocos, depois da qual as amostras para a avaliação da turbidez foram coletadas em tempos previamente estabelecidos, em função das velocidades de sedimentação empregadas.

Ensaio de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção

Nesta etapa, a partir das condições simuladas anteriormente que acarretaram melhores eficiências de remoção de turbidez, foram realizados novos ensaios, nos quais além de serem simuladas as etapas de coagulação, floculação e sedimentação, também foram reproduzidas as etapas de filtração e desinfecção.

Foram selecionadas três condições que proporcionaram resultados satisfatórios de remoção de turbidez com uso mínimo ou nulo de ácido ou base (0 a 25 mg.L⁻¹), além de menores dosagens de coagulante (50 a 60 mg.L⁻¹). A velocidade de sedimentação adotada foi de 1.5 cm.min⁻¹.

Os gradientes de velocidades de mistura rápida e floculação e os respectivos tempos adotados foram os mesmos descritos anteriormente no item 3.4. A metodologia completa para a execução dos ensaios em *Jartest* é descrita por Di Bernardo *et al.*, (2011).

A etapa de filtração foi realizada em bancada com o auxílio de equipamento *Jartest*, no qual foi acoplado filtros fabricados de acrílico transparente, com diâmetro interno de 19 mm, preenchidos com grãos de areia com diâmetros de 1.00 a 1.41 mm para o menor e maior grão, respectivamente. A vazão de filtração variou de 12 a 20 mL.min⁻¹ (que corresponde às taxas de aplicação de 60 a 100 m³.m⁻² dia⁻¹), já o tempo médio para a coleta do efluente filtrado foi de 20 min, com início de coleta efetuado com 10 min e terminado com 31 min, conforme metodologia proposta por Centurione Filho e Di Bernardo (2002).

Desinfecção com cloro

Os ensaios de desinfecção foram realizados para as amostras coletadas ao final da filtração. O procedimento foi realizado em bancada, com o auxílio de três béqueres de vidro de volume 100 mL, posicionados sobre agitadores magnéticos. A solução padrão de cloro foi obtida por solução de hipoclorito de sódio (5.7 % de Cl₂). As dosagens de cloro aplicadas foram de 1, 2 e 3 mgCl₂.L⁻¹ em um tempo de contato de 20 minutos. Após isso, adicionou-se 0.04 mL de tiosulfato de sódio (3%) para cada 40 mL de amostra para inativação do cloro (de modo que a reação do efluente com o cloro fosse interrompida e não ocorresse interferência nas análises microbiológicas), depois uma alíquota de 20 mL foi recolhida para análise microbiológica nas diferentes dosagens e condições empregadas. A metodologia utilizada nesta etapa seguiu o procedimento de Souza e Daniel (2005). Posteriormente, realizou-se análise em duplicata de *Escherichia coli* e coliformes totais para o efluente tratado.

Resultados e discussão

Diagramas de Coagulação

Na figura 1 é apresentado o diagrama de coagulação para a velocidade de 3.0 cm.min⁻¹, na qual os melhores resultados de turbidez remanescente foram obtidos com dosagens de FeCl₃.6H₂O de 70 a 100 mg.L⁻¹ (e pH de coagulação entre 5.2 e 6.6) para a qual foram alcançados valores de turbidez abaixo de 2 uT (1.55 a 1.95 uT). Valor que segundo a USEPA (2012), torna a água apta para reuso, levando-se em consideração apenas a turbidez.

A figura 2 corresponde ao diagrama de coagulação para a velocidade de sedimentação de 1.5 cm.min⁻¹, sendo que os melhores resultados foram encontrados para dosagens de coagulante entre 80 e 100 mg.L⁻¹ e pH de coagulação de 5.7 a 6.6, para os quais foram obtidos valores de turbidez abaixo de 2 uT (0.78 a 0.94 uT). Porém, foram alcançados valores de turbidez satisfatórios (abaixo de 5 uT), utilizando menores dosagens de coagulante, os quais atendem ao recomendado para água de reuso classe 1 e 2 (levando-se em conta apenas a turbidez), de acordo

com a NBR 13.969/97 (apresentados na Tabela 1). Neste caso, não justifica-se obter turbidez remanescente de 0.78 uT (dosando 90 mg.L⁻¹ de FeCl₃.6H₂O, por exemplo), sendo que quando dosado 50 mg.L⁻¹ de coagulante, foi obtido valor de turbidez remanescente de 2.4 uT, a qual atendeu a norma NBR 13.969/97.

