

**Utilização de carvões ativados de bambu (*Guadua weberbaueri pilger*)
funcionalizados com nanopartículas de prata ou óxido de ferro no
tratamento de água**

**Use of activated bamboo carbons (*Guadua weberbaueri pilger*)
functionalized with silver nanoparticles or iron oxide in water
treatment**

DOI:10.34117/bjdv7n11-154

Recebimento dos originais: 12/10/2021

Aceitação para publicação: 10/11/2021

Dawerson Ramos da Paixão

Mestre em Engenharia Urbana

Universidade Federal do Acre – Campus Rio Branco

Rodovia BR 364, Km 04 - Distrito Industrial, Rio Branco - AC, 69920-900

E-mail: dawerson@gmail.com

Marcelo Ramon da Silva Nunes

Mestre em Ensino de Ciências e Matemática

Instituto Federal do Acre – Campus Sena Madureira

Rua Francisca Sousa da Silva, 318 - Getúlio Nunes Sampaio, Sena Madureira-AC,
69.940-000

E-mail: marcelo.nunes@ifac.edu.br

Anselmo Fortunato Ruiz Rodriguez

Doutor em Física

Universidade Federal do Acre – Campus Rio Branco

Rodovia BR 364, Km 04 - Distrito Industrial, Rio Branco - AC, 69920-900

E-mail: ruiz@ufac.br

Johnnatan Duarte de Freitas

Doutor em Química e Biotecnologia

Instituto Federal de Alagoas – Campus Maceió

Av. do Ferroviário, 530 - Centro, Maceió - AL, 57020-600

E-mail: johnnatandf@gmail.com

Hugo Morais Meira

Graduado em Engenharia Química

Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

R. do Príncipe, 526 - Boa Vista, Recife - PE, 50050-900

E-mail: cienciachave@gmail.com

Camila Braga Dornelas

Doutora em Ciências e Tecnologia dos Polímeros

Universidade Federal de Alagoas – Campus A. C. Simões

Av. Lourival Melo Mota - Tabuleiro do Martins, Maceió - AL, 57072-970

E-mail: dornelascb@yahoo.com.br

Marcela Patrícia Nunes Pereira

Graduada em Química
Universidade Federal de Alagoas – Campus A. C. Simões
Av. Lourival Melo Mota - Tabuleiro do Martins, Maceió - AL, 57072-970
E-mail: marcelapatricianunes@gmail.com

César Arruda Meschiari

Doutor em Farmacologia
Universidade Federal do Acre – Campus Rio Branco
Rodovia BR 364, Km 04 - Distrito Industrial, Rio Branco - AC, 69920-900
E-mail: cesar.meschiari@ufac.br

Rodrigo Fernando Costa Marques

Doutor em Físico-Química
Universidade Estadual Paulista – Campus Araraquara
Rod. Araraquara-Jaú Km 1 - Machados - Araraquara/SP, 14800-901
E-mail: marques@iq.unesp.br

RESUMO

O bambu do gênero *Guadua* sp., popularmente conhecido como taboca, ocupa 40% da cobertura florestal do Acre, sendo, destaque para o *Guadua weberbaueri* Pilger. O objetivo deste trabalho foi preparar nanocompósitos de carvão de bambu com nanopartículas de prata ou óxido de ferro para compor um filtro para tratamento de água. Foram preparados carvões de bambu por meios de tratamentos termoquímicos, como a pirólise. Posteriormente, foram sintetizadas nanopartículas de prata e de óxido de ferro que foram funcionalizadas nos poros do carvão ativado. Os materiais percursoros, como carvões, as nanopartículas e os nanocompósitos, foram submetidos a caracterizações tais como: MEV, DRX, DLS, FTIR, potencial zeta size e teste de adsorção de corante com avaliação no UV-Vis. Em seguida, foi desenvolvido um protótipo de um filtro que foi montado utilizando o nanocompósito, areia e cascalhos. As amostras de água filtradas foram caracterizadas por meio de parâmetros físico-químicos e contagem de coliformes fecais aptos para o consumo humano, além de testes de citotoxicidade *in vitro*. Com base no que é exigido pelo CONAMA347, as amostras de água filtradas apresentaram parâmetros físico-químicos superiores aos da amostra não tratadas. Os coliformes fecais foram reduzidos e até mesmo extintos com a presença do nanocompósito produzido com nanopartículas de prata. Nenhuma das amostras de água nas concentrações de 1% ou 10% apresentaram efeitos citotóxicos em comparação ao controle negativo. Portanto, foi possível concluir que filtros do carvão ativado de bambu agregado com nanopartículas são eficientes para tratamento de água para consumo humano.

