

REMOÇÃO DE ÍON CIANETO UTILIZANDO MACRÓFITA AQUÁTICA *Eichhornia crassipes* COMO ADSORVENTE

REMOVAL OF CYANIDE ION USING MACROPHYTE *Eichhornia crassipes* AS ADSORBENT

LIED, Eduardo Borges

email: eduardolied@utfpr.edu.br

Resumo

No presente estudo, a biomassa da macrófita aquática *Eichhornia crassipes* (aguapé) foi investigada como um adsorvente potencial para a remoção de cianeto livre em meio aquoso. Os efeitos de uma seleção dos parâmetros mais significativos (pH, a dosagem de adsorvente e tempo de contato) foram inicialmente avaliados com base no percentual de cianeto removido de uma solução de Cianeto de Sódio (NaCN). Os melhores resultados mostraram uma remoção de aproximadamente 38%, sob condições de pH 2,0, em concentração inicial de 30 mg L⁻¹ de cianeto, para uma dosagem de adsorvente de 1,5 g L⁻¹ após um tempo de contato de 60 min. A avaliação de equilíbrio demonstrou que o modelo de pseudo-primeira ordem é o que melhor ajustou os dados experimentais, atingindo uma capacidade de adsorção máxima de 1,7 mg g⁻¹. A constante da taxa de adsorção do modelo pseudo-primeira ordem (K1) foi de 1,23 x 10⁻¹ min⁻¹, para uma temperatura de 30°C. A análise do processo de biossorção de íons cianeto sobre o aguapé sugeriu que o mecanismo predominante seja a interação eletrostática. Assim, a biomassa obtida a partir do aguapé pode ser considerada como um adsorvente eficiente e de baixo custo para a remoção de diferentes águas residuárias contendo o íon cianeto.

Palavras-chave: Aguapé, Biossorção, Cianeto de Sódio.

Abstract

In the present study, we investigated the aquatic macrophyte *Eichhornia crassipes* (locally known as aguapé) as a potential adsorbent to remove free cyanide from aqueous medium. The influence of several of the most significant parameters (pH, adsorbent dosage, and time of contact) was initially assessed based on the percentage of cyanide removed from a solution of sodium cyanide (NaCN). The best results showed a removal of approximately 38%, under pH 2.0, at an initial concentration of 30 mg L⁻¹ of cyanide, for an adsorbent dosage of 1.5 g L⁻¹ after 60 min of contact. Balance assessment showed that the pseudo-first-order model was the one that best fitted the experimental data, reaching a maximum adsorption capacity of 1.7 mg g⁻¹. The constant of the adsorption rate of the pseudo-first-order model (K1) was 1.23 x 10⁻¹ min⁻¹, for a temperature of 30 °C. The analysis of the process of biosorption of ions in the ‘aguapé’ suggested that the predominant mechanism is electrostatic interaction. Hence, the biomass obtained from the ‘aguapé’ may be considered an efficient and low-cost adsorbent for the removal of different wastewaters containing cyanide ion

Keywords: Aguapé; Biosorption; Sodium Cyanide.

1 INTRODUÇÃO

O cianeto é definido como um componente orgânico (ligado a radicais orgânicos) ou inorgânico (ligado a radicais inorgânicos) que contém o grupo $-CN$. O cianeto livre (íon) é muito reativo, sendo sua ocorrência na natureza um aspecto raro. Os íons cianeto, em função da reatividade, são suscetíveis em formarem complexos com uma variedade de metais, especialmente aqueles de séries de transição, tais como Cu, Zn, Fe, Ag, Cd, entre outros (USEPA, 1980).

O cianeto é comumente encontrado como um contaminante em efluentes de diversas indústrias, incluindo as de limpeza de metais, metalização, galvanoplastia, usinagem de metais, fabricação de peças de automóveis, têmpera de aço, fotografia, mineração, farmacêutica, carvão de coque, lixiviação de minério, plásticos (DASH et al., 2009), bem como em indústrias de alimentos, especialmente as indústrias de processamento da mandioca (CEREDA et al., 2001; LIMONS, 2008; CHISTÉ et al., 2010; RIBAS et al., 2010;).

Em virtude dos potenciais perigos associados ao cianeto, o controle e tratamento de águas contaminadas por esta substância é altamente desejado. Frequentemente, águas contaminadas por cianeto são tratadas por processos de oxidação biológica. Estas técnicas somente são efetivas para cianeto livre e para aquelas em que as ligações com metais são fracas; contudo em altas concentrações de cianeto o tratamento sofre uma significativa

redução de eficiência. Cianeto que está fortemente ligado, ou complexado com metais não podem ser tratados com estes métodos (DASH et al., 2009). Técnicas de adsorção também são usadas para a remoção de cianeto. Sistemas de adsorção são simples de operar, não são afetados pela toxicidade do composto alvo e não necessitam de produtos químicos perigosos. Além disso, a adsorção facilita no sentido de concentrar e, em seguida, recuperar os compostos adsorvidos, se desejado (MOUSSAVI & KHOSRAVI, 2010). Nesse contexto, é desejável a investigação de materiais adsorventes alternativos, tendo em vista que os mais utilizados (carvão ativado, resina, etc) são considerados onerosos economicamente.