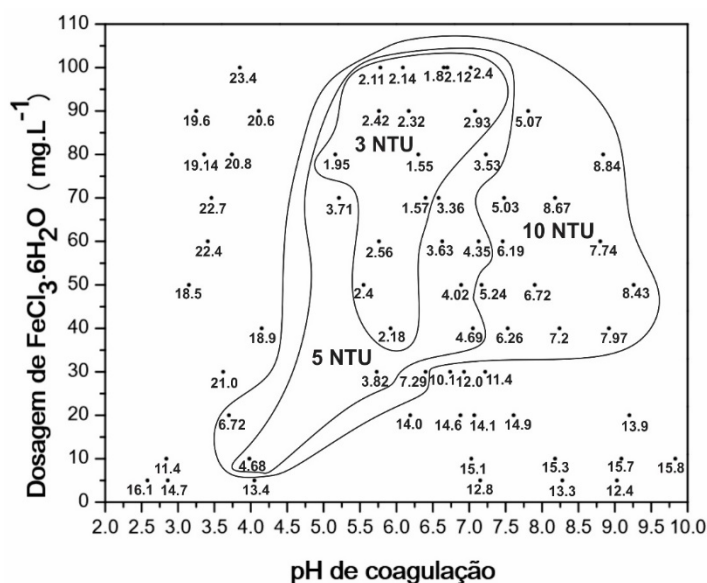


Figura 1. Diagrama de coagulação para o cloreto férrico hexahidratado, contendo curvas de mesma turbidez remanescente, para velocidade de 3.0 cm.min⁻¹.

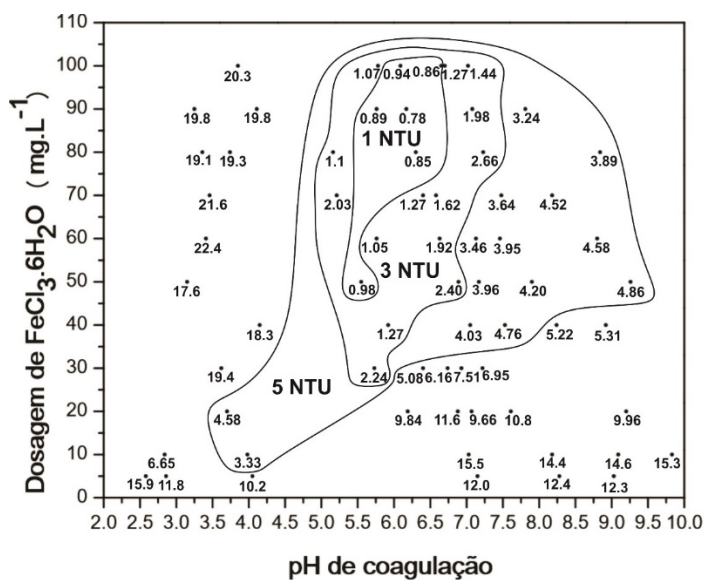


Figura 2. Diagrama de coagulação para o cloreto férrico hexahidratado, contendo curvas de mesma turbidez remanescente para velocidade de 1.5 cm.min⁻¹.

Ainda, para a velocidade de sedimentação de $1.5 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, foram alcançados valores de turbidez remanescente de 1.05 e 0.98 uT . Para isso, foram utilizadas dosagens de $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de coagulante, e de $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de acidificante, respectivamente (pH de coagulação de 5.7 e 5.5).

Na figura 3 é apresentada a última velocidade de sedimentação avaliada (de $0.5 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$), na qual foram alcançados valores de turbidez remanescente ainda menores, de 0.54 a 0.82 uT . Para isso, foram dosados de 50 a $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de coagulante e o pH de coagulação foi entre 5.5 a 6.6.