Palavras-Chave: Bambu, carvão ativado, nanocompósitos, filtro, tratamento de água.

ABSTRACT

Bamboo of the genus *Guadua* sp., popularly known as taboca, occupies 40% of the forest cover of Acre, being the highlight of the *Guadua weberbaueri* Pilger. The objective of this work was to prepare nanocomposites of bamboo charcoal with nanoparticles of silver or iron oxide to compose a filter for water treatment. Bamboo charcoals were prepared by means of thermochemical treatments, such as pyrolysis. Subsequently, silver and iron

oxide nanoparticles were synthesized and functionalized in the pores of activated carbon. Percussive materials, such as coals, nanoparticles and nanocomposites, form characterizations such as: MEV, DRX, DLS, FTIR, zeta size potential and dye adsorption test with UV-Vis evaluation. Then, a prototype of a filter was developed, which was assembled using the nanocomposite, sand and gravel. The filtered water Regs were characterized using physicochemical parameters and fecal coliform counts suitable for human consumption, in addition to in vitro cytotoxicity testes. Based on what is required by CONAMA347, as a filtered water parameter, physical-chemical parameters superior to those of the untreated sample. The coliforms were reduced and even extinct with the presence of the nanocomposite produced with silver nanoparticles. None of the water options regulated 1% or 10% cytotoxic effects compared to the negative control. Therefore, it was possible to conclude that the filtering of activated bamboo activated carbon with nanoparticles is efficient for the treatment of water for human consumption.

Keywords: Bamboo, activated carbon, nanocomposites, filter, water treatment.

1 INTRODUÇÃO

O carvão ativado consiste em um material com alto teor de carbono que possui forma cristalina constituída de heteroátomos, principalmente oxigênio ligado aos átomos de carbono, que sofreram um processamento para aumentar a porosidade interna. Desta forma, apresentam estrutura porosa interna extremamente desenvolvida e elevada área superficial específica que consequentemente lhe conferem uma eficiente capacidade de adsorver moléculas (GORGULHO et al., 2008; MACEDO, 2005).

Mudanças recentes nos padrões de qualidade dos efluentes lançados nos corpos hídricos têm colocado em ênfase esta tecnologia. Deste modo, a procura por carvão ativado aumenta devido a sua grande utilidade no controle da poluição (SRICHAROENCHAIKUL et al., 2007). Essa demanda aquece o mercado financeiro de modo que a matéria-prima é o principal obstáculo para produção. Entretanto, o Brasil detem de abundante matéria renovável para produção desse material.

Segundo Lima (2017), o bambu do gênero *Guadua* (poacea) popularmente conhecido como taboca, ocupa 40% da cobertura florestal do Acre, sendo, destaque para o *Guadua weberbaueri* Pilger. Embora seja endêmica na América, destacando-se na região Amazônica brasileira, essa espécie é pouco utilizada popularmente devido a seu grande número de espinhos e baixa durabilidade. De fato é considerada uma praga para a maioria dos produtores rurais que a encontram em suas propriedades (LODOÑO; ZURITA, 2008).

Um filtro para tratamento de água eficiente, de baixo custo e sustentável é possível de obter-se a partir dessa matéria-prima amazônica combinada com a nanotecnologia. Um nanocompósito (Nc) dessa natureza pode combinar as propriedades do carvão do bambu com as das nanopartículas (Np). As Np de prata (Np-Ag), por exemplo, possuem propriedades antimicrobianas, sendo usada no tratamento de várias doenças infecciosas, e também vem sendo empregada na purificação do ar e água em filtros. Já o óxido de ferro (Np-Fe), possui propriedade magnética reforçando o poder de adsorção do carvão sobre os metais.

