

Remoção de partículas similares aos oocistos de *Cryptosporidium* por filtração direta ascendente usando um coagulante natural: estudo em escala piloto

Removal of *Cryptosporidium* oocyst-like particles by direct upward filtration using a natural coagulant: pilot scale study

*Eliminación de partículas similares a *Cryptosporidium* ooquistes por filtración directa ascendente utilizando un coagulante natural: estudio a escala piloto*

Ingrith Marcela Romero Méndez¹, Yovanka Pérez Ginoris²,
Cristina Celia Silveira Brandão³ & Marceley Ferreira Nascimento⁴

¹Ingeniera Ambiental, Magíster en Tecnología Ambiental y Recursos Hídricos. ²Engenharia Química, Mestra. em Biotecnologia Industrial, Doutora em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. ³Engenharia Química, mestra em Engenharia Química, Doutora em Engenharia Ambiental.

⁴Engenharia Sanitária, mestra em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

¹Corporación Universitaria Minuto de Dios. Garzón, Huila. Colombia.

^{2,3}Professor adjunto da Universidade de Brasília. Brasil. ⁴Instituto Federal de Brasília. Brasil.

¹ iromeromend@uniminuto.edu.co, ² yovanka.perez@gmail.com,
³ cbrandao@unb.br, ⁴ marceley.nascimento@ifb.edu.br

Resumo

No presente estudo foram realizados ensaios de filtração direta ascendente, em escala piloto, para avaliar o desempenho do coagulante natural quitosana na remoção de microesferas de poliestireno com dimensões similares às dos oocistos de *Cryptosporidium*, no tratamento de água natural com turbidez de cerca de 30 uT, induzida com caulinita. Os parâmetros avaliados foram turbidez, matéria orgânica (absorbância UV-254 nm) e a concentração de microesferas. Inicialmente foram efetuados testes de jarros para a construção do diagrama de coagulação e definição das condições a serem adotadas nos ensaios de filtração. Os ensaios de filtração direta ascendente foram efetuados em condições

de coagulação ótima, superdosagem e subdosagem de quitosana. Nos ensaios de filtração realizados na condição de coagulação ótima a turbidez média do efluente foi de 0.29 uT no período de operação regular do sistema. Nessa condição de coagulação a remoção de microesferas oscilou entre 4.4 log e 4.9 log. As condições de superdosagem e subdosagem afetaram o desempenho do filtro com aumentos na turbidez do efluente e redução na remoção de microesferas com respeito à condição ótima de coagulação da ordem de 0.65 log e 0.98 log, respectivamente, no período de operação regular do sistema, indicando que tais condições de coagulação levam aumentos do número de

partículas com dimensões similares às dos oocistos de *Cryptosporidium* no efluente do filtro, o que pode comprometer a qualidade microbiológica da água produzida. Finalmente, em todas as condições de coagulação investigadas, a remoção média de absorvância ($UV_{254\text{ nm}}$) foi de até 50%.

Palavras chave: coagulação, ensaio de filtração, quitosana, microesferas de poliestireno, tratamento de água.

Abstract

In the present study were performed up-flow in-line filtration experiments, in pilot scale, to evaluate the performance of the natural coagulant chitosan on the removal of polystyrene microspheres with similar dimensions to the *Cryptosporidium* oocysts in the natural water treatment with turbidity around 30 uT, with kaolinite-induced. The parameters evaluated were the turbidity, organic matter (absorbance 254 nm) and microspheres concentration. Initially, were performed jar tests for the coagulation diagram construction and definition of the conditions to be adopted in the filtration experiments. The up-flow in-line filtration experiments were effectuated in the optimal coagulation conditions, over-optimal and sub-optimal dosages. The coagulation diagram showed a region of optimal performance of chitosan, corresponding to effluent turbidity values from 0.5 uT to 0.25 uT at doses between 0.9 e 1.5 mg/L and pH values between 5 and 6. In the filtration experiments conducted in optimal coagulation conditions the mean effluent turbidity was 0.29 uT during the regular operation of the system. In this coagulation condition the microspheres removal ranged between 4.3 log e 4.9 log. The over optimal and suboptimal coagulation conditions, affected the filter performance with increases in the effluent turbidity and was accompanied by removal reduction of microspheres with respect to the optimal coagulation condition of the order of 0.65 to 0.98 log, respectively, during the regular operation of the system, indicating that these coagulation conditions lead to increases the number of particles with similar dimensions to the *Cryptosporidium* oocysts in the filter effluent, which can compromise the microbiological quality of the water produced. Finally, in all investigated coagulation conditions the mean absorbance ($UV_{254\text{ nm}}$) removal was 50%.

Key-words: chitosan, coagulation, filtration experiment, polystyrene microspheres, water treatment.