Chamada popularmente de aguapé, a macrófita *Eichhornia crassipes* é uma planta aquática flutuante, que se espalhou por todo o mundo devido às atividades antrópicas. Essa espécie constitui-se em um invasor bem sucedido de ecossistemas de água doce e ambientes eutróficos, tendo como característica peculiar o rápido crescimento vegetativo e sua respectiva multiplicação, além da larga amplitude ecológica e grande variação fenotípica. O crescimento dos aguapés tem contribuído para a deterioração da utilização dos mananciais de água. No entanto, cientistas e engenheiros transformaram este incômodo em benefício do combate à poluição das águas, como remoção de nutrientes e poluentes inorgânicos de águas residuárias (SO et al., 2008).

O aguapé, assim como outras plantas

aquáticas similares, é conhecido por sua habilidade de acumulação de poluentes, que pode ocorrer por interações físico-químicas ou por mecanismos dependentes do metabolismo (COSTA et al., 2000).

As interações físico-químicas são desempenhadas pelos mecanismos de biossorção. De acordo com a literatura recente, os estudos dos potenciais de adsorção da *Eichhornia crassipes* têm recebido um enfoque especial com relação à remoção de metais pesados (SCHNEIDER et al., 1995; MOHANTY et al., 2006; HASAN et al., 2007; VERMA et al., 2008; ZHENG et al., 2009; ESPINOZA-QUIÑONES et al., 2009; SARASWAT & RAI, 2010; ESPINOZA-QUIÑONES et al., 2010; MAHAMADI & NHARINGO, 2010). A aplicação dessa planta na remoção de corantes de efluentes têxteis também tem sido objeto de pesquisas (LOW et al., 1995; EL-ZAWAHRY & KAMEL, 2004; EL-KHAIARY, 2007). O emprego de biossorvente a base de aguapé para remoção de nutrientes dos efluentes também se mostrou viável (CHEN et al., 2010).

Com relação à aplicação de biossorventes a partir de plantas aquáticas para a remoção de íon cianeto a única referência encontrada foi aquela em que Abreu et al. (2005) investigam o potencial de utilização da macrófita aquática *Eichhornia crassipes* na adsorção do íon cianeto de uma solução de cianeto de potássio (KCN). Os resultados indicaram que a macrófita utilizada apresentou significativa capacidade de remoção por meio de processos de adsorção. Os demais trabalhos encontrados que possuem condições similares às pesquisas de Abreu

et al. (2005) utilizam principalmente o carvão ativado.

Behnamfard & Salarirad (2009) estudaram o processo de adsorção do cianeto livre (CN⁻) em solução aquosa por carvão ativado. Moussavi & Talebi (2011) compararam o potencial da casca de pistache em pó com o de carvão ativado em pó (CAP) para a co-adsorção de Cr(VI) e cianeto de águas residuárias de galvanoplastia. Moussavi & Khosravi (2010) estudaram a aplicação de resíduos de casca de pistache verde como um adsorvente potencial para a remoção de cianeto presente em água residuária sintética. Processos de remoção de cianeto por adsorção em carvão ativado, casca de noz e casca de arroz foram também examinados por Yazici et al. (2009). As pesquisas que apontam para uso de adsorventes alternativos ao carvão ativado são merecedoras de incentivo tendo em vista o potencial de uso de novos adsorventes, os quais se apresentam sejam menos onerosos financeiramente, porém com similar capacidade de remoção de poluentes.

2 METODOLOGIA

2.1 Reagentes e soluções

As soluções de cianeto (adsorbato) utilizadas foram preparadas a partir da dissolução do cianeto de sódio (NaCN) em água destilada. O ajustamento do pH foi realizado pela adição de NaOH (0,1M) e HCl (0,1M). Todos os produtos químicos usados foram de grau de reagente analítico (MERCK®).

2.2 Instrumentação

As análises de íon cianeto seguem os procedimentos descritos segundo o Manual da Hach (2000) do equipamento espectrofotômetro (Modelo Hitachi® U-1800). Foi utilizado o programa nº 160 (Método 8027 – Piridina-Pirazalone). O método de Piridina-Pirazalone utiliza 3 reagentes em pó, que quando misturados a amostra conferem uma cor azul na presença de cianeto livre. Os resultados do teste são medidos a 612 nm. A faixa de leitura é de 0,002 a 0,240 mg L⁻¹.