Assim, esta pesquisa desenvolveu e, caracterização a eficiência do Nc de carvão ativado com nanopartículas de prata (C-Ag) ou carvão ativado com nanopartículas de óxido de ferro (C-Fe), para compor um filtro com atividade bactericida e elevado poder de adsorção para purificação de água.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Preparação dos carvões ativados

A produção de carvão ativado foi constituída basicamente de duas etapas principais: a pirólise da matéria-prima seguida de ativação (BORGES et al., 2003), onde o material precursor (bambu), foi pirolisado sob atmosfera inerte de N_2 por 2:30 h, em três diferentes temperaturas: 400 °C, 500 °C e 600 °C. Os carvões foram ativados seguindo a metodologia descrita por TEIXEIRA (2020) com adaptações. Para tanto foi utilizado dois reagentes: acetato de sódio ($C_2H_3NaO_2$) e ácido clorídrico (HCl) Para cada processo de ativação, foi utilizado 1 g do carvão de bambu.

Os carvões foram tratados com 100 mL de solução aquosa de acetato de sódio a 1,5 % (m/m) sob agitação por 30 min. O procedimento para ativação com HCl se deu a partir da mistura dos carvões com 100 mL de solução do ácido a 12% $g.L^{-1}$ sob agitação por 30 min. Logo após, os materiais foram filtrados e seco em estufa por 24 h a 35 °C. Para purificação dos materiais, foram realizadas sucessivas lavagens dos carvões com água ultrapura sob filtração a vácuo, até o ponto em que água que passava pelos carvões atingisse pH mais próximo possível de 7.

Síntese das nanopartículas

As Np-Ag foram sintetizadas a partir do método de redução do íon Ag^+ derivado de sais solúveis de prata reduzidos por solução de borohidreto de sódio, seguindo a metodologia descrita por MELO JUNIOR e colaboradores (2012). Desse modo, em um

Erlenmeyer de 250 mL, foi adicionado 75 mL de uma solução $2,0 \times 10^{-3} \text{ molL}^{-1}$ de boroidreto de sódio (NaBH_4). O meio reacional foi então mantido em banho de gelo sob agitação branda. Com o auxílio de uma bureta, adicionou-se, gota a gota, 25 mL de uma solução $1,0 \times 10^{-3} \text{ molL}^{-1}$ de nitrato de prata (AgNO_3). Essa mistura deu-se num período de aproximadamente 4 min e com taxa de adição de 1 gota s^{-1} .

As Np-Fe foram sintetizadas utilizando o método de KAUR et al., (2014) adaptado, de coprecipitação de íons Fe^{3+} e Fe^{2+} em meio alcalino (). Foram preparadas previamente soluções de sulfato de ferro II ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (0,02 M) e cloreto de ferro III ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (0,04 M) com água destilada, na proporção de 1:2 ($\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$) e misturadas com agitador mecânico a 500 rpm, por 5 minutos, até que se observou a completa solubilização. Transcorrido esse tempo, uma solução de hidróxido de sódio 0,16 M foi adicionada ao sistema, no qual foi possível observar a mudança de coloração de laranja para preto, instantaneamente. O sistema foi agitado por mais 15 minutos e logo em seguida a suspensão foi sonicada por 3 minutos com 30% de amplitude e um pulso a cada segundo.

Preparo dos nanocompósitos e filtro

A inserção das Np-Ag e Np-Fe nos poros dos carvões fez-se por processo de refluxo. Para tanto, 100 mL da suspensão de Np-Ag foi diluída com 100 mL de água ultrapura tipo I. Em seguida, dentro de um balão volumétrico de 1000 mL, foi misturada 7,05 g do carvão. A mistura manteve-se em processo de refluxo por 3 h, sob aquecimento, o bastante para ebulição do líquido. Para a inserção das Np-Fe nos carvões, o método foi semelhante ao de prata de modo que 0,0705 g de Np-Fe foi colocado em um balão de fundo redondo de 1000 mL com 200 mL de água ultrapura do tipo I. Em seguida, foi adicionado 7,05 g do carvão. A mistura manteve-se em processo de refluxo por 3 h, sob aquecimento, o bastante para ebulição do líquido.