Resumen

En la presente investigación fueron realizados experimentos de filtración de flujo ascendente en línea, a escala piloto, para evaluar el desempeño del coagulante natural quitosano en la extracción de microesferas de poliestireno con dimensiones similares a *Cryptosporidium* oocysts, en el tratamiento de aguas con turbidez natural aproximada de 30 uT, inducida con caolinita. Los parámetros evaluados fueron turbidez, materia orgánica (absorbancia a 254 nm) y concentración de microesferas. Inicialmente, se realizaron pruebas de jarras para la construcción del diagrama de coagulación y la definición de las condiciones para ser adoptadas en experimentos de filtración. Los experimentos de filtración de flujo ascendente en línea se efectuaron en condiciones de coagulación de dosis óptimas, super-óptimas y sub-óptimas. El diagrama de coagulación mostró una región de un rendimiento óptimo de quitosano, correspondiente a los valores de turbidez del efluente de 0,5 uT a 0.25 uT en dosis entre 0,9 e 1,5 mg/L y pH valores entre 5 y 6. En los experimentos de filtración en condiciones de coagulación óptima la turbidez promedio del efluente fue 0.29 uT durante el funcionamiento normal del sistema. En la coagulación de esta condición la extracción de microesferas osciló entre 4,3 log e log 4.9. En condiciones de coagulación super-óptima y subóptima, se afectó el rendimiento del filtro con incrementos en la turbidez del efluente y fue acompañado por la reducción en la extracción de microesferas con respecto a la condición de coagulación óptima del orden de 0,65 a 0,98 log, respectivamente, durante el funcionamiento normal del sistema, lo que indica que estas condiciones de coagulación conducen a aumentar el número de partículas con dimensiones similares a *Cryptosporidium* oocysts en el efluente del filtro, lo cual puede comprometer la calidad microbiológica del agua producida. Finalmente, en todas las condiciones de coagulación investigadas con absorbancia ($UV_{254\text{ nm}}$) la extracción media fue de 50%.

Palabras clave: quitosano, coagulación, experiment de filtración, microesferas de poliestireno, tratamiento de aguas.

Introdução

Embora a tecnologia convencional de tratamento de água seja a mais difundida no Brasil, nos últimos anos tem se intensificado o uso das tecnologias de tratamento simplificadas baseadas em filtração direta, dentre elas a filtração direta ascendente (FDA).

Um dos grandes desafios da filtração direta ascendente é garantir a qualidade microbiológica da água para consumo, devido a que essa tecnologia apenas apresenta uma única barreira física contra as impurezas. A ocorrência de microrganismos de veiculação hídrica como o *Cryptosporidium parvum* com oocistos de tamanho reduzido (4 a 6 μm), resistentes à desinfecção com cloro, reforça a necessidade de garantir condições operacionais que promovam eficiências elevadas de remoção desses organismos.

Devido aos elevados custos na recuperação e detecção dos oocistos na água, além do risco à saúde pela sua manipulação, microesferas de poliestireno de tamanho similar ao dos oocistos vêm sendo utilizadas como substitutos nos ensaios experimentais para avaliação da remoção desses organismos por diferentes tecnologias de tratamento de água.

Tradicionalmente, o tratamento da água mediante tecnologias que empregam coagulação química tem sido realizado usando sais metálicos, sendo o sulfato de alumínio o coagulante mais difundido. Entretanto, o uso desse coagulante apresenta como principais desvantagens a necessidade de doses elevadas para efetuar uma coagulação eficiente, a geração de grandes volumes de lodo de difícil tratamento e disposição, representando um risco para o meio ambiente pela sua reduzida biodegradabilidade. Dessa forma, esforços vêm sendo realizados pela comunidade científica no sentido de desenvolver pesquisas voltadas para a substituição desse coagulante por substâncias cujos impactos ao meio ambiente sejam menores.

A quitosana é um polímero de origem natural que tem despertado interesse, devido a que pode ser utilizada como agente coagulante/floculante no tratamento de água, gerando menor quantidade de

lodo que o tratamento com sulfato de alumínio. Ainda apresenta como vantagem o fato de não deixar residual metálico na água tratada.

O uso da quitosana como coagulante tem sido avaliado nas tecnologias convencionais e não convencionais de tratamento de água, com resultados satisfatórios em termos de remoção de turbidez, matéria orgânica e micro-organismos patogênicos como o *Cryptosporidium* (Brown & Emelko, 2009; Capelete & Brandão, 2013). Contudo, são escassos os estudos que avaliam o desempenho desse biopolímero no tratamento de água por filtração direta ascendente. Dessa forma, o presente trabalho avaliou o potencial de uso da quitosana como coagulante no tratamento de água com turbidez moderada contendo microesferas de poliestireno em substituição aos oocistos de *Cryptosporidium* por filtração direta ascendente.