2.3 Preparo da biomassa

O biossorvente utilizado neste trabalho foi a biomassa seca in natura da macrófita aquática *Eichhornia crassipes*. A coleta dos exemplares da macrófita foi realizada junto ao CPAA (Centro de Pesquisas Avançadas em Aquicultura), na cidade de Toledo, no Paraná.

A biomassa foi lavada, primeiramente em água corrente e, posteriormente, com vários enxágues em água destilada. Após esses procedimentos, a mesma foi submetida à secagem, em estufa com recirculação de ar, a uma temperatura de 30°C por um período de 5 dias. A biomassa seca foi triturada e peneirada em uma malha de 28 Mesh (0,589 mm).

2.4 Efeito de pH inicial

Foram realizados testes variando o pH inicial

das soluções para se verificar o efeito deste parâmetro na adsorção de cianeto livre.

Os testes foram feitos pela adição de 50 mL do adsorbato em diferentes pHs, na faixa de 2 a 12, na concentração de 50 mg L⁻¹ de NaCN em 1 g L⁻¹ de biomassa em frascos Erlenmeyers de 125 mL.

Em seguida os frascos foram submetidos a agitação constante em “shaker” (Tecnal® TE-424) a 100 rpm por um período de 60 minutos. Logo após, as soluções foram filtradas a vácuo e realizadas as análises de determinação do íon cianeto.

Todos os testes foram realizados em temperatura constante de 30°C e realizados em duplicata.

2.5 Efeito da concentração (ou dosagem) inicial de biomassa

Para avaliar a influência da concentração inicial de biossorvente sobre o processo de adsorção foram realizados ensaios variando a concentração inicial da biomassa.

Os testes foram feitos em pH natural da solução de NaCN, conforme Tabela 1. Foram adicionados 50 mL do adsorbato na concentração de 50 mg L⁻¹ em frascos erlenmeyers de 125 mL, com as seguintes concentrações de biossorvente: 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 e 6,0 mg L⁻¹.

Em seguida os frascos foram agitados em “shaker” (Tecnal TE-424) a 100 rpm e retirados após 60 minutos, sendo o conteúdo de cada frasco filtrado a vácuo e realizadas as análises de determinação do íon cianeto.

A temperatura do teste foi de 30°C e os testes foram realizados em duplicata.

2.6 Efeito do Tempo de Contato

Testes foram realizados com variações temporais com o intuito de avaliar a influência do tempo de contato sobre a cinética de adsorção. Estes testes foram feitos pela adição de 50 mL da solução de CN⁻ nas seguintes concentrações: 30 mg L⁻¹ em 2,0 g L⁻¹ de biomassa em frascos erlenmeyers de 125 mL. Em seguida os frascos foram agitados em “shaker” (Tecnal TE-424) a 100 rpm e retirados em intervalos aleatórios dentro de um período de tempo de 1,0 a 60 minutos, sendo o conteúdo de cada frasco filtrado a vácuo e realizadas as análises de determinação do íon cianeto. A temperatura do teste foi de 30°C, sob condição de pH 2,0. Os testes foram realizados em duplicata. O valor de pH 2,0 foi adotado por apresentar melhores resultados em ensaios preliminares. O percentual do cianeto removido ou eficiência de remoção (ER) em cada tipo de ensaio foi calculado pela Equação 1:

$$ER = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

sendo: C₀ a concentração inicial (mg L⁻¹) e C_e a concentração no equilíbrio (mg L⁻¹).

Na Tabela 1 tem se indicado um resumo de todos os ensaios realizados e suas respectivas

condições operacionais.

Tabela 1 - Resumo das condições de ensaio de adsorção

Ensaio	Condições			
	pH	Concentração macrófita (g L ⁻¹)	[CN ⁻] (mg L ⁻¹)	Tempo (min)
Efeito do pH	2,0 – 12	1,0	50	60
Efeito da dosagem de biomassa	10*	0,25 – 6,0	50	60
Efeito tempo de contato	2,0	2,0	30	1,0 – 60

***A escolha pelo pH 10 ocorreu pelo fato de ser o pH natural da solução de cianeto de sódio (NaCN), portanto sendo dispensável o ajuste de pH, minimizando possíveis erros relativos a esse procedimento.**

2.7 Estudo do equilíbrio

A quantidade do íon cianeto adsorvido por massa de biossorvente no equilíbrio foi calculada utilizando a Equação 2:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) V}{m} \quad \text{Equação 2}$$

sendo: C₀ a concentração inicial do íon cianeto (mg L⁻¹), C_e a concentração do íon cianeto no equilíbrio (mg L⁻¹), V o volume da solução (L) e m a massa de biossorvente (g).

Os dados C₀ e V são fixos, mas C_e é obtido a partir dos testes da massa inicial de biossorvente, e a partir destes valores, calculado q_e em cada C_e e m utilizando a equação acima.