O filtro com o nanocompósito foi produzido utilizando um cano de vidro com ponta em forma de cone. A montagem se deu assim: foi colocado uma camada de algodão na parte inferior, seguido de uma camada de cadaço Nc, uma de areia fina, outra de areia grossa e uma camada de cascalho para finalizar. Todos os materiais foram esterilizados em uma autoclave vertical analógica. A filtração foi realizada lentamente até ao ponto de se obter amostras de água suficiente para caracterização físico-química e bacteriológica.

Caracterização dos materiais precursores e da água tratada

Para os testes de adsorção de corante foi usado o azul de metileno nas concentrações de 20 e 100 mg/L. Em frascos Erlenmeyer de 125 mL, foram colocados 50 mL das soluções com 0,05 g de carvão sob agitação constante na temperatura de 30 °C por 48 h. A determinação da concentração do corante foi realizada por espectrofotometria (modelo 6705 UV/VIS da marca JENWAY) usando os comprimentos de onda 665 nm. A capacidade de adsorção dos carvões foi calculada como a massa de corante adsorvido por grama de adsorvente empregado.

Os materiais precursores foram submetidos a Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, modelo LMU, marca Tescan – Vega 3 e Difração de Raio X - DRX, a partir de um difratômetro SHIMADZU modelo XR - 7000, usando radiação Cu-K α ($\lambda = 0,154\text{nm}$) filtrada com Ni sob tensão de 30 kV e corrente de 30 mA com ângulo de incidência variando de $2\theta = 5^\circ$ a 70° e velocidade de $2^\circ.\text{min}^{-1}$. Os grupos químicos presentes na superfície dos materiais foram determinados a partir da Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR obtidos em equipamento Perkin Elmer Spectrum RX I com no mínimo 16 varreduras, na faixa de 400 a 4000 cm^{-1} .

O tamanho das nanopartículas, bem como a estabilidade das mesmas em suspensão aquosa foram determinadas a partir do Zetasizer modelo Nano – ZS90 da marca Malvern. As análises físico-química e bacteriológicas para coliformes fecais das amostras de água, foram realizadas no Centro de Análise de Água e Efluentes do Acre – CAE-AC com base nos parâmetros estabelecidos pela resolução do CONAMA n° 357 de 17 de março de 2005, para qualidade aceitável de água.

Ensaio de citotoxicidade

A linhagem celular de fibroblasto de pulmão humano (MRC5) foi cultivada em ambientes estéril utilizando Dulbecco's Modified Eagle's médium (DMEM) acrescido de 10% de soro fetal bovino com 10 de soro fetal bovino e 1% de solução de antibióticos [penicilina (100 U.I. ml^{-1}) e estreptomicina ($0,1\text{ mgml}^{-1}$)]. Para a realização do ensaio do MTT (MESCHIARI et al., 2016), as células serão transferidas para placas de 96 poços, numa densidade celular de $1,5 \times 10^4$ células/poço, em um volume de 200 μL de meio de cultura e incubadas por 24 h. Logo após, o meio de cultura foi substituído por meio de cultura acrescido com 1% ou 10% (v/v) de amostra de água filtradas com os diferentes carvões produzidos ou 10 $\mu\text{g/mL}$ de doxorubicina (DXR), utilizado como controle positivo de citotoxicidade. Em seguida, as células foram incubadas por 24 h, nas

condições anteriormente citadas. Posteriormente, o meio de cultura foi substituído por 100 μ L de solução tampão fosfato salina (PBS) acrescido de glicose 1 mg/mL e 0,5 mg/mL de 3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide (MTT). A placa foi incubada por 4 h e o PBS foi substituído por 100 μ L dimetilsufóxido (DMSO) e levadas para um espectrofotômetro de placas (leitor de ELISA), onde os valores de absorbância foram adquiridos no comprimento de onda de 492 nm. O meio de cultura sem adicionado de amostras de águas filtradas foi utilizado como controle negativo, isto é, células não tratadas, e sua proliferação relativa foi considerada 100 %. A intensidade das absorbâncias obtidas dos tratamentos com águas filtradas foram normalizadas pelo controle negativo e comparadas ao mesmo.