Materiais e métodos

O trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Análise de Água (LAA) do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília e compreenderam uma etapa, em escala de bancada (Etapa I), referente à construção do diagrama de coagulação a partir de testes de jarros adaptados para filtração direta, e outra, em escala piloto (Etapa II), destinada aos experimentos de filtração direta ascendente para avaliação do desempenho da quitosana na remoção de microesferas.

A água utilizada no estudo foi preparada usando como água base água do Lago Paranoá, Brasília – Distrito Federal, Brasil. A preparação da água de estudo consistia na filtração da água base através de rede de fitoplâncton. A turbidez era induzida pela adição de suspensão de caulinita micronizada, preparada seguindo recomendações de Di Bernardo (2004), até a obtenção de um valor próximo de 30 uT.

A quitosana usada como coagulante foi adquirida da Sigma em forma de pó, com grau de pureza analítica, grau de desacetilação de 0.75 – 0.85 e peso molecular na faixa de 50 – 190 kDa.

O preparo da solução de quitosana foi realizado seguindo o procedimento de Vasyukova, Terrichova, Azevedo, Brandão & Uhl (2010): dissolução de 0.5 gramas de quitosana em 1L de solução de HCl 0.5 mol/L, mantido sob agitação durante 48 horas em aproximadamente 30 rpm, seguido de 30 minutos em banho de ultra-som.

A suspensão de microesferas de poliestireno auto-fluorescentes (diâmetro de 4.5 μm e densidade de 1.045 g/mL) foi adquirida da Polyscience Incorporation, Warrington, Pensilvânia, EUA.

Etapa I: Ensaios em escala de bancada

Nessa etapa experimental foram realizados testes de jarros adaptados para filtração direta, conforme metodologia proposta por Di Bernardo, Mendes, Brandão, Sens e Pádua (2003), para a construção do diagrama de coagulação e determinação das condições ótimas de remoção de turbidez e absorvância a 254 nm (UV_{254}) para a água de estudo.

Utilizou-se quitosana em dosagens de 0.5 a 5 mg/L (incrementos de 0.5 mg/l) e valores de pH de coagulação entre 5.0 e 8.

Etapa II: Ensaios em escala piloto

Nesta etapa foi avaliada a remoção de microesferas, turbidez, cor aparente e matéria orgânica em unidade de filtração direta ascendente. A instalação piloto utilizada para a realização dos ensaios de filtração foi projetada por Nascimento (2009) (Figura 1). A instalação era constituída pelos seguintes componentes: Reservatório de água de estudo sem microesferas (capacidade de 500 L); Reservatório de água de estudo com microesferas (capacidade de 150 L); Bomba de alimentação de água de estudo; Reservatório de coagulante; Bomba peristáltica para dosagem do coagulante; Dispositivo de mistura rápida (DMR) do tipo injetor hidráulico; Tomadas piezométricas; Filtro direto ascendente com meio filtrante de areia; Câmara de carga; Bomba destinada à lavagem do filtro e Reservatório de água de lavagem.

