

Metalurgia & Materiais

Remoção de Pb(II) de soluções aquosas por Biossorção em *R. opacus*

(Removal of Pb(II) from aqueous solutions by biosorption with *R.opacus*)

Resumo

Nesse estudo foi avaliada a capacidade de biossorção de íons chumbo em solução aquosa pela bactéria *Rhodococcus opacus*. Avaliou-se em batelada o efeito do pH da solução, concentração da biomassa, tempo de contato e concentração inicial do metal. A cinética adequou-se melhor ao modelo de pseudo-segunda ordem. Empregaram-se as isotermas de Langmuir e Freundlich para representar o processo de sorção no equilíbrio. O valor da capacidade máxima de captação (q_{max}) obtida pelo modelo de Langmuir foi de 94,34 mg g⁻¹. No ensaio de biossorção competitiva a remoção do chumbo foi afetada pela presença de outros metais na solução.

Palavras-chave: Chumbo, biossorção, bio-hidrometalurgia, *Rhodococcus. opacus*.

Abstract

The biosorption of lead ions from aqueous solution by Rhodococcus opacus bacteria was evaluated in this study. The effects of the solution's pH, biomass concentration, contact time and initial metal concentration were studied in batch experiments. The results of the kinetics studies revealed that the biosorption of lead on R. opacus cells followed pseudo-second order kinetics. The equilibrium data was analyzed using Freundlich and Langmuir models. The maximum uptake capacity (q_{max}) obtained by the Langmuir adsorption model was 94.34 mg.g⁻¹. In the competitive biosorption experiments, the lead removal was affected by the presence of other metal ions in the solution.

Keywords: Lead, biosorption, bio-hydrometallurgy, *Rhodococcus opacus*.

1. Introdução

A crescente contaminação mundial de sistemas de águas naturais por compostos químicos industriais é um dos principais problemas enfrentados atualmente pela humanidade. Frente a isso, um dos desafios científicos é a busca e a implementação por processos de tratamento eficientes e menos custosos (Schwarzenbach et al., 2006).

Belenia Medina Bueno

Departamento de Ciência dos
Materiais e Metalurgia - PUC-Rio
E-mail: belenia_bueno@hotmail.com

Flavio Fernandes Molina

Departamento de Ciência dos
Materiais e Metalurgia - PUC-Rio
E-mail: flafmolina@hotmail.com

Maurício Leonardo Torem

Departamento de Ciência dos
Materiais e Metalurgia - PUC-Rio
E-mail: torem@puc-rio.br

**Luciana Maria Souza de
Mesquita**

Agência Nacional do Petróleo, ANP
E-mail: lmesquita@anp.gov.br

**Gabriela Alejandra Huamán
Pino**

Departamento de Ciência dos
Materiais e Metalurgia - PUC-Rio
E-mail: gabriela@esp.puc-rio.br

O chumbo é um metal presente em muitos produtos industriais como baterias, materiais fotográficos, tintas e pigmentos, combustíveis e na indústria automotiva, aeronáutica e do aço (Jalali et al., 2002; Sekhar et al., 2004).

A Organização Mundial de Saúde recomenda uma concentração máxima de 0,01 mgL⁻¹ de chumbo na água para consumo (Who, 2006). O chumbo causa principalmente danos renais e neurológicos. É apontado como um grande retardador de desenvolvimento cerebral infantil (Morton, 1999).

Os métodos convencionais utilizados para o tratamento de efluentes industriais com metais tóxicos incluem: precipitação química, troca iônica, filtração, tecnologias de membrana e tratamentos electroquímicos, porém esses métodos de tratamento resultam ineficientes e custosos, especialmente quando a concentração dos metais é baixa, tornando, assim, necessária a aplicação de um processo complementar para o polimento final do efluente (Matheickal et al., 1997).

A utilização de células de microrganismos como material biossorvente tem se mostrado, nas últimas décadas, como uma boa alternativa, pois se trata de um processo de baixo custo, elevada eficiência de remoção, além de mostrar-se menos agressivo ao meio ambiente (Costa et al., 1995; Rao, 2006). As biomassas provenientes de processos industriais, como processos fermentativos, e as encontradas na natureza, são as mais economicamente atrativas por sua fácil obtenção e baixo custo.

Investigações do mecanismo de biossorção de metais tóxicos mostram que os íons metálicos são capturados por diferentes mecanismos, como troca iônica, complexação e adsorção dos grupos funcionais presentes na parede celular (Rao, 2006). Os grupos funcionais como cetonas, aldeídos, carboxilas, presentes na parede celular desses microrganismos, são responsáveis pela capturação de metais tóxicos. Recentemente, têm-se dado importância à remoção de íons metálicos em soluções contendo

dois ou mais espécies metálicas (Sharma et al., 2007; Uslu e Tanyol, 2006; Sánchez et al., 1999). A presença de mais de um íon metálico pode afetar de maneiras diferentes a eficiência do processo.

Nesse trabalho, é estudado o processo de biossorção de chumbo, utilizando como biomassa o microorganismo *Rhodococcus opacus*, sendo avaliadas as variáveis de pH, concentração de biossorvente, concentração inicial do metal e tempo de contato. No estudo das isotermas de biossorção, foram utilizados os modelos de Langmuir e Freundlich e também foi realizado um estudo de biossorção competitiva entre íons Pb(II), Cu(II) e Cr(III).