Análise Estatística

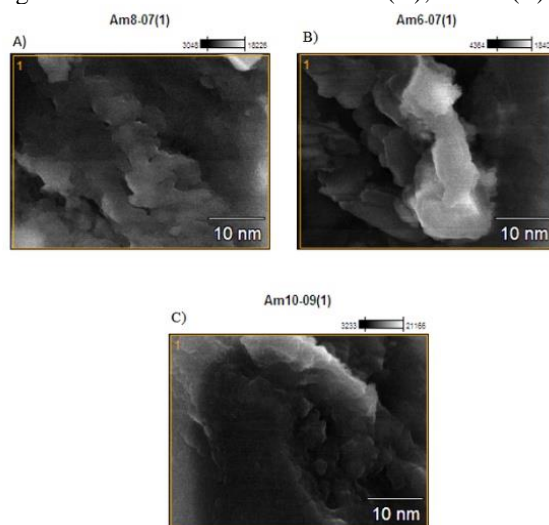
Os resultados foram analisados por ANOVA (análise de variância) de um fator e teste Dunnett ou teste t não pareado. Foram considerados estatisticamente diferentes valores com $p < 0,05$. Os dados estão apresentados em média \pm erro padrão da média.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise morfológica dos carvões

As figuras 1A, 1B e 1C mostram imagens de microscopia eletrônica de varredura dos carvões produzidos nas três diferentes temperaturas (C-400, C-500 e C-600) em escala nanométrica. É possível observar expressiva semelhança entre as mesmas, principalmente em relação a nítida ausência e/ou sutileza dos poros nos materiais, tornando-os predominantemente amorfo. Desse modo, foi determinado que a pesquisa seguiria apenas com o carvão produzido a 400 °C para gerar melhor custo-benefício de produção em termos de economia de energia térmica.

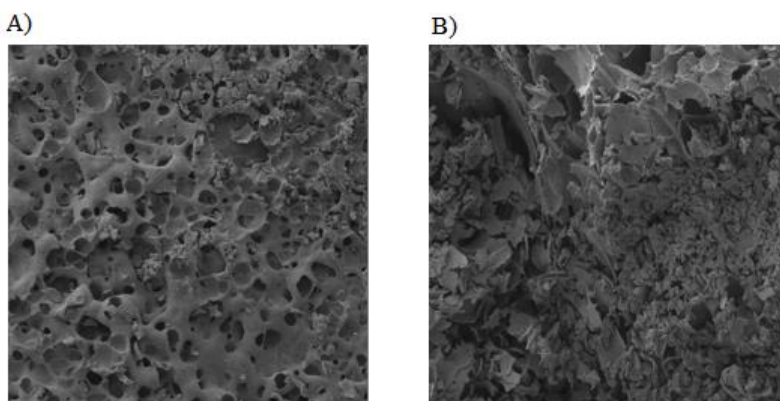
Figura 1. Imagens de MEV das amostras C-400 (A); C-500 (B) e C-600 (C).



Fonte: Do autor.

Ao contrário da imagem anterior, a MEV dos carvões produzidos a 400 °C e ativados com acetato de sódio e ácido clorídrico revelaram uma superfície abundantemente porosa. Os orifícios nos carvões ativados com acetato de sódio e HCl mostraram-se completamente indiscreta e homoganeamente distribuída ao longo da superfície dos materiais. A imagem abaixo mostra a superfície dos carvões as quaiasse assemelham a um “queijo suíço” com diâmetro médio de orifício de 60 nm para as amostras de carvão ativado com acetato de sódio.

Figura 2. Imagens de MEV dos carvões ativado com acetato de sódio (A) e ácido clorídrico (B).



Fonte: Do autor.