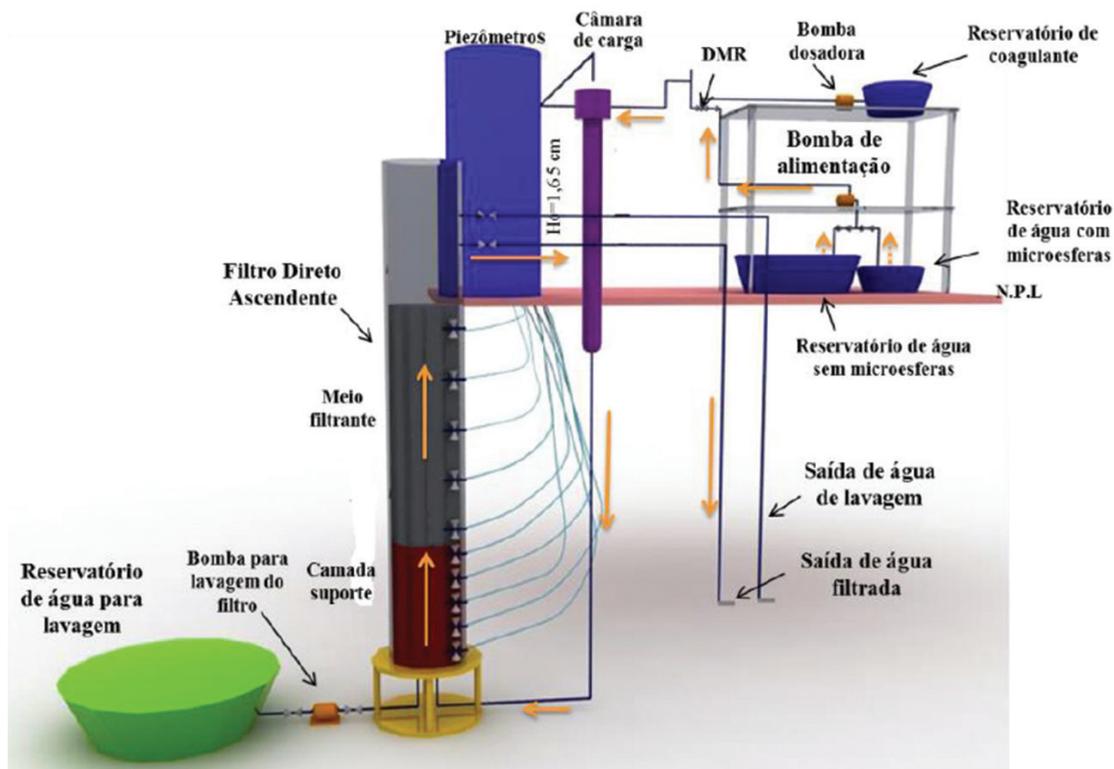


Figura 1. Esquema da instalação piloto.

Foram realizados seis ensaios de filtração, com taxa de 120 m³/m².d. As condições de coagulação testadas nos experimentos de filtração foram definidas com base no diagrama de coagulação e confirmadas por meio de teste de jarros que eram realizados antes do início dos ensaios. Nos quatro primeiros ensaios foi avaliada a dose ótima de coagulação. No ensaio 5 foi adotada uma dose 20% acima da ótima e no ensaio 6 foi utilizada uma dose 50 % menor que a dose ótima.

Após a definição da dose de coagulante, o pH da água de estudo era corrigido para atender ao pH de coagulação. Em seguida 120 L de água de estudo eram transferidos para o reservatório destinado à água de estudo inoculada com microesferas, onde era realizada a inoculação com microesferas em concentração de 10⁵ unidades/L. Para avaliar a eficiência de remoção de microesferas no período de amadurecimento do filtro, era alimentada água de estudo com microesferas durante o referido período (correspondente ao tempo de detenção hidráulica da unidade de filtração de 45 min). Transcorrido esse período, a alimentação de água de estudo com microesferas era interrompida e iniciava-se a alimentação com água de estudo isenta de microesferas. A alimentação com água de estudo contendo microesferas era reiniciada na quarta hora de operação do sistema, com o intuito de avaliar a remoção de microesferas no período de operação regular.

Ao final de cada ensaio de filtração era realizada a lavagem ascensional do filtro utilizando água da torneira com velocidade mínima de fluidificação de 1.54 m/min, correspondendo a uma expansão do meio filtrante de 18 cm, por um período de tempo de 30 minutos.

No decorrer dos experimentos, com duração aproximada de 7 horas, eram coletadas amostras de água de estudo, água coagulada e água filtrada para análise de turbidez e pH. A amostragem era realizada inicialmente a cada 15 minutos, e quando atingido o tempo de detenção a frequência de coleta passava a ser de 30 minutos. Paralelamente eram monitoradas a vazão e a perda de carga do sistema por meio de leituras piezométricas. A alcalinidade e a cor aparente foram monitoradas na água de estudo

e na água filtrada no período de amadurecimento e no final do período de operação regular.

Para detecção e enumeração das microesferas era realizada a coleta de três amostras: água de estudo inoculada com microesferas (AE); água filtrada durante o período de amadurecimento (AFA); e duas amostras referentes ao período de operação regular do filtro; a primeira aos 45 minutos após o início da inoculação (AFR_45) e a segunda uma hora após (AFR_1h). A fim de assegurar a detecção de microesferas na água filtrada, considerando possíveis remoções entre 3 e 4 log, foram coletados volumes das amostras AFR_45, AFR_1h de 2L e de 1L de AFA. Em virtude da elevada concentração de microesferas inoculada na água de estudo, era coletada uma alíquota de apenas 30 mL de amostra imediatamente após a inoculação das microesferas.