2. Materiais e Métodos

2.1 Crescimento da biomassa

A cepa do microrganismo utilizada nesse trabalho foi fornecida pela Fundação Tropical de Pesquisas e Tecnologia André Tosello - São Paulo. O crescimento do microrganismo *R. Opacus* foi realizado em frascos Erlenmeyer de 500ml em meio de cultivo composto por: extrato de levedura 3.0 g.L⁻¹, extrato de malte 3.0 g.L⁻¹, peptona bacteriológica 5.0 g.L⁻¹, glicose 10.0 g.L⁻¹. O pH foi ajustado em 7,2 utilizando uma solução diluída de KOH 0,1 N. O crescimento foi realizado durante 24 horas à temperatura de 28°C em uma incubadora com plataforma de agitação horizontal com uma velocidade de agitação de 150 rpm.

Após o crescimento, a cultura foi centrifugada e a biomassa obtida foi lavada com água deionizada e suspensa em solução de NaCl 0,1 mM (Mesquita, 2000), sendo, posteriormente, esterilizada em autoclave a 1 atm de pressão durante 20 minutos. A quantificação celular foi determinada por peso seco.

2.2 Soluções de metais

Para realização dos testes, foram preparadas soluções-padrão de chumbo(II), cobre(II) e cromo(III) na concentração de 1000 mg.L⁻¹, que, posteri-

ormente, foram diluídas até a concentração desejada. As soluções-estoque de Pb(II), Cu(II) e Cr(III) foram preparadas com água deionizada utilizando como reagentes Pb(NO₃)₂, Cu(NO₃)₂.3H₂O, e CrCl₃.6(H₂O), respectivamente. O pH das soluções foi ajustado ao valor desejado com 0,1N HCl e 0,1 N NaOH.

2.3 Estudos de biossorção

Os fatores que afetam a capacidade de capturação do biossorvente foram examinados em batelada. Todos os experimentos foram realizados em frascos Erlenmeyer de 500 ml, os quais foram agitados num shaker à velocidade de 150 rpm.

O efeito do pH na capacidade de sorção foi avaliado numa mistura contendo biomassa (1 g.L⁻¹) e a solução contendo os íons metálicos (20 mg.L⁻¹) foi avaliada em frascos Erlenmeyer mantidos sob agitação a 150 rpm por 4 horas para garantir que o equilíbrio fosse atingido. A faixa de pH avaliada foi de 2 a 8. Após atingido o equilíbrio, a amostra foi centrifugada e o sobrenadante analisado por espectrofotometria de absorção atômica, para determinar a concentração dos íons metálicos presentes na solução.

Para se avaliar a influência do tempo de contato no processo de biossorção, seguiu-se o mesmo procedimento do estudo do pH, variando o tempo de 5 a 240 minutos para determinação da quantidade de íon metálico capturado pela biomassa (q_t). No estudo do efeito da concentração inicial de metal na solução, utilizaram-se as condições obtidas de pH e tempo de contato, variando a concentração de Pb(II) de 15 a 200 mg.L⁻¹. Para todos os experimentos, a temperatura foi mantida em aproximadamente 25°C.

Os estudos de biossorção competitiva foram realizados mantendo a concentração do íon competitivo (Cu (II) e Cr (III)) em 30 mg.L⁻¹ e variando a concentração do chumbo na faixa de 15 a 200 mg.L⁻¹. Todos os experimentos de biossorção foram realizados em duplicata.

A quantidade de íon metálico captado pela biomassa foi determinada pela equação:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{M} \quad (1)$$

Onde:

q_e : quantidade de íon metálico captado pela biomassa (mg.g⁻¹) no equilíbrio.

C_0 : concentração inicial do íon metálico (mg.L⁻¹).

C_e : Concentração do íon metálico final ou no equilíbrio (mg.L⁻¹).

V : volume da solução do íon metálico (L).

M : massa do biossorvente (g).

3. Resultados e discussão

A capacidade de captação do metal pelo microrganismo foi analisada em função do pH, da concentração de metal e da concentração de biomassa e, também, em função do tempo de contato.

3.1 Efeito do pH

É bem conhecido que o pH tem significantes efeitos na solubilidade, especiação e capacidade de biossorção dos metais pesados (Sheng 2004, Abu Al-Rub, 2006). Os diferentes valores de pH podem ser atribuídos à natureza das interações químicas de cada componente com as células microbianas (Kiran et al., 2005).

O pH pode influenciar a biossorção dos íons metálicos pela competição entre o metal e os íons H⁺ pelos sítios ativos. Adicionalmente, a dependência do pH na captação das espécies metálicas pela biomassa pode ser também justificada pela associação-dissociação de certos grupos funcionais tais como os grupos carboxilas (Yalçinkaya et al., 2002 e Evans et al., 2002). É conhecido que, para baixos valores de pH, os grupos carboxílicos não estão dissociados e não podem ser ligados aos íons metálicos na

solução, embora eles possam tomar parte nas reações de complexação.

