

REVISTA AIDIS

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

TRATAMIENTO DE ÁGUA DE LAVAGEM DE CANA DE AÇÚCAR POR COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO

*Cristina Filomêna Pereira Rosa Paschoalato¹
Nilton Martins Rodrigues Júnior¹
Bruno Moreira da Silva¹
Lorraine Bernardes Borges¹
Thais de Paula Silveira Mello¹
Carmen Sílvia Gonçalves Lopes¹

TREATMENT OF WATER WASHING OF SUGAR CANE BY
COAGULATION, FLOCCULATION AND SEDIMENTATION

Recibido el 1 de marzo de 2011; Aceptado el 28 de septiembre de 2011

Abstract

The manufacturing of sugar and alcohol consume and generate significant volumes of wastewater, being the largest share to the washing of sugar cane, which aims to withdraw earthenware and straw that accumulate along the cane during the harvest. The water wash of sugar cane (WWSC) is usually recirculated and over time loses quality, requiring large volumes of replacement. Currently, the treatments applied to the WWSC to recycle is the correction of pH and natural sedimentation, without the aid of chemical coagulants, which has low efficiency and high retention time, thus the process of chemically assisted primary sedimentation (CAPS) can be an alternative for the treatment of the WWSC in recycle. The aim of this study was to promote improvement in the quality of the WWSC in a production unit of sugar and alcohol. A sample of WWSC was collected at the plant and transported to the laboratory where tests were performed in static reactors (jar-test) with commercial coagulants, ferric chloride and ferrous sulfate chloride (floculan) for the optimization of the stages of coagulation, flocculation and sedimentation. During the period of the survey was carried out monitoring of WWSC in operation of the plant with the objective of characterization and evaluation of the efficiency of the system in full scale operation. A mass balance was used to estimate the amount of generated sludge. The results of treatment of WWSC showed that the coagulant floculan was presented the best efficiency in removing turbidity and total suspended solids with 99% and 97% respectively. The suppression of the flocculation step did not change in removal efficiency of turbidity and suspended solids. Not using flocculation resulted in increased turbidity values. The economic study for different alternatives of treatment application showed the application feasibility of coagulant intermittently. Considering the system in full scale operation, it could be predicted a reduction in costs with the use of coagulant and sludge production rates due to the effect of the gradual increase in the quality of the WWSC.

Key Words: primary sedimentation; recycle; sugar cane; water washing of cane.

¹ Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP)

*Corresponding author: Rua Argeu Fuliotto 419 Ribeirânia Ribeirão Preto -SPCEP: 14096-520, Brasil. Email: cpaschoa@unaerp.br

Resumo

Os processos de fabricação de açúcar e álcool consomem e geram consideráveis volumes de águas residuárias, sendo a maior parcela para a etapa de lavagem da cana de açúcar, que objetiva a retirada de terras e palhas que se acumulam junto à cana durante a colheita. A água de lavagem de cana (ALC) usualmente é recirculada e com o passar do tempo perde qualidade, necessitando de grandes volumes de reposição. Atualmente, os tratamentos aplicados à ALC para reciclo são a correção de pH e a sedimentação natural, que sem o auxílio de coagulantes químicos, apresenta baixa eficiência e elevado tempo de detenção, desta forma o processo de sedimentação primária quimicamente assistida (SPQA) pode ser uma alternativa para o tratamento da ALC em reciclo. O objetivo deste estudo foi promover melhoria na qualidade da ALC de uma unidade de produção de açúcar e álcool. Uma amostra da ALC foi coletada na unidade industrial e transportada ao laboratório onde foram realizados ensaios em reatores estáticos (*jar-test*) com os coagulantes comerciais, cloreto férrico e sulfato ferroso clorado (floculan), para a otimização das etapas de coagulação, floculação e sedimentação. Durante o período da pesquisa foi realizado um monitoramento da ALC da unidade industrial em operação com o objetivo de caracterização e avaliação da eficiência do sistema em escala real. Um balanço de massa foi empregado para estimar a quantidade de lodo gerado. Nos resultados de tratamento da ALC, o floculan foi o coagulante que apresentou melhor eficiência na remoção de turbidez e sólidos suspensos totais com 99% e 97% respectivamente. A supressão da etapa de floculação não apresentou alteração na eficiência de remoção de turbidez e sólidos suspensos. A não utilização de floculação resultou em aumento nos valores de turbidez. O estudo econômico para diferentes alternativas de aplicação do tratamento apresentou viabilidade na aplicação de coagulante de forma intermitente. Considerando o sistema em operação de escala real pode ser previsto uma diminuição dos custos com o uso de coagulante e das taxas de produção de lodo devido ao efeito do aumento gradativo da qualidade da ALC.

