

UTILIZAÇÃO DE CARVÕES ATIVADOS POR PROCESSOS DE ATIVAÇÃO QUÍMICA PARA REMOÇÃO DE CÁDMIO EM MEIO AQUOSO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Jair Paulino de Sales¹, Raimundo Nonato Pereira Teixeira², Rodolfo José Sabiá³

Resumo: Adsorção é um fenômeno físico-químico de transferência de massa no qual ocorre aumento da concentração de um adsorbato na superfície de um adsorvente. Entre as diversas aplicações para essa tecnologia, tem destaque a sua utilização em processos de tratamento de corpos hídricos contaminados com metais pesados. A partir de uma revisão sistemática, este trabalho objetiva descrever as metodologias desenvolvidas para a ativação química de carvões ativados empregados na adsorção de cádmio em meio aquoso. Os artigos, disponíveis no Portal de Periódicos da CAPES, foram selecionados a partir das palavras-chaves “adsorption of cadmium” e “chemical activation”. Foram identificados nove agentes ativantes, entre ácidos e bases, e a temperatura de ativação variou entre 90 °C e 900 °C. O carvão ativado com maior área superficial (1939 m²/g) e melhor potencial de adsorção (331 mg/g) foi o produzido com o agente ativante TiCl₄ a 800 °C. Desta forma, conclui-se que a metodologia de ativação química se apresenta como uma alternativa para aumentar a eficiência dos carvões ativados, possibilitando sua adoção nos processos de descontaminação de corpos hídricos, ou mesmo rejeitos industriais, contaminados com cádmio.

Palavras-chave: adsorção de cádmio. Métodos de ativação. descontaminação.

UTILIZATION OF ACTIVATED CARBONS BY CHEMICAL ACTIVATION PROCESSES FOR CADMIUM REMOVAL FROM AQUEOUS SOLUTION: A SYSTEMATIC REVIEW

Abstract: Adsorption is a physicochemical phenomenon of mass transfer in which there is an increase in the concentration of an adsorbate on the surface of an adsorbent. Among the various applications for this technology, its use in processes for the treatment of water bodies contaminated with heavy metals is highlighted. From a systematic review, this work aims to describe the methodologies developed for the chemical activation of activated carbons used on the adsorption of cadmium. The articles, available in the “Portal de Periódicos” (CAPES), were selected using the keywords “adsorption of cadmium” and “chemical activation”. Nine activating agents were identified, between acids and bases, and the activation temperature has

¹ Mestrando em Desenvolvimento Regional Sustentável (UFCA);

² Professor da Universidade Regional do Cariri (URCA) no Departamento de Química Biológica

³ Professor da Universidade Regional do Cariri (URCA) Departamento de Engenharia de Produção.

Autor correspondente: e-mail: jairpsales@hotmail.com

varied between 90 °C and 900 °C. The Activated carbon with higher surface area (1939 m²/g) and best adsorption potential (331 mg/g) was that produced with the activating agent TiCl₄ in 800 °C. Thus, it is concluded that the methodology of chemical activation is presented as an alternative to increase the efficiency of activated carbons, allowing its adoption in the processes of decontamination of water bodies contaminated with cadmium.

Keywords: Cadmium adsorption. Activation methods. Decontamination.

Introdução

A Primeira e Segunda Revolução Industrial modificaram amplamente a relação estabelecida entre a sociedade humana e o meio ambiente, entretanto, estas alterações passaram a ser foco de interesse internacional apenas na segunda metade do século XX, quando estudos começaram a ser desenvolvidos a fim da conscientização global sobre os impactos ambientais oriundos das ações antrópicas e suas consequências a médio e longo prazo (BREHM; EISENHAUER; STEDMAN, 2013; XIAO; BUHRMANN, 2017).