O efeito do pH na capacidade de captação do íon Pb(II) pelo *R. Opacus* foi investigado na faixa de pH entre 2,0 - 8,0, com uma concentração inicial do metal de 20 mg.L⁻¹. O valor do pH foi ajustado ao início dos experimentos, sendo que não é observada uma mudança significativa no referido valor ao longo dos experimentos.

Na Figura 1, pode ser observado que o valor adequado de pH para biossorção de chumbo foi em torno de 5, apresentando uma remoção de, aproximadamente, 95%, sendo que tal valor foi utilizado para experimentos subsequentes.

3.2. Efeito da concentração de biomassa

Foi produzida variações na concentração da biomassa de 0,5 a 2,5 g.L⁻¹, para se determinar o efeito da concentração do biossorvente na taxa de captação dos íons Pb(II), como é mostrado na Figura 2.

Na Figura 2, pode-se observar o efeito da concentração de biomassa na biossorção de Pb(II), tendo sido observado que, quando a concentração da

biomassa se incrementa a percentagem de remoção aumenta. Com uma concentração de biomassa de 1 g.L⁻¹ obtém-se a maior percentagem de remoção, sendo que esse fato pode ser atribuído ao incremento da área superficial de adsorção e à disponibilidade de sítios livres de adsorção. Por outro lado, com valores maiores para a concentração da biomassa, a percentagem de remoção apresenta uma pequena redução. Isto pode ser explicado pela formação de agregados durante a biossorção. Essa biossorção é produzida em altas concentrações de biomassa e causa uma diminuição da área efetiva de adsorção como descrito por Ekmekyapar et al., 2006.

Considerando os resultados obtidos para os experimentos seguintes, foi utilizada uma concentração de *R. opacus* de 1,0 g.L⁻¹.

3.3. Velocidade de captação de Pb(II)

O efeito do tempo de contato na biossorção de Pb(II) por *R. opacus* é mostrado na Figura 3, sendo observado que a quantidade captada de chumbo foi crescente nos primeiros minutos de contato. Os resultados mostram uma rápida captação para o Pb(II) nos primei-

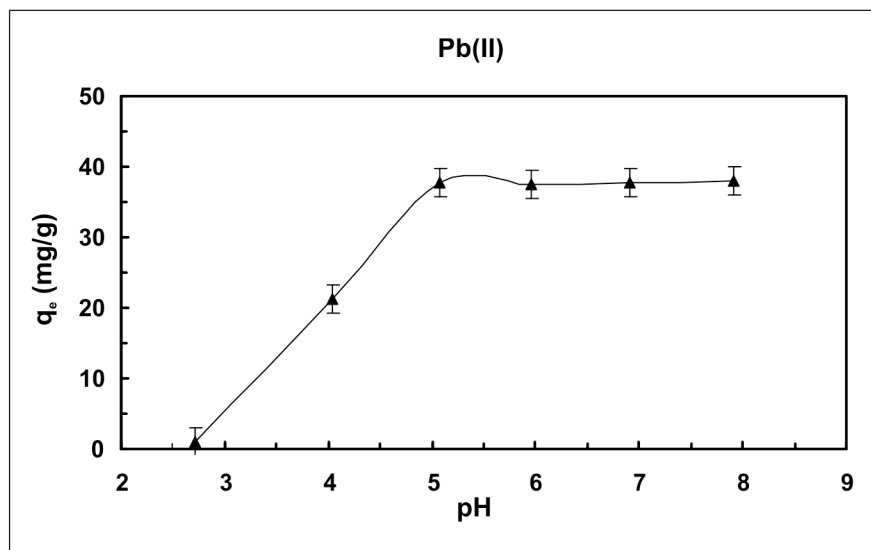


Figura 1 - Efeito do pH na biossorção de Pb(II) por *R. Opacus* (concentração inicial de metal: 20 mg.L⁻¹; concentração de biomassa: 1,0 g.L⁻¹; velocidade de agitação: 150 rpm; tempo de contato: 4 h, temperatura = 25°C).

ros 5 minutos. A máxima captação dos íons foi atingida em 1 hora, onde 95% dos íons foram captados pela biomassa. Após esse tempo, o processo de biossorção atingiu o equilíbrio não apresentando variação significativa na quantidade de íons metálicos adsorvidos com o incremento do tempo de contato.

Os subseqüentes experimentos de biossorção foram desenvolvidos empregando o pH ótimo de 5,0 para o Pb(II) e o tempo de contato de 4 horas para atingir o equilíbrio.

Modelos cinéticos foram utilizados para testar os dados experimentais e foram utilizados os modelos de pseudoprimeira ordem e pseudo-segunda ordem. O modelo cinético de pseudo-segunda ordem descreveu melhor os dados experimentais quando comparado com o modelo de pseudoprimeira ordem (Tabela 1). Pelo modelo de pseudo-segunda ordem, o coeficiente de correlação foi maior que 0,99 e o valor calculado de q_e foi mais próximo do valor experimental q_{exp} que o valor obtido com o modelo de pseudoprimeira ordem. O valor q_e estimado pelo modelo cinético de pseudoprimeira ordem foi significativamente diferente do valor experimental e o coeficiente de correlação foi menor que o obtido pelo modelo de pseudo-segunda ordem.