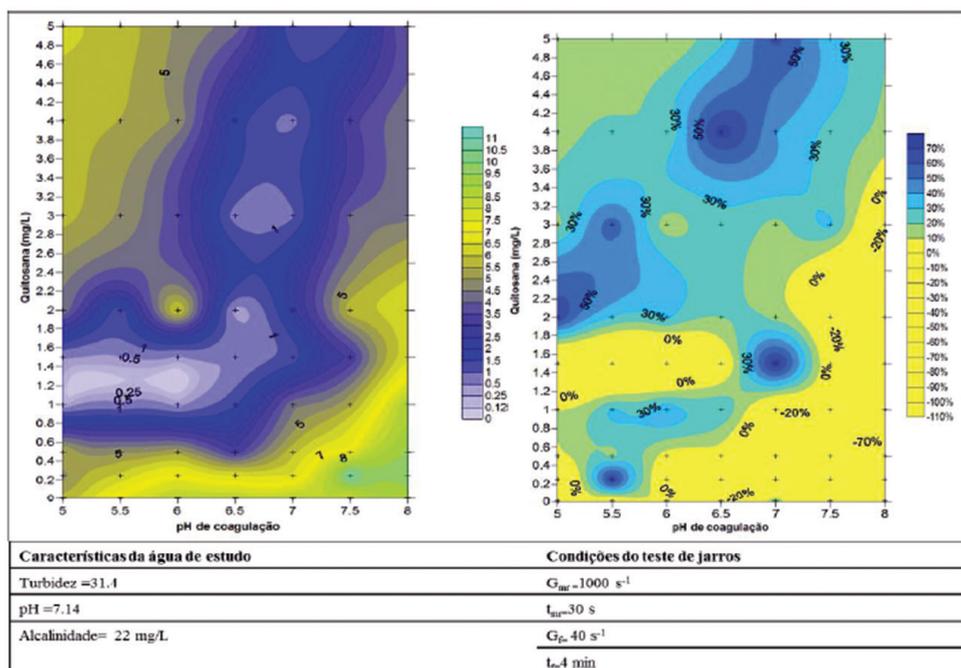
O procedimento de recuperação das microesferas na água de estudo e água filtrada foi realizado em duplicata e seguiu a metodologia proposta por Cerqueira (2008). Essa metodologia consiste na filtração de alíquotas das amostras através de membranas filtrantes de éster de celulose e tamanho de poros 0,45 µm. Após a filtração, as microesferas eram recuperadas das membranas filtrantes por raspagem com o auxílio de um raspador de células e adição de 2 mL de solução de PBST. As suspensões de microesferas eram, então, transferidas para tubos Falcon e preservadas a 4°C para posterior contagem.

Para efetuar a contagem das microesferas recuperadas, alíquotas de 1 mL da suspensão de microesferas eram transferidas dos tubos Falcon para uma câmara de Segdwick-Rafter. A contagem era realizada por microscopia de fluorescência (FITC) usando microscópio Leica Modelo DM LB2 e aumento de 100X.

Resultados e discussão

Etapa I: Ensaios em escala de bancada

Na Figura 2 são apresentados os diagramas de coagulação correspondentes à turbidez no efluente filtrado e a porcentagem de remoção de absorvância para todas as condições testadas.



G_{mr} : Gradiente de velocidade para a mistura rápida; t_{mr} : tempo de mistura rápida; G_f : Gradiente de velocidade para a floculação; t_f : tempo de floculação.

Figura 2. Diagramas de coagulação da água de estudo com turbidez moderada utilizando quitosana como coagulante – turbidez residual e redução de absorvância ($UV_{254\text{ nm}}$).

Verifica-se que para doses de quitosana entre 1 mg/L e 1.5 mg/L e valores de pH entre 5 e 6.4, existe uma região bem definida de eficiência de remoção de turbidez de 99.2%, correspondente a valores de turbidez residual do efluente de até 0.5 uT, valor prescrito pela legislação brasileira, Portaria MS nº 2914/2011, para efluentes de filtros rápidos (Ministério da Saúde, 2011).

Além disso, verifica-se que com o uso da quitosana em doses entre 1 e 1.4 mg/L e valores de pH entre 5 e 6.3, é possível se obter água filtrada com valores de turbidez inferiores ao limite de 0.3 uT estabelecido pela referida Portaria quando a concentração de oocistos de *Cryptosporidium* spp. nos pontos de captação de água do manancial de abastecimento apresenta valor médio a partir de 3.0 oocistos/L.

Por outro lado, pode ser constatado que o uso da quitosana entre 1 e 1.5 mg/L em valores de pH superiores de 6.4, bem como entre 0 e 0.9 mg/L e em doses acima de 1.5 mg/L para toda a faixa de valores de pH testados, a remoção de turbidez é afetada com valores de turbidez residual no efluente que não atendem ao padrão de potabilidade brasileiro.

As condições de coagulação ótimas diferem daquelas encontradas em outros estudos (Capelete e Brandão, 2013; Fonseca, Ferraz, Ginoris, Nascimento e Brandão, 2014) que avaliaram o desempenho da quitosana na remoção de turbidez de água do lago Paranoá por meio de ensaios de coagulação/floculação/sedimentação e ensaios de coagulação/floculação/filtração, respectivamente. Capelete e Brandão encontraram máxima remoção de turbidez para valores de pH na faixa de 6.5 a 7.5 e doses entre 1 mg/L e 1.5 mg/L. Entretanto, Fonseca *et al.* (2014), obtiveram boa eficiência com doses de quitosana de 0.8 a 5 mg/L em valores de pH entre 5.7 e 7. Estas divergências de resultados podem ser resultantes das diferenças na concentração e na natureza das partículas nas águas de estudo. Diferente do presente estudo, em que a turbidez da água foi induzida com caulinita, nesses trabalhos a turbidez natural da água de estudo é causada por material de natureza orgânica principalmente microalgas, o que pode promover interações diferentes da quitosana com essas partículas.