Palavras Chaves: água de lavagem de cana; cana de açúcar; reciclo; sedimentação primária.

Introdução

O Brasil possui aproximadamente 400 indústrias de fabricação de açúcar e álcool, que podem impactar consideravelmente os recursos hídricos. Estes processos consomem quantidades significativas de água e geram consideráveis volumes de águas residuárias. A lavagem da cana de açúcar é a etapa de maior demanda em todo o processo. A taxa de aplicação de água para lavagem de cana (ALC) pode variar de $6,3 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ a $10,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, correspondendo em aproximadamente 25% do volume total de água utilizado no processo (BRAILE *et al.*, 1981). Portanto a operação de reciclo da água de lavagem de cana tem sido amplamente empregada visando à redução no consumo.

A etapa de lavagem de cana objetiva a retirada de terras e palhas, que se acumulam durante a colheita, dificultando o processo de moagem e sobrecarregando os sistemas de limpeza de caldo extraído além de produzir desgastes adicionais de origem mecânica na moenda, com redução de até 1% na eficiência.

Os processos de tratamento utilizados para as ALC dependem do tipo de sistema empregado. Nos sistemas abertos o reciclo das águas não é utilizado, o tratamento empregado é biológico por lagoas anaeróbias e facultativas, visando o descarte nos corpos d'água. No caso de sistemas

fechados ou semi-fechados, amplamente utilizados no Brasil, quando se faz o reciclo das águas, é empregado o tratamento primário, com caixa para remoção de areia seguido de lagoas de sedimentação ou sedimentadores convencionais para retirada dos sólidos e posteriormente a água retorna para à lavagem da cana de açúcar. A sedimentação natural, sem o auxílio de coagulantes químicos, apresenta baixa eficiência e conduz a elevado tempo de detenção hidráulico. Os tratamentos atualmente aplicados à ALC para reciclo são a sedimentação natural e a correção de pH com cal.

O processo denominado de Sedimentação Primária Quimicamente Assistida (SPQA) envolve o uso de coagulantes químicos para incrementar a coagulação e floculação das partículas a serem removidas nos efluentes. Quando comparado ao processo de sedimentação natural, pode remover duas vezes mais no tratamento primário, com redução do tamanho e do custo de um tratamento secundário quando necessário. O SPQA possibilita uma remoção de matéria orgânica altamente eficiente, sendo também uma alternativa economicamente viável a um processo de tratamento biológico (Environment Protection Department, 1995; Poon e Chu, 1999; Nenov, 1995; Odegaard, 1995; Nacheva *et al.*, 1996).

O processo de sedimentação primária quimicamente assistida, já apresentou bons resultados no tratamento de esgotos e pode ser uma alternativa viável para promover a melhoria da qualidade da ALC. Após a dosagem dos coagulantes, estes ficam incorporados ao lodo, que finalmente é disposto na lavoura, torna-se necessário que os elementos que o formam não produzam contaminação no solo. Dessa forma, neste trabalho ficou descartada a utilização de sais de alumínio, optando-se pelos sais de ferro.

O objetivo da pesquisa foi estudar uma proposta de tratamento para água de lavagem de cana utilizando-se o processo denominado SPQA com coagulação e floculação, para tal foi necessário o desenvolvimento dos seguintes objetivos específicos: efetuar um monitoramento para caracterização da água de lavagem de cana submetida ao tratamento de sedimentação natural; estudar a aplicação de coagulantes para clarificação da água de lavagem de cana; avaliar a eficiência de remoção de turbidez e sólidos suspensos totais; avaliar a variação no volume de lodo produzido pelo tratamento e avaliar de custos.

Materiais e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida em parceria com uma unidade industrial de fabricação de açúcar e álcool, da região de Santa Rita do Passa Quatro, SP, Brasil, que utiliza em média 43.200 m³/d de água na etapa de lavagem de cana, em sistema de reciclo. O processo de lavagem é realizado em mesas pelo sistema de cachoeira, a água efluente é recolhida por ação da gravidade e enviada a uma lagoa de sedimentação onde ocorre a remoção dos sólidos suspensos, a água

decantada retorna por bombeamento para as mesas de lavagem. Periodicamente efetua-se uma reposição para suprir perdas por evaporação ou por vazamentos.

Para conhecimento da variação da qualidade da água de lavagem de cana (ALC) e da eficiência do sistema em operação, foi realizado um monitoramento dos seguintes parâmetros: pH; resíduos sedimentáveis (RS); sólidos totais (ST); sólidos suspensos totais (SST); sólidos dissolvidos totais (SDT); demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio ($DBO_{5 \text{ dias}}$) a 20°C (APHA, *et al.*, 2005).