2.8 Parâmetros cinéticos de adsorção

A cinética de remoção de cianeto foi

examinada usando os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, que são extensivamente usados para descrever a taxa de adsorção de poluentes orgânicos e inorgânicos em vários estudos. Baseados na potencial capacidade do adsorvente em remover íons, os modelos cinéticos pseudo-primeira ordem e de pseudo-segunda ordem podem ser expressos conforme equações 3 e 4, respectivamente:

$$\frac{dq}{dt} = K_1(q_e - q) \quad \text{Equação 3}$$

$$\frac{dq}{dt} = K_2(q_e - q)^2 \quad \text{Equação 4}$$

sendo: q (mg L⁻¹) a quantidade de adsorbato removido da solução pelo adsorvente no tempo t ; e q_e (mg L⁻¹) a quantidade de adsorbato no equilíbrio; K_1 (min⁻¹) e K_2 (g mequiv.⁻¹ min⁻¹) são as constantes de velocidade de primeira e de segunda ordem, respectivamente. Na forma linear, a integração das equações 3 e 4, temos:

$$\ln\left(\frac{q_e - q}{q_e}\right) = -K_1 t \quad \text{Equação 5}$$

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \text{Equação 6}$$

Os parâmetros cinéticos para a remoção de cianeto foram determinados utilizando as formas

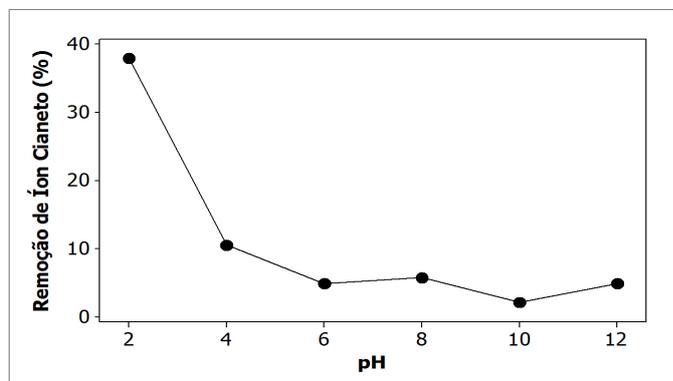
lineares da pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, equações 5 e 6, traçando $\ln\left(\frac{q_e - q}{q_e}\right)$ ou $\frac{t}{q}$ versus t com o objetivo de se obter K_1 ou K_2 , respectivamente.

$$\ln\left(\frac{q_e - q}{q_e}\right) \quad \frac{t}{q}$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O início dos experimentos de adsorção coube às investigações dos efeitos sobre o processo de adsorção de íon cianeto quando da variação do pH. Os resultados são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Influência do pH da solução (2 – 12) sobre a remoção de cianeto (dosagem macrófita = 2,0 g L⁻¹; [CN] = 50 mg L⁻¹; tempo de contato = 60 min).



Como mostrado nesta Figura 1, a maior remoção de cianeto foi obtida em pH 2,0 (38%). Como observado na Figura 1, a maior remoção de cianeto foi obtida em pH 2, indicando que maiores taxas de remoção de cianeto devem ser obtidas em valores mais baixos de pH. Dash et al. (2008) ao investigarem a influência do pH na adsorção

de ferrocianeto de potássio ($K_4[Fe(CN)_6]$) sobre grânulos de carvão ativado também constataram que a maior eficiência foi obtida em pH ácido (3,5). Segundo Dash et al. (2008) e Abreu et al. (2005), o efeito do pH sobre a adsorção pode ser atribuída a vários mecanismos, tais como interação eletrostática, complexação, troca iônica.

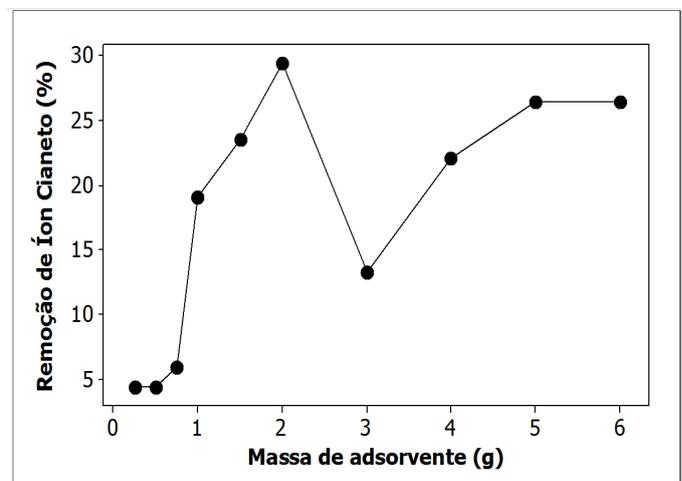
Em experimentos semelhantes ao do presente estudo, Moussavi & Khosravi (2010) identificaram a condição de pH 10 como aquela que melhor oferece potencial de remoção de íon cianeto. Nesse patamar de pH, mais de 99% de remoção de uma solução de 100 mg L⁻¹ de cianeto foram obtidos para uma dosagem de adsorvente de 1,5 g L⁻¹ depois de um tempo de contato de 60 minutos. Para isso, os autores utilizaram resíduos de casca de pistache verde como adsorvente. O pH_{pzc} (ponto de carga zero, definido como o pH em que a superfície de um adsorvente não tem qualquer carga líquida em solução) deste adsorvente é de 4,9, o que indica que o mecanismo de adsorção predominante é a troca iônica, pois CN⁻ é um íon nucleofílico, desta forma quando em contato com o adsorvente carregado negativamente (condição favorecida em pH superior a 4,9), liga-se com os grupos aniônicos funcionais presentes na superfície do adsorvente.