No diagrama de absorvância observa-se que nas condições de maior eficiência de remoção de turbidez a quitosana consegue remover 30% da absorvância (UV_{254nm}) inicial. Entretanto, verifica-se que existem 4 regiões bem restritas onde foi observada maior remoção de absorvância (até 70%): na dose de 0.25 mg/L e pH 5.5, em 2 mg/L e pH 5, 1.5 mg/L e pH 7 e na dose de 4 mg/L no pH 6.5. Por outro lado, verificasse uma região ampla em que não ocorreu remoção de absorvância localizada perto da região ótima de remoção de turbidez nas doses entre 1 mg/L e 1.7 mg/L na faixa de pH de 5 a 6.5. E ainda condições em que senão houve remoção o uso da quitosana resultou em aumento do material orgânico na água, como foi nos valores de pH de 6.5 a 8 com doses crescentes de quitosana até 3.5 mg/L.

Como o valor inicial de absorvância da água de estudo foi baixo, não representando risco de

formação de subprodutos da desinfecção, optou-se por utilizar nos ensaios de filtração as condições ótimas de coagulação que resultam em maior remoção de turbidez. Dessa forma, foram escolhidos com base no diagrama de coagulação para remoção de turbidez o pH de coagulação de 6.0 bem como as doses ótima, subdosagem e superdosagem de coagulação. Para a condição de dosagem ótima foi escolhida a faixa de trabalho de 0.8 até 1.2 mg/L para o coagulante buscando obter valores de turbidez residual de 0.3 uT. A dose subdosagem de quitosana escolhida foi 50% menor que a ótima e a dose superdosagem foi definida como 20% superior a dose ótima.

Etapa II: Ensaios em escala piloto

Na Tabela 1 é apresentado um resumo das condições estudadas em cada ensaio de filtração bem como as características da água de estudo e da água filtrada nos ensaios de FDA.

Tabela 1. Resumo dos ensaios de filtração direta ascendente e resultados de turbidez residual e remoção de microesferas.

Ensaio	Dose de quitosana (mg/L)	pH AC	Água de estudo	Água filtrada (Turbidez média)			Remoção (log) de microesferas	
		Varição	Turbidez média	AFA	AFR	AFi	AFA	AFR_1h
1	1 (DO)	5.45 - 6.06	27.5	1.64	0.25 - 0.57	0.3	3.7	4.83
2	0.9 (DO)	5.72 - 6.4	25.1	14	0.21- 0.4	0.23	3.56	4.91
3	0.9 (DO)	5.85 - 6.31	29	5.43	0.15 - 0.41	0.36	3.2	4.47
4	1 (DO)	5.53 - 6.23	30.3	1.16	0.16 - 0.3	0.21	4.25	4.43
5	1.2 (SD)	5.55 - 6.05	28.3	6.93	0.27 - 1.16	0.45	3.35	3.63
6	0.5 (SUD)	5.71 - 6.38	28.7	1	0.2 - 0.4	0.3	3.99	3.83

DO: Dose ótima; SD: Superdosagem; SUD: Subdosagem; AFA: Água filtrada no período de amadurecimento; AFR: Água filtrada na operação regular do filtro; AFi: Água filtrada no período de inoculação.

Pode ser constatado que em todos os ensaios realizados a turbidez do efluente do filtro no período de amadurecimento apresentou valores consideravelmente superiores a 0.3 uT. Esses valores também foram maiores que os observados durante operação regular do filtro. Tal comportamento, está associado

à eficiência da lavagem do filtro que influencia de forma negativa nos mecanismos de aderência nesta fase inicial da carreira de filtração. A vulnerabilidade do filtro ascendente em relação a eficiência de remoção de turbidez durante esse período também foi relatada por Nascimento (2009).

O baixo desempenho do filtro na remoção de turbidez também foi acompanhado pelas menores remoções de microesferas nesse período em todas as condições experimentais avaliadas, com exceção do ensaio 6 referente à condição de subdosagem de quitosana. Contrário ao esperado, para esse período inicial, a remoção de microesferas foi maior do que no período regular de operação, o que pode estar relacionado a erros na contagem das microesferas, sendo necessários ensaios adicionais para confirmar tais resultados.

Pode ser observado que nos ensaios conduzidos com dose ótima de quitosana, exceto no ensaio 1, a turbidez da água filtrada, no período regular de operação, manteve valores abaixo de 0.5 uT, preconizado pela legislação brasileira para água produzida em unidades de filtração rápida. Uma possível explicação para o maior valor de turbidez observado no ensaio 1 podem estar atreladas às variações da vazão fornecida pela bomba de alimentação da água de estudo que causaram oscilações do valor do pH de coagulação ótimo ao longo da carreira de filtração, comprometendo o desempenho do filtro.