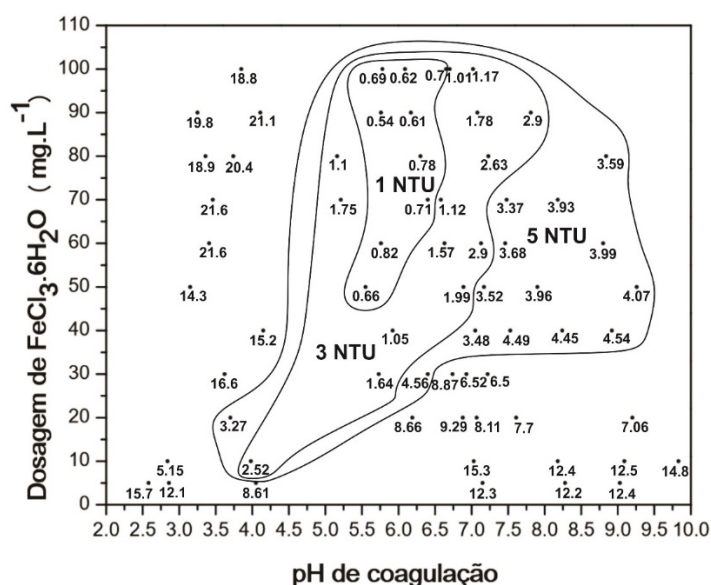


Figura 3. Diagrama de coagulação para o cloreto férrico hexahidratado, contendo curvas de mesma turbidez remanescente, para velocidade de $0.5 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Pode-se constatar através da visualização das Figuras 1, 2 e 3 que conforme a velocidade de sedimentação diminuiu, houve uma melhoria significativa de remoção de turbidez do efluente. Todavia, em uma estação de tratamento de efluentes (ETE), não é uma alternativa viável para projeto, pois segundo Bartiko e De Julio (2015), velocidades de sedimentação muito baixas implicam em maiores tempos de detenção hidráulica do efluente a ser sedimentado, e consequentemente em elevadas dimensões dos decantadores.

Portanto deve-se, na prática, buscar valores de turbidez remanescente próximos daqueles exigidos para o uso a qual a água se destina, privilegiando menores dosagens de produtos químicos e maiores velocidades de sedimentação. Desta forma, viabiliza-se economicamente o tratamento previsto para o reuso proposto e a execução do projeto.

A partir dos diagramas de coagulação foi possível determinar três condições (de dosagem de coagulante, de pH de coagulação e de velocidade de sedimentação) em que foram obtidos valores de turbidez remanescentes satisfatórios, sem o uso demasiado de coagulante e de agente acidificante (bem como tempo reduzido de detenção hidráulica), essas condições são apresentadas na Tabela 2 e foram as adotadas na segunda etapa da presente pesquisa (que incluiu a filtração e desinfecção).

Tabela 2. Valores de turbidez para as melhores condições e suas respectivas dosagens de coagulante e acidificante, velocidade de sedimentação de 1.5 cm.min⁻¹.

	Bruto	Condição I	Condição II	Condição III
Turbidez (uT)	14.5	2.4	1.05	0.98
Dosagem de FeCl ₃ .6H ₂ O (mg.L ⁻¹)	-	50	60	50
Dosagem de HCl (mg.L ⁻¹)	-	0	20	25
pH de coagulação	7	6.5	5.4	5.3

A velocidade de sedimentação adotada na segunda etapa da pesquisa foi de 1.5 cm.min⁻¹, na qual obteve-se resultados satisfatórios de remoção de turbidez sem haver a necessidade de um tempo de detenção hidráulica demasiadamente elevado na etapa de sedimentação, conforme discutido anteriormente.

Ensaio de coagulação, floculação, sedimentação e filtração

A caracterização físico-química do efluente bruto e após os ensaios de coagulação, floculação, sedimentação e filtração obtida na segunda etapa são apresentados na Tabela 3. A partir dos resultados pode-se constatar valores de pH e turbidez maiores para o efluente bruto (7.6 e 40.8 uT, respectivamente) em comparação aqueles encontrados na primeira etapa (7 e 14.5 uT), em decorrência das variações comuns advindas das estações de tratamento de efluentes. Entretanto, mesmo com valores de pH inicial e turbidez maiores, os valores de turbidez encontrados na segunda etapa, após o tratamento, foram muito próximos daqueles obtidos quando a turbidez inicial foi menor.