Enquanto alguns estudos focaram principalmente na busca pelo entendimento sobre as relações estabelecidas entre o meio ambiente e o ser humano, como a Economia Ecológica (GEORGESCU-ROEGEN, 1971), a Ecologia Política (GORZ, 1975), a Sociologia do Meio Ambiente (CATTON; DUNLAP, 1978), outros estudos concentraram-se na relação direta entre as atividades humanas e os impactos que causavam ao meio ambiente, a partir destes houve uma mobilização no meio acadêmico, sobretudo pela busca de técnicas de aporte à minimização dos impactos ambientais. Entre estas técnicas discorrer-se-á sobre a adsorção, fenômeno físico-químico de transferência de massa, no qual ocorre aumento da concentração do adsorbato na superfície do adsorvente (ROUQUEROL et al., 2014).

De acordo com a natureza do material adsorvente e do adsorbato, a adsorção pode ser classificada em química ou física (SCHULTZ, 2005). O processo reverso, no qual ocorre remoção das moléculas já adsorvidas a partir da superfície do adsorvente, é denominado dessorção (VALENCIA, 2007). A adsorção física ocorre quando as forças intermoleculares de atração do adsorbato e do adsorvente são maiores do que as existentes apenas entre as moléculas

do próprio adsorbato. Salienta-se que, como não há formação de ligações entre o adsorbato e adsorvente, as naturezas químicas dos materiais envolvidos no processo não são alteradas (SCHNEIDER, 2008). Outra característica da adsorção física é a facilidade de dessorção, visto que as forças intermoleculares estabelecidas são relativamente fracas (THOMMES; CYCHOSZ, 2014). Na adsorção química ocorre a transferência de elétrons entre adsorbato e adsorvente e a formação uma monocamada molecular adsorvida a partir de ligações covalentes, o processo é normalmente exotérmico (OLIVEIRA, 2011).

Em relação aos materiais adsortivos enfatizar-se-á a utilização de carvões ativados, materiais adsorventes, carbonáceos e microporosos que apresentam em sua estrutura heteroátomos, principalmente o oxigênio, podendo ser obtidos a partir de materiais lignocelulósicos, compostos principalmente por celulose, hemicelulose e lignina (RABELO, 2007), polímeros sintéticos, ossos e outros (ROCHA, 2006; NIEDERSBERG, 2012).

Existem dois processos para a obtenção de carvões ativados, a ativação física e a ativação química. Em linhas gerais, o primeiro processo consiste da pirólise do material a altas temperaturas (500 °C-1000 °C) em atmosfera inerte para eliminação dos átomos de oxigênio e hidrogênio, seguido da etapa de ativação térmica na presença de um gás oxidante. Já a ativação química consiste na pirólise e ativação química por um agente ativante (MOHAMMADI et al., 2010; YANG et al., 2014).

Entre as diversas aplicações para os carvões ativados a adsorção de metais pesados em meios aquosos é bastante recorrente na literatura especializada. Um dos metais comumente estudados é o cádmio, metal de transição encontrado em solos contaminados com lixo urbano, lodo de esgotos e fertilizantes fosfatados. Possui fácil absorção e difícil eliminação em plantas e animais, podendo causar problemas graves à saúde humana (DIAS et al., 2001).

Este trabalho tem por objetivo descrever metodologias para a ativação química de carvões ativados empregados na adsorção de cádmio em meios aquosos, discorrendo sobre os agentes ativantes utilizados, temperaturas atingidas e resultados obtidos, como capacidade máxima adsortiva e área superficial. Para tal, desenvolveu-se uma revisão sistemática da literatura.

Metodologia

Uma revisão sistemática, assim como demais revisões, utiliza como material de base a literatura científica sobre um tema específico, entretanto, este tipo de revisão fundamenta-se na procura por diversas estratégias com foco em um mesmo objetivo. O presente trabalho foi desenvolvido segundo metodologia proposta por Sampaio e Mancini (2007):

- a) Definir pergunta científica;
- b) Identificar base de dados, palavras-chaves e estratégia de busca;
- c) Estabelecer critérios de seleção;
- d) Conduzir busca inicial dos trabalhos;
- e) Aplicar critérios de seleção justificando possíveis exclusões;
- f) Avaliar criticamente todos os artigos;
- g) Preparar um resumo crítico sintetizando as informações;
- h) Apresentar conclusão sobre o estudo.