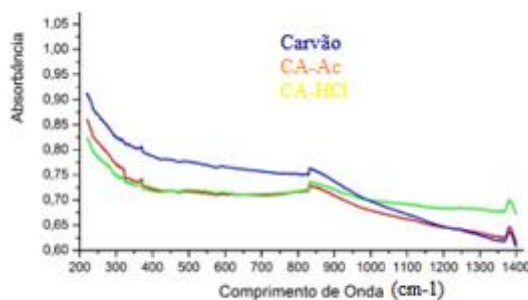
Apesar de revelar significativa porosidade, o carvão ativado com ácido clorídrico apresentou expressiva população de poros obstruídas por fragmentos de materiais do próprio carvão. Isso pode ser justificado partindo do princípio de que o HCl é um ácido forte e que pode ter causado a quebra de ligações químicas dos carvões, resultando em

fragmentos que obstruíram os poros. Aos quais foram possíveis mensurar, a média de diâmetro dos poros desse material ficou em torno de 90 nm. A justificativa para esse aumento, em relação ao ativado com acetato do sódio, é que os poros menores foram obstruídos, assim, esses não poderiam ser medidos.

Análise da composição química dos carvões

Os modos vibracionais encontrado a partir da FTIR, revelaram composição química semelhantes entre todas as amostras de carvões ativados e não ativado como mostrado na figura 3. Em todas amostras, foi detectado modos vibracionais em torno dos 840 cm^{-1} característico de anéis aromáticos 2H adjacentes (anéis para-substituídos e 1,2,3,4-tetrasubstituídos). Em 1385 cm^{-1} é encontrado modos vibracionais, típicos de ligações CH_2 . Isso endossa a presença de anéis aromáticos que é predominante na composição química de carvões.

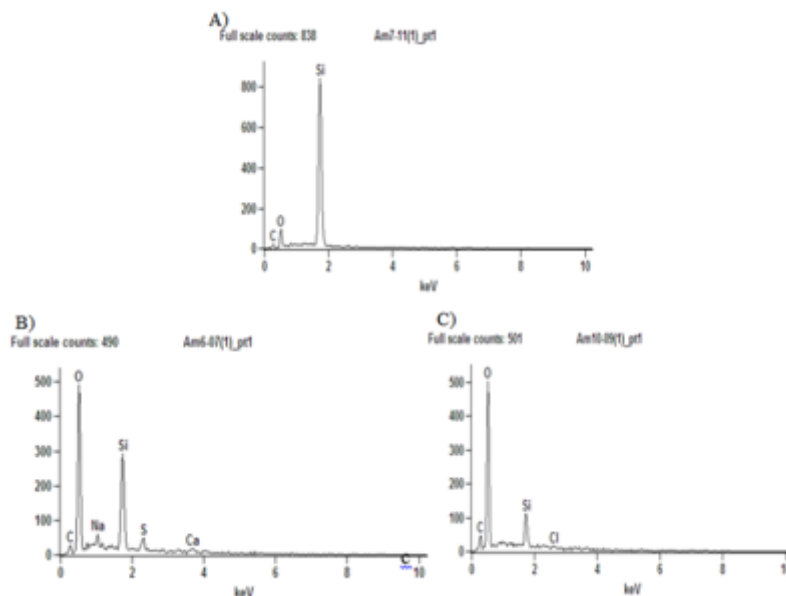
Figura 3. Gráfico dos modos vibracionais no FTIR das amostras de carvões onde CA-Ac é carvão ativado com acetato de sódio e CA-HCl é carvão ativado com ácido clorídrico.



Fonte: Do autor.

O DLS do carvão antes da ativação, mostra a presença dos elementos químicos carbono, oxigênio e silício (figura 4A), com predominância desse último. A amostra de carvão ativado com acetato de sódio (figura 4B) revelou átomos de sódio e enxofre em sua composição. O sódio surgiu a partir da ativação com acetato de sódio e o enxofre pode ter origem de impurezas da própria substância ativadora. Por outro lado, o carvão ativado com ácido clorídrico agregou o átomo de cloro na composição da amostra (figura 4C). Além disso, átomos de silício, oxigênio e carbono, também, apareceram como átomos predominante dos dois tipos de carvões.

Figura 4. Gráficos de DLS das amostras de carvões sem ativação (A), CA-Ac (B) e CA-HCl (C).



Fonte: Do autor.

A obstrução dos poros do carvão ativado com HCl e a semelhança na composição atômica, induziu a equipe dessa pesquisa a descartar esse reagente ativador, dessa forma, o acetato de sódio foi definido como único para ativar as amostras de carvões produzidos a 400 °C. Após isso, partiu-se para as sínteses das nanopartículas.