As diretrizes da USEPA (2012) e a NBR 13.969/97 apresentam diversas categorias de reuso. Na tabela encontram-se os valores máximo permitidos para reuso Classe 1, de acordo com a NBR 13.969/97, que corresponde à lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes. Já para as diretrizes da USEPA (2012), na tabela encontram-se os valores máximos permitidos para diversas finalidades. Assim, as condições II e III atenderam o parâmetro turbidez, de acordo com as diretrizes da USEPA (2012). Ainda, os três valores de turbidez encontrados nestes ensaios atenderam águas de reuso para Classe 1, conforme a NBR 13.969/97.

Tabela 3. Caracterização físico-química para o efluente bruto e tratado em comparação com as diretrizes/resoluções/normas vigentes.

Parâmetro	Bruto	Condição I*	Condição II*	Condição III*	USEPA (2012)	Conama n° 430 (2011)	NBR 13.969 (1997)
pH	7.6	7	6.5	6.3	8.3-10 / 6 - 9	5 - 9	6 - 8
Temperatura (°C)	26.4	27.6	27.4	27.2	-	< 40	-
Condutividade ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	487.3	493.1	526.2	536.5	80 - 5400	-	-
Alcalinidade total ($\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$)	162.8	97.5	78	71.5	100 - 350	-	-
Turbidez (μT)	40.8	2.4	1.07	1.07	< 2	-	< 5
Cor aparente (μC)	234	22	8	8	-	-	-
Dureza total ($\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$)	46.8	15.2	31.2	31.2	< 0.3	-	-
Fósforo total ($\text{mgP}\cdot\text{L}^{-1}$)	2.5	< 0.01	< 0.01	< 0.01	-	-	-
Nitrato NO_3^- ($\text{mgN}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.12	0.1	0.1	0.13	< 5	-	-
DQO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	88	65	41	33	-	-	-
$\text{DBO}_{5,20}$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	22.8	6.3	4.4	3.9	< 10	< 120	-
SDT ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	60	20	25	10	< 1/ < 450	-	< 200
SST ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	70	10	20	10	≤ 30	-	-

*Condições simuladas na primeira etapa da pesquisa.

Todos os valores obtidos para nitrato e SDT (inclusive para o efluente bruto), atenderam água apta para reuso em irrigação de acordo com a USEPA (2012). Ainda, foram encontrados valores para SDT nas quais satisfazem águas de reuso de classe 1 conforme NBR 13.969/97.

Os valores encontrados para SST atenderam reuso urbano, na agricultura, e industrial para torres de resfriamento, de acordo com as diretrizes estabelecidas pela USEPA (2012), levando-se em conta apenas o parâmetro sólidos suspensos totais. Da mesma maneira, os valores de $\text{DBO}_{5,20}$ obtidos nos ensaios, mostraram-se aptas para reuso urbano, irrigação de culturas alimentares e reuso industrial, de acordo com a USEPA (2012).

Ainda, os valores para $\text{DBO}_{5,20}$, também atenderam a Resolução Conama n° 430/2011 para lançamento de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários.

Pode-se verificar pelos dados apresentados na tabela 3, que houve remoção significativa de fósforo total para as três condições simuladas (abaixo de $0.01 \text{ mgP}\cdot\text{L}^{-1}$). Li *et al.* (2017) também utilizaram o coagulante cloreto férrico para o tratamento de esgoto doméstico e obtiveram remoção maior que 80% de fósforo total.

Desinfecção com cloro

Através da quantificação dos microrganismos *E.coli* e coliformes totais para o efluente bruto (representado pelo número inicial de microrganismos N_0) e para o efluente tratado (representado

pelo número final N), foram obtidos dados para determinar a eficiência da inativação (em log), que foram calculados pela Equação (1) obtida no manual de orientação Earth Tech Canada (2005). O número de *E. coli* e coliformes totais para o efluente bruto era de 21.2×10^4 e 26.7×10^4 UFC.100 mL⁻¹, respectivamente. O número final (N) de microrganismos foi determinado após aplicação de hipoclorito de sódio (NaOCl) para as concentrações aplicadas de 1, 2 e 3 mgCl₂.L⁻¹, em um tempo de contato de 20 minutos.

$$\text{Log} \left(\frac{N}{N_0} \right)$$

Equação (1)

Onde:

N: número de microrganismos no instante t=2;

N₀: número de microrganismos no instante t=0.