Os ensaios de tratabilidade da ALC foram realizados em reatores estáticos do tipo *jar-test* (Di Bernardo, 2005), um volume de 1500 litros de ALC foram coletados e transportados para o Laboratório. Os coagulantes utilizados foram cloreto férrico e floculan, a seleção do melhor coagulante foi baseada no desempenho de ensaios considerando duas velocidades de sedimentação, sendo: 1,4 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ e 0,7 $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$. Com os resultados obtidos elaborou-se diagramas para diferentes dosagens de coagulante em função do pH e da turbidez remanescente, possibilitando a determinação de regiões com maior remoção de turbidez.

Após seleção do coagulante, foram realizados os ensaios para otimização da etapa de mistura rápida, considerando a variação do tempo de mistura rápida (T_{mr}) e do gradiente de mistura rápida (G_{mr}) e a otimização da etapa de floculação considerando a variação do tempo de mistura lenta (T_{ml}) e do gradiente de mistura lenta (G_{ml}). A avaliação da massa de sólidos removida no tratamento foi calculada através de balanço de massa considerando o teor de sólidos suspensos totais da água bruta imediatamente após a adição do coagulante e da água tratada. Um ensaio em *jar-test* suprimindo a etapa de floculação foi realizado para verificação da necessidade da etapa de floculação no tratamento proposto.

Um balanço de massas foi proposto para o cálculo da vazão de coagulante e da taxa de acúmulo de lodo na lagoa de sedimentação. A Figura 1 ilustra o sistema dividido em duas partes, sendo: Sistema I contemplando alimentação de ALC, entrada de coagulante e saída de ALC coagulada para alimentação da lagoa de sedimentação; o Sistema II contemplado a alimentação de ALC coagulada, acúmulo de lodo e saída de ALC tratada. O volume de reposição de água não foi considerado no balanço, devido ao fato de que sua realização é descontínua, sem influência na dinâmica do processo.

A vazão de ALC bruta (Q_{AB}) foi determinada experimentalmente por medição da área da seção transversal submersa do canal e da média da medição de velocidade de escoamento do fluido (ALC). Foi escolhido um trecho do canal que transporta a ALC com dimensões homogêneas.

A fração mássica de sólidos (X_{1s}) foi determinada pela caracterização da ALC bruta. O parâmetro utilizado para quantificação da concentração de sólidos foi os suspensos totais (SST) e as frações

mássicas de coagulante (X_{1c} e X_{2c}) foram determinadas nos ensaios em *jar-test*, possibilitando o cálculo da vazão de coagulante (Q_{AC}) através da aplicação de equações de balanço de massa no sistema I.

Através do balanço de massas do Sistema II, foi calculada a taxa de acúmulo de lodo (Q_L), as frações mássicas de sólidos (X_{sl} e X_{4s}) foram determinadas pelo ensaio de massa seca. As perdas de ALC por vazamentos nas tubulações foram desprezadas. Portanto, a vazão de saída (Q_E) foi considerada igual à vazão de água bruta (Q_{AB}).

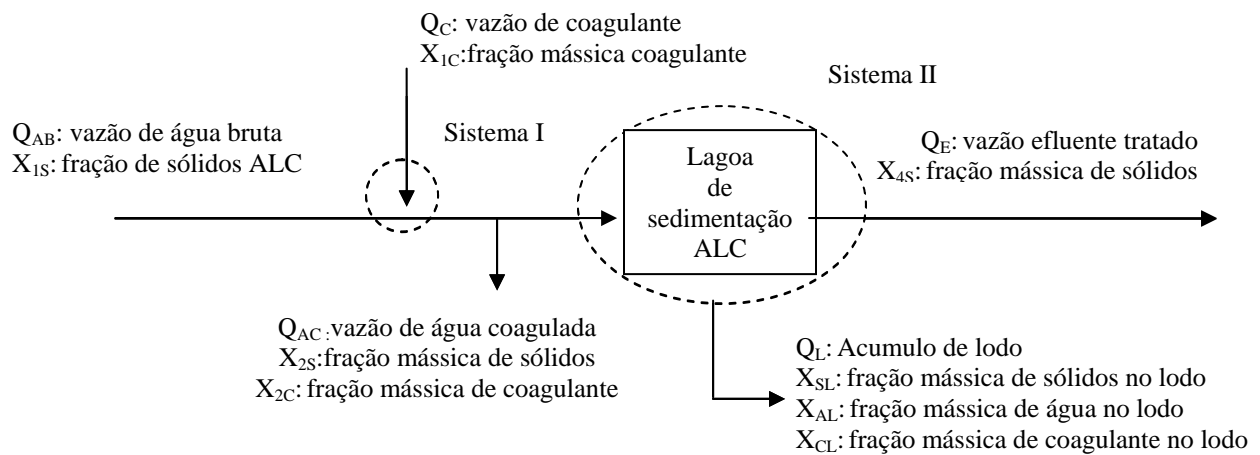


Figura 1. Fluxograma do sistema de tratamento da ALC para cálculo do balanço de massa dividido em sistemas I e II