Tal metodologia é amplamente utilizada em estudos da Saúde, já que possibilita a avaliação de diferentes formas de tratamento para uma mesma doença, auxiliando, sobretudo, na divulgação e análise comparativa das informações.

Os trabalhos utilizados nesta revisão sistemática foram retirados do Portal de Periódicos CAPES a partir da utilização das palavras-chaves '*adsorption of cadmium*' e '*chemical activation*'. A seleção dos artigos foi realizada a partir dos seguintes critérios:

- a) Trabalhos publicados apenas em formato de artigo científico;
- b) Trabalhos completos; Trabalhos em inglês;
- c) Trabalhos publicados em periódicos revisados por pares;
- d) Trabalhos publicados a partir de 01 de janeiro de 2005.

Como etapa final realizou-se uma triagem para selecionar apenas os artigos que abordaram algum processo de ativação química para obtenção de carvões ativados utilizados na remoção de cádmio em meios aquosos, para isto cada artigo foi criteriosamente lido, analisado e fichado.

Resultados e Discussão

A partir da utilização dos descritores propostos foram identificados 21 artigos, entretanto após a etapa de seleção foram identificados quatro incompletos e um duplicado, restando apenas

16 artigos propícios ao desenvolvimento deste trabalho. Após leitura detalhada de todos percebeu-se que apenas cinco tratavam sobre a problemática em questão (Tabela 1). O baixo número de artigos selecionados se justifica pela alta especificidade do tema proposto.

Em relação à matéria prima, destacam-se as constituídas principalmente por grande quantidade de matéria orgânica, como as cascas de feijão, fezes do bicho-da-seda, casca do fruto da palmeira-africana (*Doum palm*, espécie vegetal nativa da Península Arábica e África) e lodo biológico industrial. O último estudo trata da utilização de um carvão comercial já ativado. Os trabalhos selecionados foram dos seguintes países: México, USA, Espanha, Egito, Arábia Saudita, Itália, Colômbia, Nigéria e Malásia.

Para o processo de ativação química foram identificados nove agentes ativantes, entre ácidos e bases. Destes, cinco (HNO_3 , NaOH , KOH , ZnCl_2 , H_2O_2) foram utilizados em dois trabalhos, e os demais (CrCl_3 , TiCl_4 , H_3PO_4 , KCl) apenas uma vez. Apenas dois artigos utilizaram somente um agente ativante, enquanto os demais utilizaram pelo menos dois para realização de comparação entre os testes. A menor temperatura atingida foi 90 °C, utilizada para a ativação das cascas de feijão, enquanto a maior, 900 °C, foi utilizada para o carvão já ativado. Nenhuma temperatura se repetiu. Cada um dos estudos utilizou uma metodologia distinta, alterando apenas a ordem das atividades.

Tabela 1 - Artigos selecionados

Artigo	Periódico	Fator de impacto
Chávez-Guerrero et al. (2008), Production and detailed characterization of bean husk-based carbon: efficient cadmium (II) removal from aqueous solutions	Water Research	6.942
Gómez-Pacheco et al. (2012), Optimization of the preparation process of biological sludge adsorbents for application in water treatment	Journal of Hazardous Materials	6.065
Elshafei et al. (2014), Silkworms' feces-based activated carbons as cheap adsorbents for removal of cadmium and methylene blue from aqueous solutions	Chemical Engineering Research and Design	2.538
Voccianti et al. (2014), A rigorous procedure for the design of adsorption units for the removal of cadmium and nickel from process wastewaters	Journal of Cleaner Production	5.715
Gaya et al. (2015), Adsorption of aqueous Cd(II) and Pb(II) on activated carbon nanopores prepared by chemical activation of doum palm shell	SpringerPlus	0.982