No presente estudo, emerge a compreensão de que o mecanismo predominante na adsorção seja diferente daquele anunciado por Moussavi & Khosravi (2010), tendo em vista que a melhor condição de pH para a remoção de cianeto residuiu em 2,0, valor inferior ao pH_{pzc} da biomassa

Eichhornia crassipes, que é 6,58, conforme investigações de Zheng et al. (2009). Isso quer dizer que valores de pH inferiores a 6,58 indicam que a superfície da macrófita apresenta cargas positivas. Portanto, sugere-se que o mecanismo predominante seja a interação eletrostática, devido ao fato de pH ácido induzir a protonação de grupos funcionais do adsorvente.

Neste sentido, considerando que a adsorção é predominantemente um fenômeno de superfície, a quantidade de superfície disponível para a adsorção – quantidade essa que pode ser traduzida em termos de massa de adsorvente – pode afetar significativamente a eficiência de adsorção, portanto o efeito da dosagem de biomassa de aguapé na remoção de cianeto foi investigado, como ficou indicado pelos ensaios realizados apresentados na Tabela 1. A Figura 2 ilustra a influência da dosagem de adsorvente na eficiência da adsorção do íon cianeto.

Figura 2 – Influência da dosagem de adsorvente (0,25 – 6,0 g L⁻¹) sobre a remoção de cianeto (pH solução = 10; [CN] = 50 mg L⁻¹; tempo de contato = 60min)

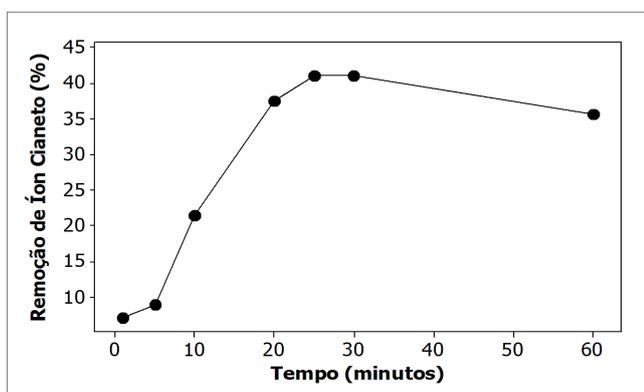


Conforme a Figura 2, a remoção de cianeto sob a dosagem de 2,0 g L⁻¹ foi de 29,41%, ponto este que representa a maior capacidade de remoção do íon cianeto em um intervalo crescente na faixa de 0,25 a 2,0 g L⁻¹. Verificou-se que acréscimos de dosagem acima de 2,0 g L⁻¹ não repercutiram em maiores eficiências de remoção, aliás contrariamente ao esperado foram obtidos menores percentuais de remoção para a faixa de 3,0 a 6,0 g L⁻¹.

De acordo com Moussavi & Khosravi (2010), a verificação do aumento da eficiência de adsorção com o aumento da dosagem de biomassa pode ser atribuído ao aumento da área superficial e por extensão, o maior número de sítios de troca disponíveis para a interação com íons cianeto.

A Figura 3 apresenta o resultado para o teste cinético, o qual avalia a influência do tempo de contato sobre a remoção de íon cianeto sob condição de pH 2,0 e dosagem de adsorvente de 2,0 g L⁻¹, conforme foram identificados como as melhores condições em ensaios anteriores.

Figura 3 – Influência do tempo de contato (1 – 60 min.) sobre a remoção de cianeto (dosagem macrófita = 2,0 g L⁻¹; [CN] = 30 mg L⁻¹; pH



De acordo com os resultados da Figura 3, o percentual de adsorção máximo ocorre no tempo de 20 minutos, sendo que ao longo dos 40 minutos restantes o percentual apresenta um comportamento que indica certa tendência de estabilização.

Abreu et al. (2005) com uma solução de KCN (cianeto de potássio) de 30 mg L⁻¹ e utilizando aguapé como bioissorvente, obtiveram uma remoção de íon cianeto em torno de 80% nos primeiros 30 minutos de contato. Considerando que a degradação natural correspondeu a 33% de redução de CN⁻ conclui-se que a remoção efetiva pela macrófita é de 47%. No presente trabalho, utilizando o NaCN (cianeto de sódio), a remoção efetiva de íon cianeto para os 30 minutos foi de 34,6%, o que representa uma diferença em torno de 12% com relação a Abreu et al. (2005).