Foi elaborada uma análise econômica para quantificação do custo de implantação e operação do tratamento proposto, considerando-se diferentes cenários, em contrapartida a esses custos, podem ser destacados os seguintes benefícios:

- Redução do volume de infecções no processo produtivo de fermentação alcoólica, devido à melhoria da qualidade da ALC;
- Redução de gastos com antibióticos usados para combater as infecções no processo;
- Redução do volume de água em recirculação, devido à diminuição do tempo de detenção hidráulica;
- Redução do volume de captação em corpo d'água para uso na lavagem de cana;
- Redução do custo do tratamento da ALC para descarte em corpos d'água.

Os custos de implantação do sistema compreendem: aquisição e instalação de equipamentos; projeto e construção civil e operação.

Para avaliação do custo de aquisição e instalação dos equipamentos foi realizada uma pesquisa junto aos fabricantes, tendo sido considerado a necessidade de aquisição dos seguintes equipamentos: medidor de vazão hidráulico do tipo calha Parshall; bomba para dosagem de coagulante e tanque para armazenamento do coagulante.

Os custos de construção civil foram referentes à construção do floculador hidráulico de escoamento horizontal com chicanas, considerou-se um custo aproximado de R\$100,00 por metro quadrado de construção e foi calculado com base na área do floculador. O custo do projeto de construção civil foi considerado 10% do custo de construção.

Os custos de operação foram baseados no consumo de coagulante no processo de tratamento de ALC determinado pelos ensaios de laboratório e do custo da retirada do lodo por dragagem e disposição final na lavoura.

No estudo da viabilidade econômica, foram considerados três cenários hipotéticos, sendo:

- Cenário I com aplicação de coagulante de forma contínua e considerando o volume de ALC igual ao volume da lagoa de sedimentação;
- Cenário II com aplicação de coagulante de forma intermitente (frequência semanal) e considerando o volume de ALC igual ao volume da lagoa de sedimentação;
- Cenário III com aplicação de coagulante de forma intermitente (frequência semanal) e o volume de ALC mínimo, calculado a partir da velocidade de sedimentação adotada e da vazão de ALC.

No cálculo do custo com coagulante foi considerado a vazão de coagulante pela dosagem escolhida e de ALC. O consumo mensal de coagulante varia em função do sistema de tratamento adotado, que pode ser contínuo ou intermitente. Os custos com o uso de coagulante foram calculados considerando-se os cenários I, II e III pelas Equações 1, 2 e 3 respectivamente.

$$C_M = Q_C \cdot T_{OP} \cdot P_C \quad \text{Equação (1)}$$

$$C_M = Q_C \cdot T_{DH} \cdot P_C \cdot 4 \quad \text{Equação (2)}$$

$$C_M = Q_C \cdot T_{DHmin} \cdot P_C \cdot 4 \quad \text{Equação (3)}$$

Sendo: C_M o Custo mensal de coagulante (R\$); Q_C a vazão de coagulante (L/h); T_{OP} o número de horas de trabalho (h/m); P_C o preço do coagulante líquido comercial (R\$/L); T_{DH} o tempo de detenção hidráulico (h).

O tempo de detenção hidráulico foi determinado em função da vazão de ALC e das dimensões da lagoa de sedimentação, através das Equações 4 e 5.

$$T_{DH} = V_{ALC} / Q_{ALC} \quad \text{Equação (4)}$$

$$V_{ALC} = C \cdot L \cdot H \quad \text{Equação (5)}$$

Sendo: V_{ALC} o volume de água de lavagem de cana (m^3); Q_{ALC} a vazão de ALC (m^3/h); C o comprimento da lagoa de sedimentação (m); L a largura da lagoa de sedimentação (m); H a profundidade da lagoa de sedimentação (m).

A determinação do custo de retirada de lodo para disposição final na lavoura foi realizada através de um estudo comparativo entre as taxas mensais de produção de lodo para os Cenários I, II e III em função da dosagem de coagulante. O custo de retirada de lodo está relacionado diretamente à taxa de acúmulo de lodo (Q_L), que foi determinada através do balanço de massa. A retirada do lodo é realizada por dragagem, o volume de lodo no fundo da lagoa de sedimentação depende da taxa de acúmulo de lodo e das dimensões da lagoa de sedimentação. A taxa mensal de acúmulo de lodo (Q_{LM}) foi utilizada na análise comparativa de custo e foi calculada para os cenários I, II e III conforme Equação 6.

$$M_L = Q_{LM} \cdot T_{DH} \quad \text{Equação (6)}$$

Sendo: M_L a Taxa mensal de acúmulo de lodo ($m^3/mês$); Q_{LM} a vazão média de lodo (m^3/h); T_{DH} o tempo de detenção hidráulica (h).