O modelo cinético de pseudoprimeira ordem não é um método adequado a muitos casos, sendo mais bem aplicado nos estágios iniciais do processo de adsorção (Ho & McKay, 1998), sendo utilizado como uma reação reversível no equilíbrio entre a fase líquida e a sólida. O modelo cinético de pseudo-segunda ordem admite que a etapa limitante se dá por adsorção química (Srivastava et al., 2006). Muitos autores citam o modelo de

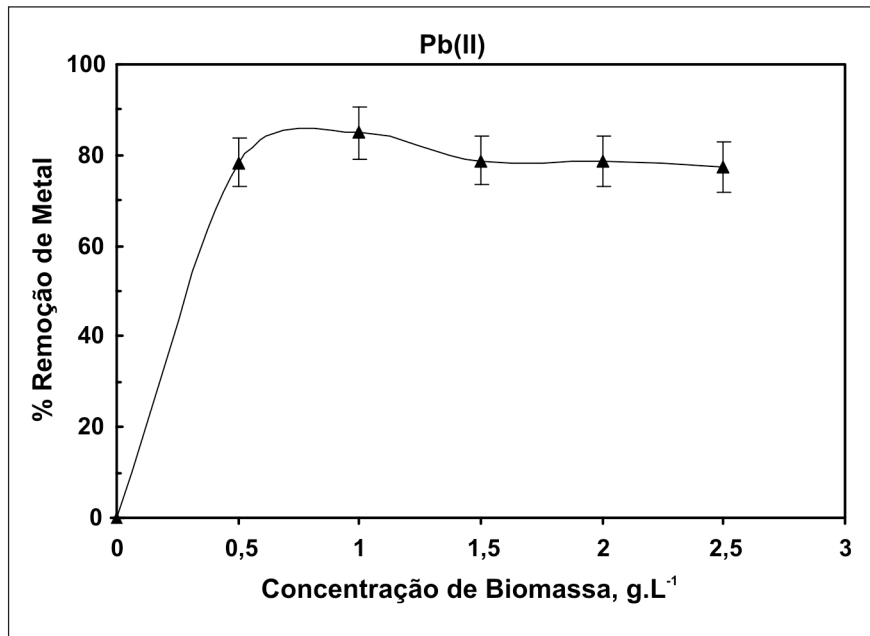


Figura 2 - Efeito da concentração de biomassa de *R. opacus* na biossorção de íons Pb(II) (concentração inicial de metal: 20 mg.L⁻¹; pH: 5,0; velocidade de agitação: 150 rpm; tempo de contato: 4 h).

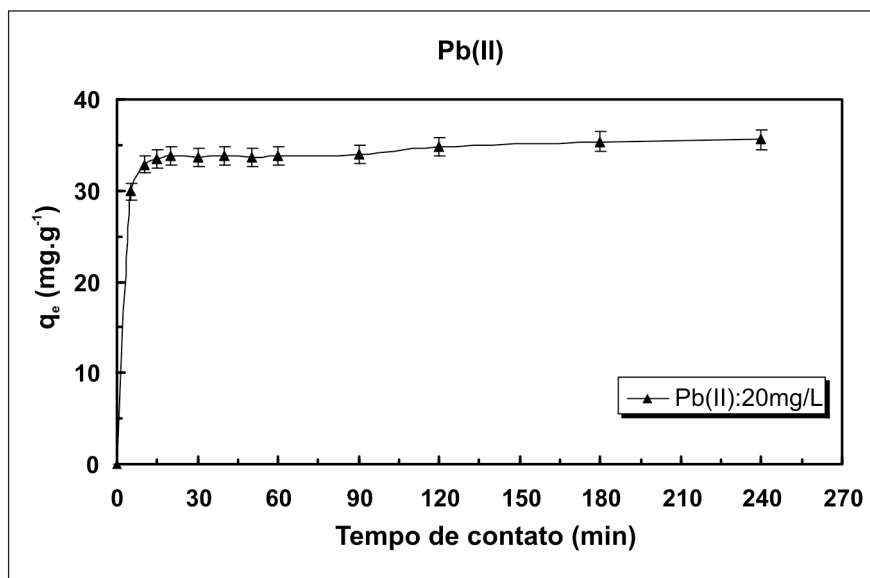


Figura 3 - Efeito do tempo de contato na biossorção de íons Pb(II) pelo *R. opacus* (concentração biomassa: 2 g.L⁻¹; pH: 5,0; velocidade de agitação: 150 rpm).

Tabela 1 - Cinética da biossorção de Pb (II) por *R. opacus*.

Espécie Metálica	Experimental	Cinética de pseudoprimeira ordem			Cinética de pseudo-segunda ordem		
	q _{exp} (mmol.g ⁻¹)	q _e (mmol.g ⁻¹)	k ₁ (min ⁻¹)	R ²	q _e (mmol.g ⁻¹)	k ₁ (min ⁻¹)	R ²
Pb(II)	0,043	0,022	5,04x10 ⁻²	0,875	0,044	0,154x10 ³	0,999

pseudo-segunda ordem como mais adequado à sorção de espécies metálicas divalentes em sorbentes heterogêneos (Reddad et al., 2002; Ho & McKay, 2000).