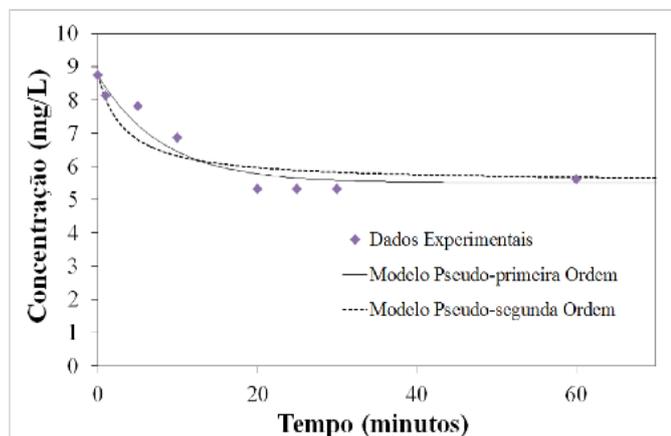
Os resultados das experiências de adsorção de Moussavi & Talebi (2011) indicaram que a remoção completa e simultânea de Cr(VI) e cianeto de águas residuárias de galvanoplastia foi obtida em condições de dosagem de 2 g L⁻¹ de pistache após 60 min de contato. Alternativamente, com carvão ativado em pó, 69,2% e 77,8% de Cr(VI) e cianeto, respectivamente, foram removidos sob as mesmas condições.

3.1 Cinética de Adsorção

Os dados cinéticos obtidos experimentalmente, sob condições de temperatura da solução em 30°C, pH 2,0 e dosagem de

adsorvente de 2,0 g L⁻¹ para 50mL de solução, foram analisados e descritos com base em modelos de cinética de adsorção disponíveis na literatura. A modelagem cinética da bioadsorção do cianeto pela macrófita in natura é apresentada nas Figuras 4 e 5, demonstrando a concentração reduzida e a quantidade removida em 60 minutos.

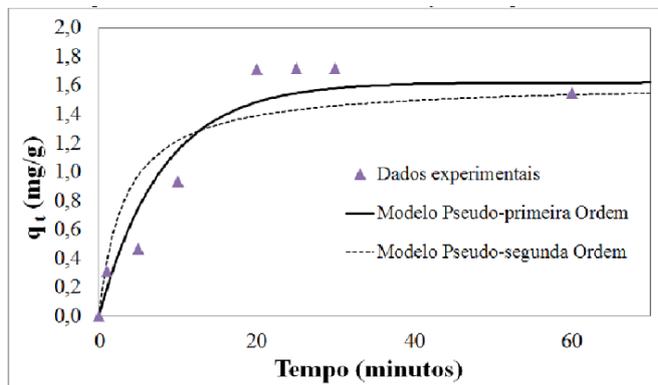
Figura 4 – Ajuste dos dados experimentais e modelagem da bioadsorção do cianeto pela macrófita ([CN⁻]= 30 mg L⁻¹; pH 2,0; 100 rpm; Concentração de biomassa de 2,0 g L⁻¹; temperatura de 30°C)



Analisando os resultados apresentados na Figura 4, observa-se que o tempo necessário para a bioadsorção do íon cianeto atingir o equilíbrio é de aproximadamente 20 minutos. Esta investigação é de fundamental importância para o projeto de sistemas de tratamento de efluentes em batelada, pois assim pode-se determinar o tempo de equilíbrio e a velocidade em que ocorre a adsorção.

A Figura 5 mostra o aumento da concentração (cianeto adsorvido) da fase sólida em função do tempo.

Figura 5 – Ajuste dos dados experimentais e modelagem da bioadsorção do cianeto pela macrófita ([CN⁻]= 30 mg L⁻¹; pH 2,0; 100 rpm; Concentração de biomassa de 2,0 g L⁻¹; temperatura de 30°C)



Sob as condições de pH 2,0 observa-se uma acentuada e rápida adsorção nos primeiros 10 minutos e, em torno de 20 minutos é alcançada a condição de equilíbrio (Figura 5).

Como já explicado anteriormente, para o ajuste dos dados cinéticos dois modelos foram utilizados: o pseudo-primeira ordem e o pseudo-segunda ordem. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2, por meio da qual estão discriminados os parâmetros obtidos do coeficiente de correlação (R²) e as respectivas constantes das taxas de adsorção dos modelos (K₁ e K₂).

Tabela 2 – Parâmetros obtidos para os modelos cinéticos.