Resultados

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados obtidos no monitoramento da água de lavagem de cana durante o período de operação da unidade industrial, foram coletadas amostras na entrada (E) e saída (S) da lagoa de sedimentação. A água bruta apresentou uma turbidez média de 1100 uT. Os resultado de valores de pH permaneceram próximos e entre 5,7 e 7,0 e os resultados de resíduos sedimentáveis e das séries de sólidos indicam que a lagoa de sedimentação apresenta acúmulo de lodo e baixa eficiência.

A variação nos resultados é justificada pela ocorrência de chuvas, que acarreta no acúmulo de terra junto às canas na lavoura, como também pelo arraste de terra através do escoamento superficial para a lagoa de sedimentação.

Em relação aos resultados de matéria orgânica, avaliada por parâmetros indiretos, observou-se uma remoção que variou de 8 a 75% para DQO e 25 a 80% para DBO₅ dias. Porém é evidente

que a ALC em reciclo e submetida a um tratamento de sedimentação natural tem qualidade prejudicada em função do tempo, levando a necessidade de reposição.

Tabela 1. Resultados do monitoramento da qualidade da ALC afluyente e efluente a lagoa de sedimentação.

| Data 2009 | pH | | RS (mL.L ⁻¹ .h ⁻¹) | | DQO (mg O ₂ .L ⁻¹) | | DBO5 dias (mg O ₂ .L ⁻¹) | | ST (mg.L ⁻¹) | | SST (mg.L ⁻¹) | | SDT (mg.L ⁻¹) | |
|--------------|------|------|--|----|--|------|--|-----|-----------------------------|------|------------------------------|------|------------------------------|------|
| | - | | | | | | | | | | | | | |
| | E | S | E | S | E | S | E | S | E | S | E | S | E | S |
| 16/09 | 5,75 | 6,65 | 60 | 28 | 2728 | 664 | 1228 | 231 | 29869 | 6445 | 5980 | 190 | 26979 | 465 |
| 01/10 | 6,81 | 6,64 | 40 | 31 | 2183 | 823 | 812 | 242 | 7250 | 4900 | 4612 | 4170 | 2638 | 730 |
| 13/10 | 6,70 | 6,69 | 40 | 35 | 3500 | 3200 | 400 | 300 | 6148 | 4859 | 3083 | 2769 | 3065 | 2090 |

Nota. E: entrada da lagoa de sedimentação; S: saída da lagoa de sedimentação

A ALC foi submetida a ensaios de *jar-test* simulando um tratamento alternativo de sedimentação primaria quimicamente assistida (SPQA) com uso de coagulação e floculação. Dos resultados obtidos foram elaborados os diagramas para avaliar remoção de turbidez possibilitando a escolha da melhor dosagem e do coagulante mais eficiente. Nas Figuras 2 e 3 estão apresentados os resultados plotados em um diagramas (tipo bolhas) de coagulação para diferentes dosagens de cloreto férrico e floculan respectivamente, em função da turbidez remanescente e do pH na velocidade de sedimentação de 0,7 cm.s⁻¹, com destaque para os três pontos selecionados.