Na tabela 4, pode-se constatar que para dosagens de 1 mgCl₂.L⁻¹ não houve total inativação de *E. coli* e coliformes totais. Porém, os valores obtidos para as três condições e para as concentrações aplicadas de 2 e 3 mgCl₂.L⁻¹ apresentaram total inativação para *E. coli* e log de inativação para coliformes totais entre -2.97 a -3.68, apresentando valores melhores que os obtidos para concentração de 1 mgCl₂.L⁻¹ de cloro aplicado. Desta forma, a aplicação das concentrações de 2 e 3 mgCl₂.L⁻¹, nas três condições testadas, geraram efluente isento de *E. coli* e, portanto, capaz de se enquadrar na Classe 1 da norma NBR 13.969/97, a qual estabelece concentração máxima de coliformes fecais abaixo de 200 NMP.100mL⁻¹.

Tabela 4. Inativação de *Escherichia coli* e coliformes totais para diferentes concentrações de cloro aplicado.

Condição	Cloro (mg.Cl ₂ .L ⁻¹)	Log (N/N ₀) <i>E. coli</i>	Log (N/N ₀) CT
I	1	-2.61	-2.20
I	2	*	-2.97
I	3	*	-3.12
II	1	-2.70	-2.50
II	2	*	-3.05
II	3	*	-3.47
III	1	-2.80	-2.58
III	2	*	-3.17
III	3	*	-3.68

*: total inativação de microrganismos.

Pode-se observar na figura 4, que à medida que o pH diminuiu (valores de pH abaixo de 7), houve maior inativação de coliformes totais, isso pode ser justificado pelo predomínio do cloro na forma de ácido hipocloroso, na qual o desinfetante é mais eficiente (pois penetra mais facilmente na parede celular do microrganismo) em relação ao predomínio do cloro na forma de íon hipoclorito (Di Bernardo e Dantas 2005).

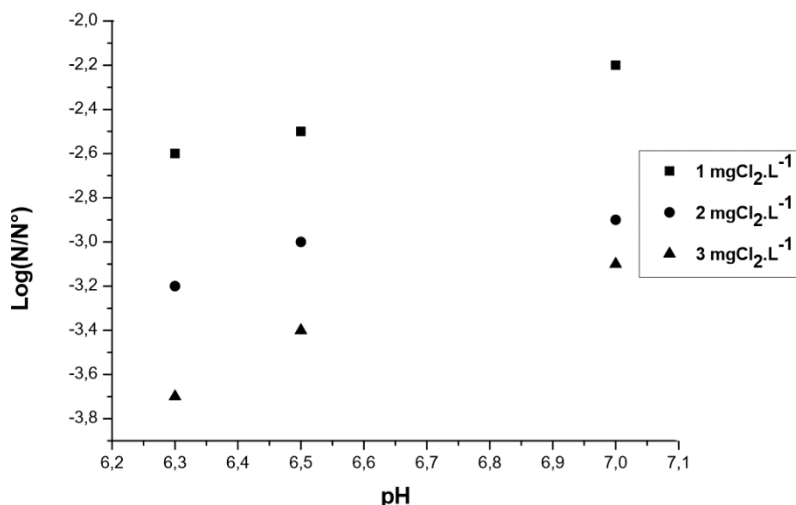


Figura 4. Inativação de coliformes totais para diferentes valores de pH e concentrações de cloro aplicada.

Os dados obtidos permitiram concluir que a utilização do hipoclorito de sódio como agente desinfetante para águas de reuso é vantajoso, pois apresentou considerável inativação de microrganismos para baixas concentrações aplicadas, em um tempo de contato de 20 minutos. A mesma conclusão foi alcançada por Üstün *et al.* (2011) os quais utilizaram hipoclorito de sódio e outro agente desinfetante para inativação de microrganismos no tratamento terciário de esgoto doméstico para reuso em irrigação. O mesmo autor ainda comparou a viabilidade do NaOCl com outros agentes desinfetantes, concluindo que o mesmo possui vantagens tanto na eficiência de remoção como economicamente.