Fonte: pesquisa do autor

Chávez-Guerrero et al. (2008) ativaram cascas de feijão. O material foi seco ao sol, triturado e peneirado para a obtenção de fragmentos menores que 2 mm. Posteriormente a amostra foi tratada termicamente a 270 °C em um fluxo de ar (0,5 L/min) por 30 minutos e lavada com água deionizada para retirar impurezas. A ativação química se iniciou com a adição de 17,5 ml de HNO₃, 82,5 ml de água deionizada e três gramas da amostra carbonizada em um recipiente de vidro. A mistura foi aquecida a uma temperatura de 90°C por 30 minutos. Novamente o material foi lavado com água deionizada desta vez para obtenção de um pH 7,0 e seco a 100 °C por 05 horas. O carvão ativado produzido obteve um potencial máximo de adsorção do cádmio de 180 mg/g frente a 11 mg/g do carvão ativado comercial F400, muito embora a área superficial do F400 (1000 m²/g) seja muito maior do que a do carvão obtido (2.3 m²/g). A alta capacidade adsorptiva deste carvão ativado pode ser explicada pela concentração de oxigênio presente na sua superfície (CHÁVEZ-GUERRERO, 2008).

Gómez-Pacheco et al. (2012) ativaram o lodo remanescente do tratamento de águas residuais urbanas variando agente aglutinante, temperatura de ativação e quantidades de materiais utilizados. Inicialmente o lodo foi impregnado com solução de NaOH e de um agente aglutinante, posteriormente seco por lâmpadas de infravermelho durante 12 horas. As proporções de NaOH e do agente aglutinante variaram entre, respectivamente, 5 e 100 gramas e 0 e 100 gramas para cada amostra de 100 gramas do material a ser ativado. A amostra foi então submetida à pirólise em atmosfera controlada com um fluxo de 5 L/min e aumento gradual de 10 °C, sendo mantido em temperatura máxima por um período que variou de 30 minutos a 3 horas. Os agentes aglutinantes utilizados foram ácido húmico, solo argiloso e resina fenólica. A área superficial do carvão ativado obtido variou entre 175 e 59 m²/g. As amostras com melhores desempenhos foram aquelas com maior tempo e temperatura de ativação. Salienta-se, também, que a quantidade de agente aglutinante utilizado mostrou-se como mais relevante do que a quantidade do agente ativante. O melhor carvão ativado foi obtido pelo processo a 700 °C, com tempo de pirólise de 3 horas, aglutinado com 20 gramas de solo argiloso e ativado com 25 gramas de NaOH, o potencial máximo de adsorção deste carvão foi 10 vezes superior a do carvão ativado comercial (MERCK), 0,59 e 0,06 mmol de Cd(II)/g de adsorvente, respectivamente, muito embora o carvão comercial tenha área superficial superior (1301 m²/g) à do carvão produzido. Esta disparidade entre área superficial e potencial máximo de adsorção pode ser atribuída aos grupos químicos presentes na superfície do carvão obtido (GOMEZ-

PACHECO et al., 2012).

ElShafei et al. (2014) utilizaram pela primeira vez fezes do bicho-da-seda, material constituído por aproximadamente 85% de matéria orgânica. O material seco foi peneirado a fim da remoção de impurezas e posteriormente dividido em seis amostras. Cada amostra foi impregnada durante 24 horas a 60°C por um diferente agente ativante (KOH, KCl, ZnCl₂, CrCl₃, TiCl₄, H₃PO₄) segundo concentração de 1.5:1 (agente ativante/material precursor) e mesma quantidade de água. As amostras foram lavadas com água destilada e secas por 24 horas a 110 °C. O material obtido foi aquecido a 800 °C por uma hora em atmosfera controlada em fluxo de nitrogênio (100 cm³/min). O material foi lavado e seco novamente para remoção de resquícios do agente ativante e demais impurezas. O processo finalizou-se com outra etapa de secagem a 110 °C por 24 horas. Como resultado o carvão ativado com maior área superficial (1939 m²/g) e melhor potencial máximo de adsorção (331 mg/g) foi o produzido com o agente ativante TiCl₄.