Análise dimensional e de estabilidade das nanopartículas

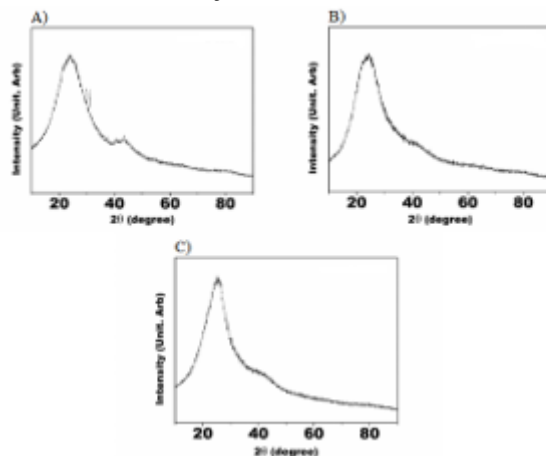
A metodologia seguida propiciou uma síntese de Np-Ag prática e eficiente, resultando em uma suspensão coloidal de coloração amarela com rendimento real de reação de 60%. Enquanto que a síntese das Np-Fe resultou em uma solução coloidal escura com rendimento de 65%. Observou-se um valor negativo para o potencial zeta das Np-Ag, -31mV, indicando uma boa estabilidade em suspensão. Enquanto que as Np-Fe apresentaram carga eletrostática de superfície de -43mV. Com esses resultados é possível garantir que em ambos os casos os materiais são significativamente estáveis em suspensão aquosa. O size revelou tamanho médio de diâmetro de 50 nm e 66 nm para as Np-Ag e Np-Fe, respectivamente.

Cristalinidade dos nanocompósitos

As imagens abaixo mostram os difratogramas de raio x do carvão ativado puro (5A), carvão ativado com nanopartículas e prata (5B) e carvão ativado com nanopartículas de óxido de ferro (5C). Na 5A, carvão puro, aparece um pico de maior dimensão em torno de 27,4° que corresponde ao plano de carbono. Em 44,9° há um outro pico mais discreto

correspondente ao plano de carbono grafite. Zhang et al. (2004) atribuíram esses dois picos a natureza amorfa de carbono.

Figura 5. Gráficos difração de raio x do C-Ac (A), C-Ag (B) e C-Fe (C).



Fonte: Do autor.

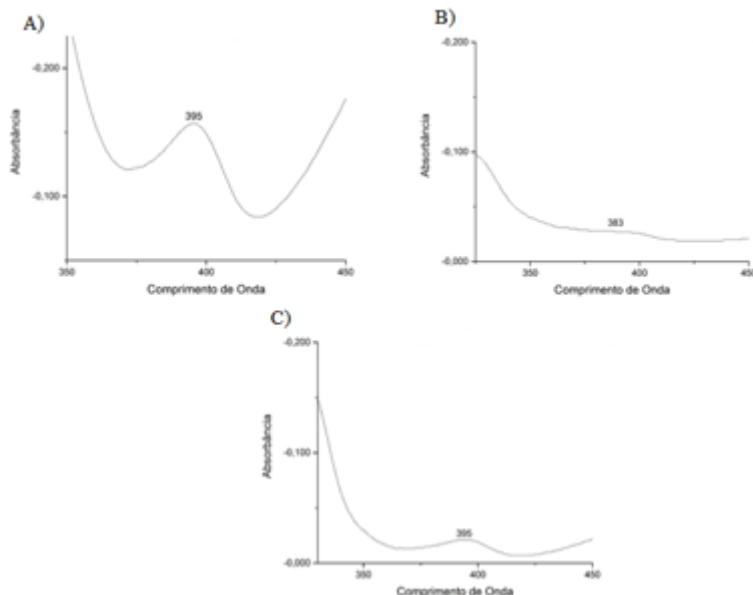
O difratograma dos C-Ag (5B) e C-Fe (5C) revelaram uma natureza menos amorfa dos materiais, isso porque, o pico em $44,9^\circ$ que apareceu em 5A, praticamente sumiu nesses dois carvões. É aceitável que a natureza cristalina desses nanocompósitos seja aflorada devido a intercalação de nanopartículas, haja visto que, estas possuem natureza de rearranjo de átomos mais organizadas em relação aos átomos do carvão. Além disso, discretos picos entre $39,3^\circ$ e $79,4^\circ$ foram detectados nas amostras de C-Ag. Em estudos semelhantes aos dessa pesquisa, Srinivasan et al., (2013) encontraram picos de prata entre $34,5^\circ$ (111) e $77,6^\circ$ (311). Enquanto isso, o C-Fe apresentaram discretos picos entre 35° e 64° , especialmente picos em $35,6^\circ$, $43,6^\circ$, $57,4^\circ$ e $63,1^\circ$. Barcelos (2016) encontrou picos de magnetita em $35,8^\circ$ (311), $43,6^\circ$ (400), $57,4^\circ$ (511) e $63,1^\circ$ (440). Esses resultados reforçam que as nanopartículas estão confinadas no interior dos poros dos carvões.