Conclusões

Por meio dos diagramas de coagulação, foi possível encontrar três condições para o par de valores de “dosagem de coagulante x pH de coagulação” que apresentaram resultados satisfatórios de turbidez remanescente (2.4; 1.05 e 0.98 uT) sem uso demasiado de coagulante e acidificante (50, 60 e 50 mg.L⁻¹ de FeCl₃.6H₂O e 0.20 e 25 mg.L⁻¹ de HCl (0.5 mol.L⁻¹), respectivamente). Além disso, foi determinada uma velocidade de sedimentação (1.5 cm.min⁻¹) que apresentou resultados satisfatórios de turbidez remanescente com tempo reduzido de detenção hidráulica.

Os valores obtidos para os parâmetros na segunda etapa (na qual foram simulados os ensaios de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção), apresentaram resultados que atenderam águas de reuso para diversas finalidades (reuso urbano, irrigação, agricultura, industrial, entre outros.), de acordo com as diretrizes da USEPA (2012), e a norma NBR 13.969/97.

Além disso, foi analisada remoção significativa de fósforo total para as três condições, as quais atenderam a Resolução Conama n° 430/2011 para lançamento de efluentes.

Os resultados obtidos para inativação de microrganismos utilizando hipoclorito de sódio (5.7% de cloro) como agente desinfetante, demonstraram ser uma alternativa vantajosa para águas de reuso, pois proporcionaram total inativação de *Escherichia coli*, além de valores de coliformes totais com log de inativação entre -2.97 a -3.68. Assim sendo, o efluente em estudo atendeu a categoria mais nobre da norma NBR 13.969/97, categoria Classe 1, a qual estabelece concentração máxima de coliformes fecais abaixo de 200 NMP.100mL⁻¹.

Referências bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997) NBR 13969: 1997 - *Tanques sépticos. Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação*, Rio de Janeiro, 60p. Acesso em 27 de julho de 2017, disponível em: https://acquasana.com.br/legislacao/nbr_13969.pdf
- Angreni, E. (2009) Review on optimization of conventional drinking water treatment plant. *World applied sciences journal*. 7(9), 1144-1151. Acesso em 26 de julho de 2017, disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/2dcd/965372f8ee9d7a3a347b64ff4240ddb6ccde.pdf>
- APHA/AWWA/WEF (2012) *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 22th ed., American Public Health Association, Washington DC., 1360 pp.
- Bartiko, D., De Julio, M. (2015) Construção e emprego de diagramas de coagulação como ferramenta para o monitoramento contínuo da floculação em águas de abastecimento. *Revista Ambiente & Água*. 10(1), 71-81. Acesso em 27 de julho de 2017, disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ambiagua/v10n1/1980-993X-ambiagua-10-01-00071.pdf>
- Brasil, Conselho Nacional de Recursos Hídricos (2005) Resolução n° 54, de 28 de novembro de 2005. *Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água*, 09 de março de 2006, Diário Oficial da União, Brasília, DF, Brasil 3p. Acesso em 27 de julho de 2017, disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/838F10BD/Resol54-08_ReusoDiretoAgua1.pdf
- Brasil, Conselho nacional do meio ambiente (2011) *Resolução n° 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente*, Brasília, DF, Brasil. 9p. Acesso em 25 de julho de 2017, disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>
- Centurione Filho, P.L., Di Bernardo, L. (2002) Procedimento para execução de ensaios de flotação/filtração em equipamento de bancada. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*. 8(1), 39-44. Acesso em 26 de julho de 2017, disponível em: <https://www.abes-dn.org.br/publicacoes/engenharia/resaonline/v8n12/v8n12n04.pdf>
- Crea – PR, Conselho regional de engenharia, arquitetura e agronomia do Paraná (2010) *Série de cadernos técnicos do CREA-PR - Uso e reuso da água*, Agenda parlamentar CREA-PR, 32p.
- Di Bernardo, L., Dantas, A. D. B. (2005) *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*, 2.ed., Rima, São Paulo, SP, 1565p.
- Di Bernardo, L., Dantas, A.D.B., Voltan, P.E.N. (2011) *Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água*, LDiBe, São Carlos, SP, 454 pp.
- Earth Tech. Chlorine and Alternative Disinfectants Guidance Manual (2005) *Prepared for Office of Drinking Water Prepared by Earth Tech (Canada) Inc. March*, Canadá, 117p. Acesso em 27 de julho de 2017, disponível em: https://www.gov.mb.ca/waterstewardship/odw/reginfo/approvals/odw_chlorine_and_alternative_disinfectants.pdf