		T = 30° C
Íon Cianeto (CN ⁻)	1ª Ordem	K ₁ = 1,23718 × 10 ⁻¹ min ⁻¹ R ² = 0,983253
	2ª Ordem	K ₂ = 1,86640 × 10 ⁻¹ g mg ⁻¹ min ⁻¹ R ² = 0,959163

Conforme os resultados descritos na Tabela 2 pode-se observar que o modelo cinético pseudo-

primeira ordem representou apropriadamente o comportamento da cinética de remoção do íon cianeto utilizando a biomassa da macrófita, pois apresentou um valor do coeficiente de correlação de aproximadamente 0,98, o que é considerado satisfatório. Assim como o modelo de pseudo-primeira ordem, o modelo de pseudo-segunda ordem também representou satisfatoriamente a cinética, apresentando um coeficiente de correlação em torno de 0,95.

Nos estudos de Moussavi & Talebi (2011) de adsorção de Cr(VI) e cianeto os dados experimentais melhor se ajustaram ao modelo cinético de pseudo-segunda ordem. A capacidade máxima de casca de pistache para a co-adsorção de Cr(VI) e cianeto foi 117,6 e 151,5 mg g⁻¹, respectivamente, e a capacidade máxima do carvão ativado em pó para a adsorção de Cr(VI) e cianeto foi de 47,6 e 39,4 mg g⁻¹, respectivamente.

Os adsorventes utilizados por Yazici et al. (2009) apresentaram uma capacidade de adsorção de 3,516 mg g⁻¹ e 0,401 mg g⁻¹ para o carvão ativado e casca de arroz, respectivamente.

Behnamfard & Salarirad (2009) analisando vários modelos cinéticos obtiveram uma capacidade máxima de 17,28 mg g⁻¹ em carvão ativado, numa concentração inicial de CN- de 102 mg L⁻¹.

No presente estudo, a capacidade máxima do aguapé em adsorver íons cianeto encontrada foi de 1,7 mg g⁻¹, a qual fica abaixo da capacidade de adsorventes, como a casca de pistache verde em pó (MOUSSAVI & KHOSRAVI, 2010;

MOUSSAVI & TALEBI, 2011) e do carvão ativado (BEHNAMFARD & SALARIRAD, 2009; YAZICI et al., 2009), porém com desempenho superior a biomassa em pó da casca de arroz (YAZICI et al., 2009).

Desta forma, o aguapé é um adsorvente eficiente com significativa capacidade para adsorver o cianeto em soluções aquosas. Além da capacidade de adsorção, destaca-se a facilidade de preparação do adsorvente a partir desta planta aquática, a qual é abundantemente disponível sem nenhum custo. Estas características, juntamente com a simplicidade de seu uso, tornam este adsorvente como uma alternativa promissora para a remoção de cianeto.

CONCLUSÕES

O cianeto por se tratar de um composto muito tóxico, sendo lançado para o ambiente através de efluentes industriais, necessita de ser removido antes de sua descarga. Neste sentido, a adsorção é um dos métodos de tratamento mais amplamente utilizados para a remoção de contaminantes da água e das águas residuais. Este trabalho abordou um adsorvente muito utilizado para remoção de metais pesados, a planta aquática *Eichhornia crassipes*, que está acessível a baixos custos. A avaliação experimental revelou que o aguapé é capaz de reduzir a concentração de íons cianeto (até 38%) em um tempo de contato relativamente curto (60 min) com uma baixa quantidade de adsorvente (2g L⁻¹). A capacidade máxima de adsorção de cianeto