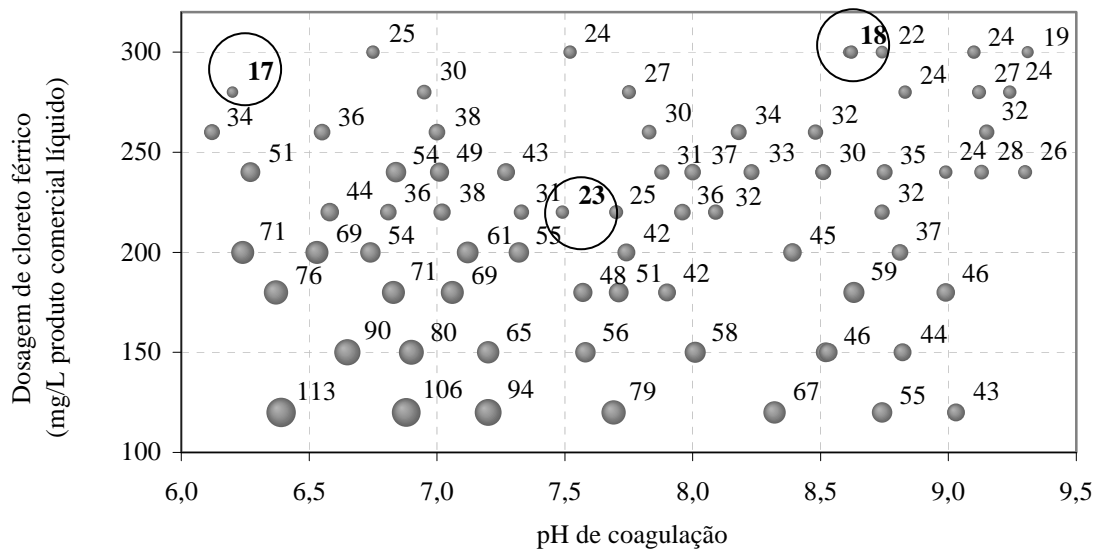


Figura 2. Diagrama de coagulação para diferentes dosagens de cloreto férrico em função do pH e da turbidez remanescente (uT) na velocidade de sedimentação de 0,7 cm.s⁻¹

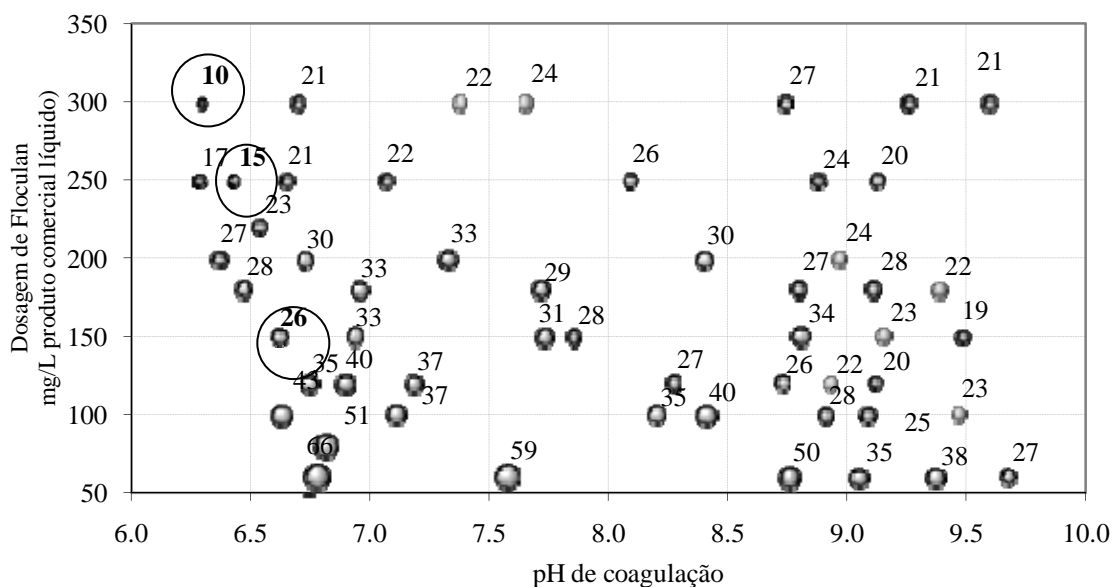


Figura 3. Diagrama de coagulação para diferentes dosagens de floculan em função do pH e da turbidez remanescente (uT) na velocidade de sedimentação de $0,7 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$

Os coagulantes estudados apresentaram resultados de turbidez remanescente menores que 40 uT, porém optou-se pelo floculan por dispensar o uso de alcalinizante (NaOH), considerando o critério de maior remoção de turbidez a melhor dosagem foi 300 mg/L, a Tabela 2 apresenta as três dosagens selecionadas no diagrama em função da turbidez remanescente para cada coagulante que foram utilizadas nos ensaios de otimização de mistura rápida e mistura lenta.

Tabela 2. Resultados de turbidez remanescente dos ensaios de reprodução dos melhores pontos dos diagramas com Floculan e cloreto férrico usado como coagulantes

| Coagulante | Dosagem Coagulante (mg/L) | Dosagem NaOH (mg/L) | pH | Turbidez remanescente (uT) | |
|-----------------|---------------------------|---------------------|-------------|----------------------------|---------------|
| | | | | Vs1 (1,4cm/s) | Vs2 (0,7cm/s) |
| Cloreto Férrico | 280 | 0 | 6,36 | 13 | 17 |
| | 300 | 200 | 8,87 | 22 | 18 |
| | 220 | 120 | 8,27 | 33 | 23 |
| Floculan | 300 | 0 | 6,29 | 21 | 10 |
| | 250 | 0 | 6,42 | 27 | 15 |
| | 150 | 0 | 6,61 | 40 | 26 |

Nos ensaios para otimização da etapa de mistura rápida, fixou-se o tempo de mistura lenta (Tml) em 15s e gradiente de mistura lenta (Gml) em 80 rpm, observou-se que a remoção de turbidez foi proporcional ao aumento do gradiente e inversamente proporcional ao tempo, a mistura rápida foi otimizada com Tmr 10s e Gmr 500 rpm. Os resultados dos ensaios de otimização da etapa de mistura lenta apresentaram maior remoção de turbidez para um tempo (Tml) de 15 min e gradiente (Gml) de 60 rpm.