Voccianti et al. (2014) utilizaram um carvão comercial (Carbochem TM-PS230) já ativado a partir de cascas de coco e fluxos de ar. O material foi peneirado para obtenção de partículas de 1 mm e lavado primeiramente com solução de 0,01 M HCl para a remoção de impurezas e posteriormente com água destilada para remoção do acidez, foi então seco por 24 horas a 90 °C. Parte do material foi impregnado com HNO₃ 6 M por 06 horas e outra com H₂O₂ 10 M por 18 horas em suas respectivas temperaturas de ebulição. As amostras foram lavadas com água destilada para neutralização do pH. Amostras tratadas com HNO₃ foram aquecidas a 450 e 750 °C por duas horas em atmosfera controlada (nitrogênio). Também testou-se o carvão sem a adição de agente ativante aquecendo-o a 900 °C por duas horas em atmosfera controlada (nitrogênio). O carvão ativado obtido através da impregnação com HNO₃ mostrou melhor resultado quando aquecido a 750 °C, obtendo área superficial de 935 g/m², já o carvão ativado com menor área superficial foi o tratado apenas quimicamente com HNO₃ (816 g/m²). Em relação ao potencial máximo de adsorção, a amostra com melhor resultado foi a tratada apenas quimicamente com H₂O₂, obtendo 1.172 mmol/g.

Gaya et al. (2015) estudaram a ativação química da casca do fruto da palmeira-africana. O material foi raspado e lavado para remoção de impurezas e da casca superficial, seco a 105 °C por uma noite. Posteriormente foi triturado para obtenção de uma granulometria entre 1-2 mm. O material foi carbonizado a 500 °C por 3 horas e o carvão obtido impregnado com KOH, NaOH e ZnCl₂ na proporção de 1:3. As amostras foram desidratadas a 105 °C por uma noite e

novamente tratadas termicamente a 500 °C por 3 horas. As amostras foram arrefecidas e lavadas com água deionizada quente e 0,1 mol/l de HCl para neutralização do pH. Como resultado, o carvão ativado produzido com o NaOH como agente ativante mostrou melhor área superficial (226 m²/g), em relação a capacidade adsorptiva, o carvão ativado com KOH obteve melhor resultado (0,992 mg/g).

Em relação aos modelos de adsorção empregados salienta-se a utilização das isotermas de Langmuir e Freundlich, respectivamente, em quatro e dois dos cinco trabalhos analisados. Estes modelos são empregados para estimar a quantidade máxima de determinada substância a ser adsorvida, sob temperatura constante, em um adsorvente. O modelo de Langmuir é bastante recorrente na literatura especializada, pois relaciona os parâmetros de “capacidade máxima de adsorção” e “energia de ligação”, já o modelo de Freundlich trata de um estudo empírico (LINHARES et al., 2008).

Entre todos os experimentos analisados, o carvão ativado obtido com maior área superficial e melhor potencial máximo de adsorção foi o ativado quimicamente a partir das fezes do bicho-da-seda com ZnCl₂ a 800 °C, enquanto o que obteve menor área superficial foi o ativado a partir das cascas de *feijão* (Tabela 2). Percebe-se uma grande variação entre os valores apresentados na Tabela 02, isto ocorre devido às diferenças nos processos analisados, evidenciando a importância da seleção correta do tipo de material a ser ativado, da temperatura de adsorção, do agente ativante e do uso, ou não, de agentes aglutinantes.

Tabela 2 - Áreas superficiais e potenciais máximos de adsorção

Artigo	Área superficial (m²/g)	Potencial máximo de adsorção (mg/g)*	Agente ativante
Chávez-Guerrero et al. (2008)	2,3	180	HNO ₃
Gómez-Pacheco et al. (2012)	175	66	NaOH
Elshafei et al. (2014)	1939	331	TiCl ₄
Voccianti et al. (2014)	935	131	HNO ₃ e H ₂ O ₂
Gaya et al. (2015)	226	0,992	NaOH e KOH

*Os valores apresentados por Gómez-Pacheco et al. (2012) e Voccianti et al. (2014), em mmol/g, foram convertidos para mg/g para fins de comparação.