3.4. Isotermas de adsorção

Para descrever a distribuição do soluto na fase sólida e a fase líquida para a condição de equilíbrio, é necessário expressar a quantidade de soluto adsorvido por unidade de peso de sorvente, q_e , em função da concentração de equilíbrio, C_e , do soluto remanente na solução. A expressão dessa relação é chamada isoterma de adsorção.

O equilíbrio da sorção é estabelecido quando a concentração do sorbato no “bulk” da solução está em balanço dinâmico com a sua concentração na interface. A relação de equilíbrio entre o sorvente e o sorbato é descrita pelas isotermas de sorção, sendo que estas se caracterizam por certas constantes, as quais expressam as propriedades superficiais e afinidade do sorvente por um determinado sorbato. Têm sido propostos vários modelos para avaliar as isotermas de adsorção de solutos em uma fase líquida sobre uma superfície sólida. Os modelos de Langmuir e Freundlich são, provavelmente, os mais populares, devido a sua simplicidade e a seu bom ajuste aos dados experimentais.

Na Figura 4, é apresentada a capacidade de captação do *R. opacus* em função da concentração dos íons de chumbo. Para a faixa de concentração do metal utilizado, observou-se, no equilíbrio, que, com o aumento da concentração inicial de chumbo, ocorreu um aumento na captação do íon. Se há uma maior concentração de espécies metálicas na solução, elas ocuparão os sítios ativos presentes no *R. opacus*, efetuando-se o processo de adsorção mais eficientemente. Dessa forma, a quantidade de íons metálicos captados pela biomassa será maior, por ser diretamente proporcional à concentração inicial do metal na solução.

O modelo de Langmuir representa um dos tratamentos teóricos de sorção

não linear e sugere que a captação ocorre em uma superfície homogênea por sorção em monocamada sem interação entre as moléculas adsorvidas. O modelo assume que é, também, uniforme a energia de adsorção sobre a superfície e que não ocorre transmigração do sorbato. O modelo da Isotherma de Langmuir é representado pela seguinte equação:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b \cdot q_{\max}} + \frac{1}{q_{\max}} C_e \quad (2)$$

Onde:

q : quantidade de soluto adsorvido por unidade de peso de sorvente (mg/g).

C_e : concentração do soluto no equilíbrio, (mg/g).

q_{\max} : capacidade máxima de captação do sorvente, (mg/g).

b : constante de adsorção de equilíbrio, que expressa a afinidade entre o sorvente e sorbato.

A isoterma de Freundlich é um modelo de sorção não linear. Esse modelo propõe uma sorção em monocamada com heterogênea distribuição energética nos sítios ativos, acompanhada de interações entre as moléculas adsorvidas. A equação desse modelo é:

$$q_e = K \cdot C_e^{1/n} \quad (3)$$

Onde,

q : quantidade de soluto adsorvido por unidade de peso de sorvente, (mg/g).

C_e : Concentração de soluto de equilíbrio, (mg/L).

K e n : constantes experimentais, K indica a capacidade da adsorção do adsorvente; n indica o efeito da concentração na capacidade da adsorção e representa a intensidade da adsorção.

A linearização da equação 3 é:

$$\ln q_e = \ln k_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (4)$$

Onde K_F e $1/n$ podem ser determinados do ploteo linear de $\log(q_e)$ versus $\log(C_e)$. Os dados de equilíbrio da adsorção dos íons chumbo e cobre por *R. opacus* obtidos para 25°C foram aplicados aos modelos de Langmuir e Freundlich. Os parâmetros relativos e coeficientes de correlação (R^2) foram listados na Tabela 2.

A constante de Langmuir, q_{\max} , representa a saturação da monocamada para o equilíbrio ou a capacidade total

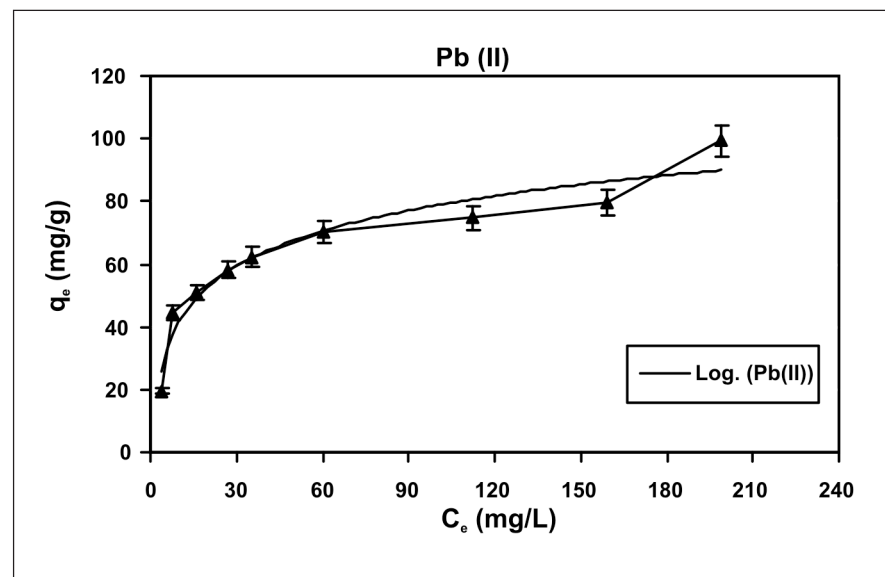


Figura 4 - Isotherma de adsorção para o Pb(II) em *R. opacus* (concentração de biomassa: 1 g.L⁻¹; pH:5,0; velocidade de agitação: 150 rpm; tempo de contacto: 4 h).

de captação dos íons chumbo por *R. opacus*. Os dados de adsorção apresentaram melhor ajuste ao modelo da Isoterma de Langmuir (Figura 5).