Foram realizados ensaios de coagulação com o floculan suprimindo a etapa de floculação e os resultados estão apresentados na Tabelas 3, observou-se que a turbidez remanescente menor que 40 uT foram obtidas para as dosagens de 250, 275 e 300 mg.L⁻¹.

Tabela 3. Resultados de remoção de cor aparente e turbidez obtidos nos ensaios em *jar-test* com variação da dosagem de Floculan, Tmr 10s e Gmr de 500rpm sem a etapa de floculação

| Dosagem de Coagulante Floculan (mg/L) | pH de coagulação | Vs1 (1,4 cm/min) | | Vs2 (0,7 cm/min) | |
|---|---------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| | | Turbidez (uT) | Cor aparente (uH) | Turbidez (uT) | Cor aparente (uH) |
| 100 | 7,08 | 66 | 652 | 60 | 592 |
| 150 | 6,96 | 50 | 513 | 42 | 499 |
| 200 | 6,88 | 41 | 395 | 34 | 410 |
| 250 | 6,8 | 36 | 370 | 27 | 356 |
| 275 | 6,78 | 30 | 314 | 25 | 298 |
| 300 | 6,76 | 29 | 307 | 23 | 293 |

Os ensaios de massa seca de lodo foram realizados em duplicata para as três dosagens escolhidas, sendo: 150, 200 e 300 mg/L. A remoção de sólidos suspensos totais (SST) foi a mesma para as velocidades Vs1 e Vs2 na dosagem de coagulante de 300 mg/L. Os resultados entre a menor dosagem (150 mg/L) e a maior dosagem (300 mg/L) de coagulante, tanto nas velocidades Vs1 e Vs2 a eficiência de remoção de SST variou apenas em 2%. Comparando-se a dosagem de coagulante em relação à quantidade de lodo gerado, houve um aumento de 24% para Vs1 e 26% para Vs2.

Considerando-se os valores obtidos de Q_S e uma concentração de sólidos no lodo de 30.000 mg.L⁻¹, calculou-se as taxas de acúmulo de lodo Q_L e as taxas de acúmulo de lodo médias Q_{LM}, os resultados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados de taxas de acúmulo de lodo na lagoa de sedimentação para dosagens de Flocculan

| Dosagem coag. Flocculan (mg/L) | Vazão coag. Q_c (m ³ /h) | Vazão água coagulada Q_{AC} (m ³ /h) | Conc.SST água coagulada C_{AC} (mg/L) | Conc. SST efluente C_E (mg/L) | Vazão mássica sólidos do lodo Q_s (kg/h) | Taxa de acúmulo lodo Q_L (m ³ /h) | Taxa acúmulo lodo média Q_{LM} (m ³ /h) |
|--------------------------------|---------------------------------------|---|---|---------------------------------|--|--|--|
| 150 | 0,577 | 3712,160 | 1517 | 55 | 5427 | 181 | 168 |
| | | | 1313 | 61 | 4648 | 155 | |
| 250 | 0,928 | 3712,528 | 1686 | 45 | 6092 | 203 | 207 |
| | | | 1750 | 42 | 6341 | 211 | |
| 300 | 1,114 | 3712,714 | 1859 | 41 | 6751 | 225 | 225 |
| | | | 1856 | 49 | 6709 | 224 | |

Os custos de implantação do sistema de tratamento considerando aquisição e instalação de equipamentos e projeto e construção civil estão mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Custos de aquisição e instalação de equipamentos

| Equipamento | Custo de aquisição (R\$ reais) | Custo de instalação (R\$ reais) |
|------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Calha Parshall | 7.500,00 | 3.000,00 |
| Tanque para coagulante | 2.000,00 | 200,00 |
| Bomba dosadora | 600,00 | 300,00 |
| Floculador Hidráulico | 3.090,00 | 30.900,00 |

Os custos são proporcionais à dosagem de coagulante escolhida. Os cenários I e II, que utilizam maior volume de água, são os que levam aos maiores custos. No cenário III, com o menor volume de ALC, deve ser considerado que essa opção ocasiona uma deterioração mais rápida da qualidade da água.