Chávez-Guerrero et al. (2008) e Gómez-Pacheco et al. (2012) compararam seus respectivos carvões ativados com carvões comerciais e percebeu-se um aumento considerável nas capacidades adsorptivas de cádmio, muito embora suas áreas superficiais continuassem menores.

Considerações Finais

Embora nitidamente distintos, os processos de ativação química utilizados nos trabalhos analisados diferem pouco em seu percurso metodológico, o qual pode ser resumido nas seguintes etapas: preparação da amostra; limpeza; impregnação dos agentes ativantes; aquecimento em atmosfera controlada. Entretanto, há uma variedade enorme de agentes ativantes utilizados, bem como da temperatura relacionada a cada um dos processos executados.

É perceptível o impacto causado pela utilização do agente ativante e da temperatura no processo de produção de carvões ativados, principalmente em relação à área superficial formada e ao potencial máximo de adsorção de cádmio. Salienta-se que, além da área superficial, os grupos químicos formados nestas superfícies relacionam-se intimamente com o potencial de adsorção, e este varia de acordo com o material a ser adsorvido. Logo, para a criação de um carvão ativado com boa capacidade adsorptiva é necessário estudo prévio sobre a substância a ser adsorvida, para que seja possível a escolha da matéria prima, do agente ativante e da temperatura adequada ao processo. A utilização de modelos de adsorção, sobretudo das isotermas de Langmuir e Freundlich, é fundamental para a caracterização inequívoca do comportamento dos materiais analisados.

Os carvões ativados quimicamente produzidos por Chávez-Guerrero et al. (2008) e Gómez-Pacheco et al. (2012) apresentaram capacidade adsorptiva maior do que os carvões ativados comerciais aos quais foram comparados (MERCK, 2017). Portanto a metodologia de ativação química surge como alternativa para aumentar a eficiência dos carvões ativados tanto do ponto de vista adsorptivo quanto econômico, possibilitando o aumento de sua adoção nos processos de descontaminação de corpos hídricos, ou mesmo rejeitos industriais, contaminados com metais pesados, sobretudo cádmio.

Como recomendação para trabalhos futuros sugere-se o estudo do processo de ativação física de carvões ativados, o qual possibilitará comparações detalhadas sobre ambos os processos.

Referências

- BREHM, J. M.; EISENHAUER, B. W.; STEDMAN, R. C. Environmental Concern: Examining the Role of Place Meaning and Place Attachment. **Society & Natural Resources**, v.26, n.5, p.522-538, 2013.
- CATTON, W. R.; DUNLAP, R. Environmental Sociology: A New Paradigm. **The American Sociologist**, v.13, p.41-49, 1978.
- CHÁVEZ-GUERRERO, L.; RANGEL-MÉNDEZ, R.; MUÑOZ-SANDOVAL, E.; CULLEN, D. A.; SMITH, D. J.; TERRONES, H.; TERRONES, M. Production and detailed characterization of bean husk-based carbon: Efficient cadmium (II) removal from aqueous solutions. **Water Research**, v.42, p.3473-3479, 2008.
- DIAS, N. M. P.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C.; CAMARGO, O. A. Adsorção de cádmio em dois latossolos ácidos e um nitossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.297-304, 2001.
- ELSHAFEI, G. M. S.; ELSHERBINY, I. M. A.; DARWISH, A. S.; PHILIP, C. A. Silkworms' feces-based activated carbons as cheap adsorbents for removal of cadmium and methylene blue from aqueous solutions. **Chemical Engineering Research and Design**, v.92, p.461-470, 2014.
- GAYA, U. I.; OTENE, E.; ABDULLAH, A. H. Adsorption of aqueous Cd(II) and Pb(II) on activated carbon nanopores prepared by chemical activation of doum palm shell. **Springer Plus**, v.4, 2015.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. **The Entropy Law and the Economic Process**. Harvard: Harvard University Press, 1971.
- GÓMEZ-PACHECO, C. V.; RIVERA-UTRILLA, J.; SÁNCHEZ-POLO, M.; LÓPEZ-PEÑALVER, J. J. Optimization of the preparation process of biological sludge adsorbents for application in water treatment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 217-218, p. 76-84, 2012.
- GORZ, A. **Écologie et politique**. Galilé, 1975.
- LINHARES, L. A.; EGREJA FILHO, F. B.; IANHEZ, R.; SANTOS, E. A. Aplicação dos modelos de Langmuir e Freundlich na adsorção de cádmio e chumbo em diferentes classes de solos brasileiros. **Revista Tecnológica**, v.17, p.49-60, 2008.
- MOHAMMADI, S. Z.; KARIMI, M. A.; AFZALI, D.; MANSOURI, F. Removal of Pb(II) from aqueous solutions using activated carbon from Sea-buckthorn stones by chemical activation. **Desalination**, v.262 p.86-93, 2010.
- NIEDERSBERG, C. **Ensaio de adsorção com carvão ativado produzido a partir da casca do tungue (Aleurites fordii), resíduo do processo de produção de óleo**. 2012. 65 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental), UNISC, Santa Cruz do Sul, 2012.
- OLIVEIRA, S. A. **Estudo de adsorção de metais pesados em zeólitas para fins de uso em barreira reativa**. 2011. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2011.