Na Tabela 2, mostram-se os resultados obtidos para os modelos de Langmuir e Freundlich para a biossorção de chumbo utilizando *R. opacus*. Podemos observar que a máxima capacidade de carga do *R. opacus* foi de 94,34 mg.g⁻¹. A Tabela 2 também indica que o valor de *n* é maior que a unidade, indicando que os íons de chumbo são, favoravelmente, adsorvidos pela biomassa *R. opacus* sob as condições experimentais testadas. A capacidade de sorção comprova informação sobre a efetividade do sistema metal-biossorvente.

3.5 Biossorção competitiva

Os efluentes industriais, geralmente, contêm mais de uma espécie metálica. A biossorção de diversos metais simultaneamente pode causar um efeito distinto no processo, devido à competição dos metais para se ligarem aos sítios ativos da biomassa.

Os resultados da biossorção, para o sistema binário Pb(II) e Cu(II) e para o sistema ternário Pb(II), Cu(II) e Cr(III), pela biomassa *R. opacus* são mostrados na Figura 6.

A diminuição da capacidade de adsorção comparada com a observada para sistemas simples revela a existência de uma competição entre as três espécies metálicas para se ligarem aos sítios ativos presentes na parede celular do *R. opacus*. Ficou constatado que é reduzida a capacidade de captação dos íons Pb(II) por 48,7% na presença dos íons Cr(III) e em 56,9% na presença dos

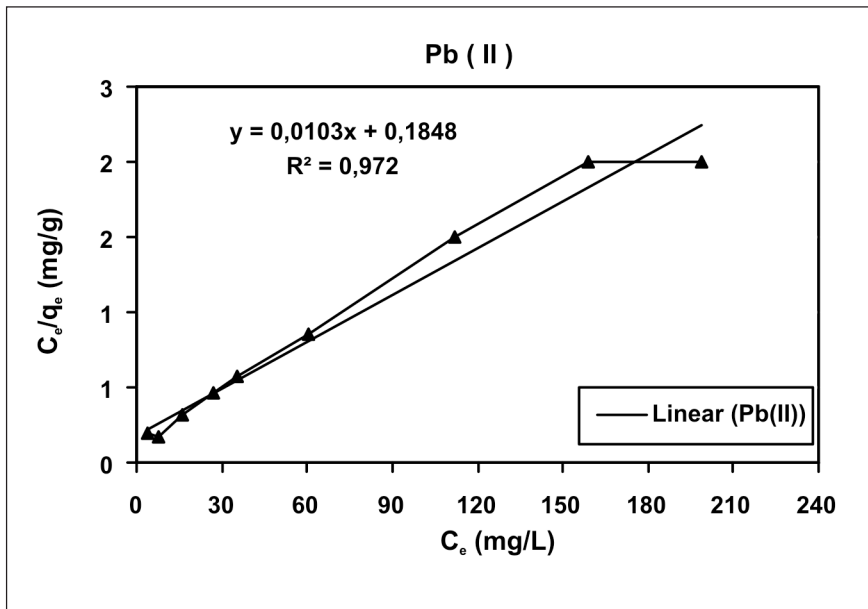


Figura 5 - Linearização da Isoterma de Langmuir para o Pb(II) em *R. opacus*.