Na avaliação do custo com aplicação de coagulante, os resultados aqui apresentados não levaram em consideração o fato de que a qualidade a ALC sofrerá uma melhoria gradativa à medida que o tratamento proposto for aplicado, nos aspectos turbidez e SST, com um reajustamento constante da dosagem de coagulante. Pode-se obter uma redução da taxa de geração de lodo. Novamente, o efeito dessa melhoria será mais evidente no cenário I, onde o coagulante é continuamente aplicado.

Os resultados obtidos considerando-se o cenário I mostram que o volume de lodo produzido é superior ao próprio volume da lagoa de sedimentação, o que torna inviável a opção por esse

cenário. Devido aos valores de produção de lodo correspondentes aos cenários II e III, deverá ser implantado um sistema de retirada de lodo por bombeamento para evitar o rápido assoreamento da lagoa de sedimentação.

Os custos mostrados na Tabela 6 não levaram em consideração o fato de que a qualidade a ALC sofrerá uma melhoria gradativa à medida que o tratamento proposto for aplicado, nos aspectos turbidez e SST. A dosagem de coagulante deverá ser redimensionada em função dos valores de turbidez e SST atualizados, podendo resultar em uma redução do consumo de coagulante. O efeito dessa melhoria será mais evidente no Cenário I, onde o coagulante é continuamente aplicado.

Tabela 6. Resumo dos custos relativos ao consumo de coagulante Flocculan

| Dosagem de coagulante Flocculan (mg.L ⁻¹) | Custo mensal do coagulante (R\$/mês) | | |
|--|--------------------------------------|------------|-------------|
| | Cenário I | Cenário II | Cenário III |
| 150 | 246.639,00 | 44.302,00 | 4.577,00 |
| 250 | 410.918,00 | 73.810,00 | 7.625,00 |
| 300 | 493.279,00 | 88.604,00 | 9.153,00 |

Conclusões e Recomendações

Pelos resultados obtidos, conclui-se que no tratamento da água de lavagem de cana (ALC), simulado por sedimentação, coagulação e floculação, usando os coagulantes cloreto férrico e flocculan, o que apresentou melhor eficiente na remoção de turbidez e sólidos suspensos totais com 99% e 97% respectivamente foi o flocculan com dosagem otimizada de 300 mg.L⁻¹, desta forma os parâmetros para o projeto do sistema de tratamento da ALC foram determinados.

A supressão da etapa de floculação não alterou de forma expressiva a eficiência de remoção de turbidez e sólidos suspensos do tratamento. Entretanto, a não utilização de floculação pode levar a um aumento significativo do valor absoluto da turbidez, dependendo da dosagem e do tipo de coagulante empregado.

O estudo econômico realizado mostrou que existem diversas alternativas para aplicação do tratamento estudado, sendo que algumas são altamente antieconômicas. As alternativas viáveis são aquelas que fazem aplicação de coagulante de forma intermitente.

Os custos de operação reais somente poderão ser determinados quando o sistema estiver em funcionamento, mas pode ser prevista uma diminuição dos custos com coagulante e das taxas de produção de lodo devido ao efeito do aumento gradativo da qualidade da ALC em consequência do tratamento.

Recomenda-se a realização de estudos sobre o impacto da disposição do lodo, gerado pelo tratamento da água de lavagem de cana, nas lavouras a fim de se avaliar capacidade do solo e possíveis contaminações das águas subterrâneas.

Agradecimentos. Laboratório de Recursos Hídricos da Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP).

Referências bibliográficas

- APHA, AWWA, WPCF. (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21th edition, Washington, USA.
- Braile, P. M.; Cavalcanti, J.E.W.A. (1993) *Manual de Tratamento de Águas Residuárias Industriais*. CETESB São Paulo, SP.
- Di Bernardo, L.; Di Bernardo, A.; Centurione Filho, P. L. (2002). *Ensaio de Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água*. São Carlos, SP.
- Environmental Protection Department (1995) *Cleaning Up Our Harbor*. Government Printer. Hong Kong.
- Nacheva, P. M.; Bustillos, L. T., Camperos, E. R.; Armenta, S. L.; Vigueros, L. C. (1996). *Characterization and coagulation-flocculation treatability of México City wastewater applying ferric chloride and polymers*. *Water Science Technology*, **34**, 235-247.
- Nenov, V. (1995) *TSS/BOD Removal efficiency and cost comparison of chemical and biological wastewater treatment*. *Water Science Technology*, **32**, 207-214.
- Odegaard, H. (1995) *Norwegian experiences with chemical treatment of raw wastewater*. *Water Science Technology*, **25**, 255-264.
- Poon, C. S.; Chu, C. W. (1999) The use of ferric chloride and anionic polymer in the chemically assisted primary sedimentation process. *Chemosphere*, **39**(10), 1573-1582.