No intervalo de alimentação de água com microesferas a turbidez média residual apresentou valores de até 0.3 uT nos ensaios 1, 2 e 4, conduzidos com dose ótima de quitosana. Esse valor de turbidez para a água filtrada é recomendado pela Portaria MS 2914/2011 quando água do manancial de abastecimento no ponto de captação apresenta concentração de oocistos com média aritmética a partir de 3 ooc/L. Deve ser ressaltado, que nessas condições, o menor valor de turbidez residual não coincide com a maior remoção de microesferas.

Observa-se ainda que no ensaio 3, embora realizado em condição ótima de coagulação, a turbidez residual no intervalo de alimentação de microesferas foi levemente superior a 0.3 uT. Contudo, a remoção de microesferas no referido intervalo foi comparável com a observada no ensaio 4.

Esses resultados reforçam a necessidade de obter valores turbidez da água filtrada de 0.3 uT ou menores para ter maior garantia de elevadas remoções de partículas similares aos oocistos.

Em estudo relacionado, utilizando a mesma instalação piloto, no tratamento de água do Lago Paranoá com 30 uT induzida com caulinita, usando sulfato de alumínio como coagulante, Nascimento (2009) obteve valores de turbidez no efluente do filtro ascendente similares aos encontrados neste trabalho no período de operação regular, ao utilizar dose ótima de sulfato de alumínio entre 12 e 18 mg/L. As doses ótimas de quitosana empregadas no presente estudo representam entre 5.6 e 8.3 % das doses de sulfato de alumínio necessárias para atingir o mesmo nível de remoção de turbidez encontrado no estudo de Nascimento (2009).

Em relação aos ensaios efetuados em condições não ótimas de coagulação verifica-se que no ensaio 5 a dose 20% superior à ótima pode ter levado à ré estabilização da carga das partículas, resultando em aumento da turbidez residual e consequente diminuição da eficiência de remoção de microesferas de 0.65 log comparado com as remoções obtidas nas condições ótimas de coagulação.

No ensaio 6, realizado com dose de quitosana 50% menor do que a ótima, a turbidez foi removida efetivamente pelo filtro durante o período regular de operação incluindo o intervalo de alimentação das microesferas. Entretanto, a remoção de partículas com dimensões similares aos oocistos de *Cryptosporidium* foi reduzida em 0.98 log em relação aos ensaios desenvolvidos com dose ótima de quitosana.

Em trabalho desenvolvido por Brown & Emelko (2009) para avaliar a remoção de microesferas (10^7 unidades/L) e oocistos de *Cryptosporidium* (10^7 unidades/L) por meio de filtração descendente no tratamento de água da torneira com turbidez induzida com caulinita (2.5 - 5 uT) foram utilizados diferentes coagulantes, entre eles a quitosana. Em condições de coagulação ótima (dose= 3 mg/L; pH= 7.3) foram observadas remoções similares de oocistos de *Cryptosporidium* e microesferas (4.2 e 4.1 log), comparáveis com a remoção obtida (4.6 log) nos ensaios de filtração realizados em condição ótima de coagulação do presente estudo (dose = 0.9 - 1 mg/L; pH= 6). Quando os autores avaliaram uma dose 50% menor que a ótima (1.5 mg/L), houve afetação da remoção

de microesferas (2 log) e oocistos (1.7 log). A remoção de microesferas foi menor do que a remoção observada nessa pesquisa (3.6 log) no período regular da carreira de filtração com o uso de uma dose 50% menor que a ótima. Essa maior remoção de microesferas encontrada no presente estudo pode ter sido promovida pela maior turbidez da água de estudo resultando em maior retenção das partículas de tamanho similar aos oocistos no filtro.

Por se tratar de um polímero de natureza orgânica, avaliou-se se nas condições de coagulação

testadas nos ensaios de filtração contribuía para o aumento da absorvância da água. Na Tabela 2, são apresentados os valores de absorvância ($UV_{254\text{ nm}}$) obtidos para a água de estudo (AE) e para água filtrada no período de amadurecimento (AFA) e no período regular de operação (AFR).

Pode ser constatado que em todas as condições de coagulação testadas nos ensaios de filtração o uso de quitosana promoveu redução dos valores de absorvância ($UV_{254\text{ nm}}$) na água filtrada tanto no período inicial como na operação regular do filtro.

Tabela 2. Valores de Absorvância (254 nm) da água de estudo nos experimentos de filtração.

Ensaio	Absorvância AE	Absorvância água filtrada		% Remoção de Absorvância	
		AFA	AFR	AFA	AFR
1	3.60	1.90	1.70	47.22	52.78
2	3.71	3.00	2.12	19.21	42.83
3	3.47	2.00	1.90	42.31	45.19
4	3.90	1.50	1.10	61.54	71.79
5	3.27	1.90	2.30	41.96	29.74
6	4.40	1.70	1.78	61.36	59.66

Com base no estudo de García & Moreno (2012), a faixa de valores de absorvância obtidas para a água filtrada nos períodos de amadurecimento e de operação regular correspondem a uma concentração de trihalometanos de aproximadamente 0.016 mg/L. Esse valor não excede de 0.1 mg/L preconizado pela Portaria MS 2914/2011 para água destinada a consumo humano.