- Li, X., Liu, Y., Liu, F., Liu, A., Feng, Q. (2017). Comparison of ferric chloride and aluminum sulfate on phosphorus removal and membrane fouling in MBR treating BAF effluente of municipal wastewater. *Journal of water reuse and desalination*. **7**(4), 442-448.
- Lyu, S., Chen, W., Zhang, W., Fan, Y., Jiao, W. (2015) Wastewater reclamation and reuse in China: Opportunities and challenges. *Journal of Environmental Sciences*. **39**, 86-96. Acesso em 25 de setembro de 2018, disponível em: <https://www-sciencedirect.ez103.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1001074215004684>
- Rizzo, L., Krätke, R., Linders, J., Scott, M., Vighi, M., Voogt, P. (2018) Proposed EU minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge: SCHEER scientific advice. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. **2**, 7-11. Acesso em 13 de setembro de 2018, disponível em: <https://www-sciencedirect.ez103.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2468584417300594>
- Salgot, M., Folch, M. (2018). Wastewater treatment and water reuse. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. **2**, 64-74. Acesso em 13 de setembro de 2018, disponível em: <https://www-sciencedirect.ez103.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2468584417300314>
- Sánchez-Martín, J., Beltrán-Heredia, J., Solera-Hernández, C. (2010). Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant. Pilot plant trials. *Journal of environmental management*. **91**(10), 2051-2058. Acesso em 15 de setembro de 2018, disponível em: <https://www-sciencedirect.ez103.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0301479710001428>
- São Paulo, Governo do Estado de São Paulo (2015) Lei nº 16.174, de 22 de abril de 2015 – *Estabelece regramento e medidas para formento ao reuso de água para aplicações não potáveis, oriundas do polimento do efluente final do tratamento de esgoto, de recuperação de água de chuva, da drenagem de recintos subterrâneos e de rebaixamento de lençol freático e revoga a Lei Municipal nº 13.309/2002, no âmbito do Município de São Paulo e dá outras providências*, 22 de abril de 2015, Publicação Diário Oficial do Estado, São Paulo, SP, Brasil, 4p. Acesso em 27 de julho de 2017, disponível em: http://www.abes-sp.org.br/arquivos/lei_16.174_Municipio_de_SP_fomento_reuso_fins%20nao_potaveis.pdf
- Souza, J. B., Daniel, L. A. (2005) Comparação entre hipoclorito de sódio e ácido peracético na inativação de E. coli, Colifagos e C. Perfringens em água com elevada concentração de matéria orgânica. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*. **10**(2), 111-117. Acesso em 27 de julho de 2017, disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/esa/v10n2/a04v10n2.pdf>
- Tonetti, A. L., Coraucci Filho, B., Nicolau, C. E., Barbosa, M., Tonon, D. (2012) Tratamento de esgoto e produção de água de reuso com o emprego de filtros de areia. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. **17**(3), 287-294. Acesso em 27 de julho de 2017, disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/esa/v17n3/v17n3a05>
- USEPA, United States Environmental Protection Agency (2012) *Guidelines for water reuse*. EPA/600/R-12/618, Washington DC, 643 pp.
- Üstün, G. E., Solmaz, S. K. A., Çiner, F., Başkaya, H. A. (2012) Tertiary treatment of a secondary effluent by the coupling of coagulation–flocculation– disinfection for irrigation reuse. *Desalination*. **277**(1-3), 207-212.