RABELO, S. C. **Avaliação de desempenho do pré-tratamento com peróxido de hidrogênio alcalino para a hidrólise enzimática de bagaço de cana-de-açúcar**. 2007. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UNICAMP, Campinas, 2007.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Rev. Brasileira de Fisioterapia**, v.11, n.1, p.83-89, 2007.

SCHNEIDER, E. L. **Adsorção de compostos fenólicos sobre carvão ativado**. 2008. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), 2008.

SCHULTZ, E. L. **Redução de óxido nítrico usando materiais carbonosos obtidos de turfa**. 2005. 130p. Tese (Doutorado em Engenharia Química), UFSC, Florianópolis, 2005.

VALENCIA, C. A. V. **Aplicação da adsorção em carvão ativado e outros materiais carbonosos no tratamento de águas contaminadas por pesticidas de uso agrícola**. 2007. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica), PUC, Rio de Janeiro, 2007.

VOCCIANTE, M.; TROFA, M.; RODRÍGUEZ-ESTUPIÑÁN, P.; GIRALDO, L.; D'AURIA, T.; MORENO-PIRAJÁN, J. C.; ERTO, A. A rigorous procedure for the design of adsorption units for the removal of cadmium and nickel from process wastewaters. **Journal Cleaner Production**, v.77, p.35-46, 2014.

YANG, Y.; WEI, Z.; ZHANG, X.; CHEN, X.; YUE, D.; YIN, Q.; XIAO, L.; YANG, L. Biochar from *Alternanthera philoxeroides* could remove Pb(II) efficiently. **Bioresource Technology**, v.171, p.227-232, 2014.

XIAO, C.; BUHRMANN, J. The Structure and Coherence of the New Environmental Paradigm: Reconceptualizing the Dimensionality Debate. **Human Ecology Review**, v.23, n.1, p.179-198, 2017.

ROUQUEROL, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K.S.W.; LLEWELLYN, P. MAURIN, G. **Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and applications**. 2ed. Oxford: Academic Press, 2014. 626 p.

THOMMES, M.; CYCHOSZ, K.A. Physical adsorption characterization of nanoporous materials: progress and challenges. **Adsorption**, v.20, n.2-3, p.233-250, 2014.

MERCK. **Activated carbono**: Mineral Adsorbents, Filter Agents and Drying Agents. Disponível em: <<https://www.sigmaaldrich.com/chemistry/chemical-synthesis/learning-center/technical-bulletins/al-1430/activated-carbon.html>>. Acesso em: 02 dez. 2017.

Recebido: 12/05/2017

Aceito: 19/11/2017