Conclusões

O diagrama de coagulação revelou que a quitosana é efetiva na remoção de turbidez de água com turbidez moderada induzida com caulinita. As doses entre 1 mg/L e 1.5 mg/L e valores de pH entre 5 e 6.4, forneceram as máximas remoções com valores de turbidez da água filtrada que atendem ao padrão de

potabilidade brasileiro. Entretanto, a quitosana não se mostrou eficiente na remoção de absorvância. A região que proporcionou a maior remoção deste parâmetro (70%) não coincidiu com a região de máxima remoção de turbidez. Nessas condições a remoção de absorvância foi de 30%.

A maioria dos ensaios de filtração em escala piloto, conduzidos com dose ótima de quitosana (0.9 a 1 mg/L) apresentaram resultados satisfatórios, com valores de turbidez residual que atenderam ao padrão de potabilidade tanto em ausência de oocistos de *Cryptosporidium* na água bruta como para situações em que o manancial apresenta concentrações desse protozoário a partir de 3 ooc/L. Nessas condições foram obtidas remoções de microesferas de 4.4 a 4.9 log e remoção média de absorvância de 50%.

Em geral, foi constatado que na condição de dose ótima, valores de turbidez da água filtrada de 0.3 uT ou menores não se correspondem com as maiores remoções de microesferas indicando que esses valores de turbidez não são garantia de remoção efetiva de partículas com dimensões similares aos oocistos de *Cryptosporidium*.

É importante promover remoções de turbidez bem elevadas para garantir eficiência na remoção de partículas similares aos oocistos.

Na condição de superdosagem foi comprometido o desempenho do filtro com turbidez residual de 0.45 uT que não atendeu o padrão de potabilidade, acompanhada da redução de remoção de microesferas em 0.65 log quando comparada com as condições ótimas de coagulação. Por outra parte, o uso de uma dose 50 % menor que ótima embora tenha resultado em bom desempenho do filtro em termos de turbidez com valor que atendeu ao atingido o padrão de potabilidade, a remoção de partículas com tamanho similar aos oocistos foi afetada conforme indicado pela menor remoção de microesferas em relação aos ensaios efetuados com dose ótima de quitosana.

Agradecimentos. – Às pessoas que colaboraram no desenvolvimento desta pesquisa e à CAPES pela bolsa de estudos concedida.

Literatura citada

1. Ministério da Saúde, Portaria Nº 2914 (2011). Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF.
2. Brown, T. J. & Emelko, M. B. (2009). Chitosan and metal salt coagulant impacts on *Cryptosporidium* and microsphere removal by filtration. *Water Research*, 43, 331-338.
3. Capelete, B. C. & Brandão, C. CS. (2013). Evaluation of trihalomethane formation in treatment of water containing *Microcystis aeruginosa* using chitosan as coagulant, *Water Science & Technology: Water Supply*, 13(4), 1167-1173.
4. Cerqueira, D.A. (2008). Remoção de oocistos de *Cryptosporidium parvum* e de indicadores no tratamento de água por Ciclo Completo, Filtração Direta Descendente e Dupla Filtração, em escala piloto. Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
5. Di Bernardo, A. S. (2004). Desempenho de sistemas de dupla filtração no tratamento de água com turbidez elevada. Doutorado em Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
6. Di Bernardo, L., Mendes, C.G.N., Brandão, C.C.S., Sens, M.L. & Pádua, V.L. (2003). Tratamento de água para abastecimento por filtração direta. Rio de Janeiro, Brasil: ABES.
7. Fonseca, B., Ferraz, G., Ginoris, Y., Nascimento, M. & Brandão, C. CS. (2014). Avaliação do desempenho da quitosana como coagulante no tratamento de água por filtração direta ascendente. En K. Bella, *XII Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental realizado em Natal, Brasil*.
8. García, I. & L. Moreno (2012). Removal of nitrogen and carbon organic matter by chitosan and aluminium sulphate. *Water Science and Technology: Water Supply*, 12(1), 1606-9749.
9. Nascimento, M.F (2009). Remoção de oocistos de *Cryptosporidium* por meio da Filtração Direta Ascendente em areia: avaliação em escala piloto. (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
10. Vasyukova, E., Terrichova, M., Azevedo, J., Brandão, C.C.S. & Uhl, W. (2010). Influence of Chitosan Coagulation on Disinfection by Products Formation Potential. In IWA – International Water Association, IWA World Water Congress conducted in Montreal, Canada.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses

Recibido: 17 de febrero de 2016

Aceptado: 06 de abril de 2016