foi determinada como sendo 1,7 mg g⁻¹. Portanto, o aguapé é um adsorvente eficiente, eficaz e, assim, promissora para o tratamento de amostras líquidas contendo íon cianeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J. M. T. et al. **Estudo da Bioremoção do Íon Cianeto pela Macrófita *Eichhornia crassipes***. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande, p. 1-7, 2005.
- BEHNAMFARD, A & SALARIRAD, M. M. **Equilibrium and kinetic studies on free cyanide adsorption from aqueous solution by activated carbon**. *Journal of Hazardous Materials*, n.170,127–133, 2009.
- CEREDA, M. P. **Caracterização dos Subprodutos da Industrialização da Mandioca**. In: CEREDA, M. P. Manejo, Uso e Tratamento de Subprodutos da Industrialização da Mandioca. São Paulo: Fundação Cargill, v.4, 2001.
- COSTA, C. A. et al. **Plantas Aquáticas Secas: uma Alternativa Moderna para Remoção de Metais Pesados de Efluentes Industriais**. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 5, n.1-2, p. 19-24, 2000.
- CHEN, X.; et al. **Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) waste as an adsorbent for phosphorus removal from swine wastewater**. *Bioresource Technology*. n.101, p.9025–9030. 2010.
- CHISTÉ, R. C.; COHEN, K. O.; MATHIAS, E. A.; OLVEIRA, S. S. **Quantificação de cianeto total nas etapas de processamento das farinhas de mandioca dos grupos seca e d'água**. *Acta Amazonica*, n. 40 (1), p.221-226, 2010.
- DASH R. R.; GAUR A.; BALOMAJUMDER C. **Cyanide in industrial wastewaters and its removal: A review on biotreatment**. *Journal of Hazardous Materials*, n.163, p.1-11, 2009.
- EL-KHAIARY, M. I. **Kinetics and mechanism of adsorption of methylene blue from aqueous solution by nitric-acid treated water-hyacinth**. *Journal of Hazardous Materials*. n.147, p. 28–36. 2007.
- EL-ZAWAHRY, M. M.; KAMEL, M. M. **Removal of azo and anthraquinone dyes from aqueous solutions by *Eichhornia Crassipes***. *Water Research*. n.38, p. 2967–2972. 2004.
- ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; et al. **Cr(VI) reduction by activated carbon and non-living macrophytes roots** a assessed by K β spectroscopy. *Chemical Engineering Journal*. n.162 .266–272. 2010.
- ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; et al. **Root uptake and reduction of hexavalent chromium by aquatic macrophytes as assessed by high-resolution X-ray emission**. *Water Research*. n.43, p. 4159–4166. 2009.
- HASAN, S. H.; TALAT, M.; RAI, S. **Sorption of cadmium and zinc from aqueous solutions by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)**. *Bioresource Technology*. n.98, p.918–928. 2007.
- LIMONS, R. S. **Avaliação do Potencial de Utilização da Macrófita Aquática Seca *Salvinia sp.* no Tratamento de Efluentes de Fecularia**. Toledo: Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2008. 101p. Dissertação (Mestrado).
- LOW, K. S.; et al. **Biosorption of Basic Dyes by Water Hyacinth Roots**. *Bioresource Technology*. n.52, p.79-83. 1995.
- MAHAMADI, C.; NHARINGO, T. **Competitive adsorption of Pb²⁺, Cd²⁺ and Zn²⁺ ions onto *Eichhornia crassipes* in binary and ternary systems**. *Bioresource Technology*. n.101, p.859–864. 2010.
- MOHANTY, K.; JHA, M.; MEIKAP, B.C.; BISWAS, M.N. B. **Biosorption of Cr(VI) from aqueous solutions by *Eichhornia crassipes***. *Chemical Engineering Journal*. n.117, p. 71–77. 2006.
- MOUSSAVI, G; KHOSRAVI, R. **Removal of cyanide from wastewater by adsorption onto pistachio hull wastes: Parametric experiments, kinetics and equilibrium analysis**. *Journal of Hazardous Materials*, n. 183, pp. 724–730, 2010.
- MOUSSAVI, G., TALEBI, S. **Comparing the efficacy of a novel waste-based adsorbent with PAC for the simultaneous removal of chromium (VI) and cyanide from electroplating wastewater**. *Chem. Eng. Res. Des.* 2011.
- RIBAS, M. M. F; CEREDA, M. P.; BÔAS, R. L. V. **Use of Cassava Wastewater Treated Anaerobically with Alkaline Agents as Fertilizer for Maize (*Zea mays L.*)**. *Braz. Arch. Biol. Technol.*, v.53 n.1, p. 55-62, 2010.
- SARASWAT, S.; RAI, J.P.N. **Heavy metal adsorption from aqueous solution using *Eichhornia crassipes* dead biomass**. *International Journal of Mineral Processing*. n.94, p. 203–206. 2010.
- SCHNEIDER, I. A. H.; RUBIO, J.; MISRA, M; SMITH, R. W. ***Eichhornia crassipes* as biosorbent for heavy metal ions**. *Minerals Engineering*, v.8, n.9, p. 979-988. 1995.
- SO, L. M.; CHOW, A. T.; WONG, K. H.; WONG, P. K. **The use of rhizospheric bacteria to enhance metal ion uptake by Water Hyacinth, *Eichhornia crassipes***

(Mart). In: AHMAD, I.; PICHTEL, J.; HAYAT, S. **Plant-Bacteria Interactions: Strategies and techniques to promote plant growth**. Germany: Wiley-VCH, 2008.

USEPA - U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Ambient water quality criteria for cyanide**. Washington: USEPA, 1980.

VERMA, V. K.; TEWARI, S.; RAI, J.P.N. **Ion exchange during heavy metal bio-sorption from aqueous solution by dried biomass of macrophytes**. *Bioresource Technology*. n.99, p. 1932–1938. 2008.

YAZICI, E. H.; DEVECI, H.; ALP, I. **Treatment of cyanide effluents by oxidation and adsorption in batch and column studies**, *J. Hazard. Mater.* N.166 1362–1366. 2009.

ZHENG, J.; et al. **Removal of Cu(II) in aqueous media by biosorption using water hyacinth roots as a biosorbent material**. *Journal of Hazardous Materials*. n.171, p. 780–785. 2009.

Artigo submetido: 01/05/2013

Artigo aceito: 13/03/2014