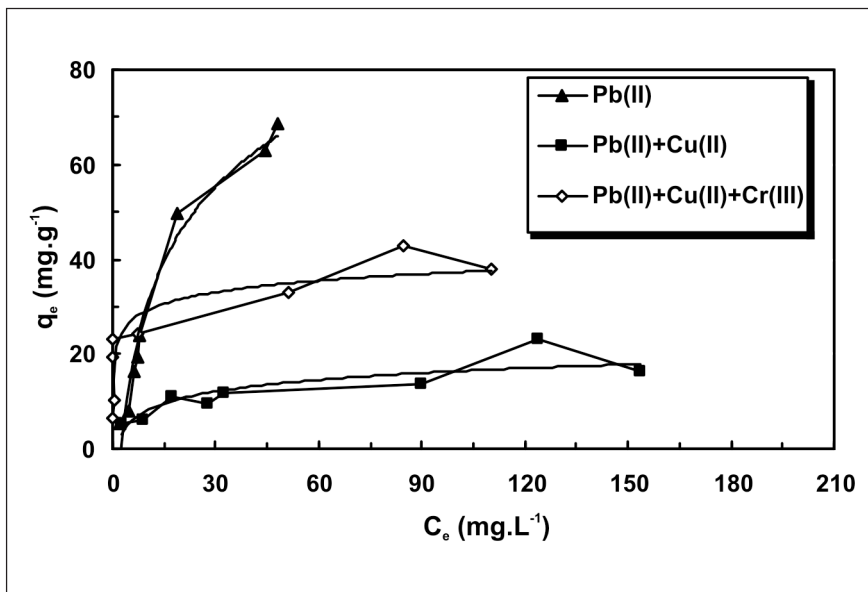


Figura 6 - Efeito da presença de outros íons na biossorção de chumbo por *R. opacus*. (pH 5,0; concentração de biomassa: 2 g.L⁻¹, concentração do Cu(II) e Cr(III): 30mg.L⁻¹; velocidade de agitação de 150 rpm, tempo de contato: 10 h, Temperatura: 25°C).

Tabela 2 - Constantes de adsorção estimadas com os Modelos das Isotermas de Langmuir e Freundlich na biossorção de Pb(II) usando *R. opacus*.

Espécie Metálica	Modelo de Langmuir			Modelo de Freundlich		
	q _{max} (mg .g ⁻¹)	b (L .mg ⁻¹)	R ²	K (L .g ⁻¹)	n	R ²
Pb (II)	94.34	0.0704	0.971	18.44	3.15	0.8562

íons Cr(III) e Cu(II). Aparentemente, isso se deve à interação química entre os metais da solução, assim como entre os metais e a biomassa, resultando numa competição pelos sítios ativos na superfície da célula.

Um fator que indica a tendência da biossorção de metais por um determinado material são suas propriedades físico-químicas. Outros autores reportam que a sorção aumenta com o aumento do raio iônico do metal (Mattuschka & Straube, 1993; Chong & Volesky, 1995; Sag et al., 2002) e com a eletronegatividade (Stumm & Morgan, 1996), sendo que ambos os parâmetros seguem a ordem: Pb(II)>Cu(II)>Cr(III). Essa relação explica a significativa supressão na captação do chumbo na presença de cobre e o efeito moderado do cromo na biossorção do chumbo.

Em estudo aplicando *oleifera seeds*, a biossorção de Cd(II), Cr(III) e Ni(II) foi realizada de forma independente e em misturas ternárias (Sharma et al., 2007). A ordem de sorção foi consistente com as propriedades físico-químicas dos metais estudados: Cd(II)>Cr(III)>Ni(II). Akar e Tunali (2006) constataram, utilizando *Aspergillus flavus*, que a capacidade de biossorção era reduzida em misturas binárias, se comparada com soluções contendo somente uma espécie metálica, obtendo a ordem Pb(II)>Cu(II), tanto para a biossorção competitiva, quanto para a não competitiva. Abu Al-Rub et al. (2006) observaram a redução da remoção de íons cobre na presença de chumbo e zinco utilizando como biomassa a alga *Chlorella vulgaris* em pó. Esses resultados são similares aos resultados encontrados nesse trabalho no que diz respeito ao comportamento obtido na biossorção de várias espécies metálicas.

4. Conclusões

Com base nos resultados obtidos, utilizando-se o processo de biossorção, conclui-se que o microorganismo *R. opacus* apresenta elevada eficiência de

remoção de Pb(II), mostrando a potencialidade desse biossorvente. A capacidade de captação de chumbo pelo microorganismo *R. opacus* é dependente do pH do meio, obtendo-se maior eficiência num valor de pH de 5,0. Nesse pH foram removidos 95% dos íons Pb(II). A capacidade máxima de captação (q_{max}) obtida pelo modelo de Langmuir foi de 94,34 mg g⁻¹ e a cinética da captação ajustaram-se adequadamente ao modelo de pseudo-segunda ordem sob as condições experimentais testadas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a FAPERJ pelo apoio à pesquisa.

6. Referências bibliográficas

- ABU AL-RUB, F.A., EL-NAAS, M.H., ASHOUR, I., AL-MARZOUQI, M. Biosorption of copper on *Chlorella vulgaris* from single binary and ternary metal aqueous solutions. *Process Biochem.*, v.41, p. 457-464, 2006.
- AKAR, T., TUNALI, S. Biosorption characteristics of *Aspergillus flavus* biomass for removal of Pb(II) and Cu(II) ions from an aqueous solution. *Bioresource Technol.*, v.97, p. 1780-1787, 2006.
- CHONG, K-H, VOLESKY, B. Description of 2-metal biosorption equilibrium by Langmuir-type. *Biotechnol Bioeng*, v. 47, p. 451-460, 1995.
- COSTA, A., GONÇALVES, M., MESQUITA, L.M.S., GRANATO, M. Tratamento de efluentes para remoção de metais pesados utilizando uma resina biológica. *Meturgia & Materiais*, v.51, n.446, p. 872-877, 1995.
- EKMEKYAPAR, F., ASLAN, A., KEMAL BAYHAN, Y., CAKICI, A. Biosorption of copper(II) by non-living lichen biomass of *Cladonia rangiformis hoffm.* *J. Hazardous Mater.*, B137, p.293-298, 2006.
- EVANS, J.R. DAVIDS, W.G., MACRAE, J.D., AMIRBAHMAN, A. Kinetics of cadmium uptake by chitosan-based crab shells. *Water Research*, v. 36, n.13, p. 3219-3226, 2002.
- HO, Y.S., MCKAY, G. Kinetic model for lead(II) sorption on peat. *Adsorp. Sci. Technol.*, v.16, p.243-255, 1998.
- HO, Y.S., MCKAY, G. Correlative biosorption equilibrium model for a binary batch system. *Chem. Eng. Sci.*, v. 55, p. 817-825, 2000.
- JALALI, R., GHAFOURIAN, H., ASEF, Y., DAVARPANAH, S.J., SEPEHR, S. Removal and recovery of lead using non-living biomass of marine algae. *J. Hazard. Mater.*, B92, p. 253-262, 2002.
- KIRAN, I. et al. Biosorption of Pb(II) and Cu(II) from aqueous solutions by pretreated biomass of *Neurospora crassa*. *Process Biochem.*, v. 40, p. 3550-3558, 2005.
- MATHEICKAL, J. T., YU, Q., FELTHAM, J. Cu(II) binding by *E. Radiata* biomaterial. *Environmental Technology*, v.18, p. 25-34, 1997.
- MATTUSCHKA, B., STRAUBE, G. Biosorption of metals by a waste biomass. *J. Chem. Technol.*, 58, p. 57-63, 1993.
- MESQUITA, L.M.S. *Bioflotação de hematita e quartzo - um estudo de seletividade*. Rio de Janeiro: Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio, 2000.(Tese de Doutorado).
- MORTON, L. *Environmental toxicants: human exposures and their health effect*. (2.ed.). 1999. 987p.
- RAO, S. R. Biotechnological Processes. In: *Resource recovery and Recycling from Metallurgical Wastes*. Amsterdam: Elsevier Waste Management series, v. 7, 2006, cap. 5, p.109-125. 557p.
- REDDAD, Z., GERENTE, C., ANDRES, Y., LECLOIREC, P. Adsorption of several metal ions onto a low-cost biosorbent. Kinetic and equilibrium studies. *Environ. Sci. Technol.*, v.36, p. 2067-2073, 2002.
- SAG, Y., AKEAEL, B., KUTSAL, T. Ternary biosorption equilibria of Cr(VI), Cu(II) and Cd(II) on *Rhizopus arrhizus*. *Sep. Sci. Technol.*, v. 37, n.2, p. 279-309, 2002.
- SÁNCHEZ, A., BALLESTER, A., BLÁZQUEZ, M., GONZÁLEZ, F., MUÑOZ, J., HAMMAINI, A. Biosorption of copper and zinc by *Cymodocea nodosa*. *FEMS Microbiology Reviews*, v. 23, p. 527-536, 1999.
- SEKHAR, K.C., KAMALA, C.T., CHARY, N.S., SASTRY, A.R.K., NAGESWARA, R., VAIRAMANI, M. Removal of lead from aqueous solutions using an immobilized biomaterial derived from a plant biomass. *J. Hazard Mater.*, B108, p.111-117, 2004.

- SCHWARZENBACH, R.P., ESCHER, B.I., FENNER, K., HOFSTETTER, T.B., JOHNSON, C.A., VON GUNTEN, U., WEHRLI, B. *Science*, v. 313, n.5790, p. 1072-1077, 2006.
- SHARMA, P., KUMARI, P., SRIVASTAVA, M.M., SRIVASTAVA, S. Ternary biosorption studies of Cd(II), Cr(III) and Ni(II) on shelled *Moringa oleifera* seeds. *Bioresource Technol.*, v.98, n.2, p.474-477, 2007.
- SHENG, P.X., TING, Y.P., CHEN, J.P., HONG, L. Sorption of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel by marine algal biomass: characterization of biosorptive capacity and investigation of mechanism. *J. Colloid Interf. Sci.*, v.275, p. 131-141, 2004.
- SRIVASTAVA, V.C., SWAMY, M.M., MALL, I.D., PRASAD, B., MISHRA, I.M. Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon: equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Colloids Surf.*, A272, p. 89-104, 2006.
- STUMM W., MORGAN J. J. *Aquatic Chemistry*. (3.ed.). New York: John Wiley & Sons, 1996. 1042p.
- USLU, G., TANYOL, M. Equilibrium and thermodynamic parameters of single and binary mixture biosorption of lead(II) and copper ions onto *Pseudomonas putida*: Effect of temperature. *J. Hazardous Mater.* v. 135, p.87-93, 2006.
- YALÇINCAYA, Y., SOYSAL, L., DENIZLI, A., ARICA, M. Y., BECTAS, S., GENÇ, Ö. Biosorption of cadmium from aquatic systems by carboxymethylcellulose and immobilized *Trametes versicolor*. *Hydrometallurgy*,v. 63, p. 21-40, 2002.
- WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Guidelines for drinking-water quality*. (3. ed.). Geneva, v. 1., 2006. 536p.

Artigo recebido em 20/06/2008 e aprovado em 25/08/2009.

Descubra as muitas informações da: **Geologia, Mineração, Metalurgia & Materiais e Engenharia Civil.**



Assine e publique na Rem

Conheça o nosso site: **www.rem.com.br**