Análise de adsorção de azul de metileno

Na concentração de 20 mg/L de azul de metileno foi observada expressiva adsorção do corante pelos nanocompósitos. A figura 6A mostra a espectrofotometria da solução do corante que ficou em contato com o carvão puro (absorção em 395 nm). Por outro lado, a solução que ficou em contato com os nanocompósitos absorveu com fraca intensidade na mesma região (395 nm), figuras 6B e 6C. Isso ilustra o quanto que os materiais se mostraram eficientes na adsorção do corante, mais ainda para o C-Fe. Essa nanopartícula possui propriedade magnética que justifica esse maior poder de adsorção, enquanto que as de prata, sua magnetização é relativamente baixa. As concentrações de

azul de metileno das soluções emergidas nos nanocompósitos reduziram para 1,4 mg/L e 3,4 mg/L em Np-Fe e Np-Ag, respectivamente.

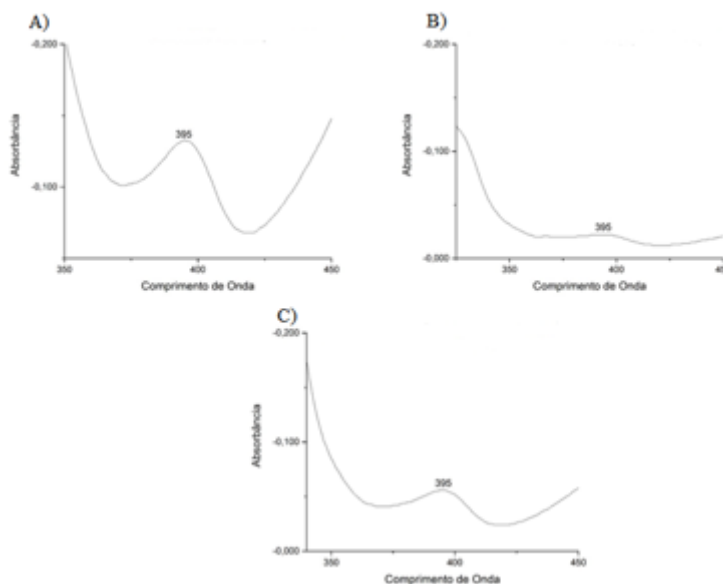
Figura 6. Gráficos de UV-Vis das amostras de água dos carvões C-400 puro (A), C-400 Acetato de sódio (B) e C-400 ácido clorídrico (C) em solução de azul de metileno a 20 mg/L.



Fonte: Do autor.

Para concentração de 100 mg/L de azul de metileno foi observada semelhante comportamento, principalmente pela expressiva adsorção do corante pelos nanocompósitos. O gráfico abaixo mostra a espectrofotometria da solução de azul de metileno pura e da solução que ficou em contato com os nanocompósitos. Essas últimas apresentaram, também, fraca adsorção em comparação com o corante puro. Como no teste anterior, o nanocompósito a partir de magnetita mostrou-se mais eficiente na adsorção do corante e sua concentração reduziu para 7,5 mg/L. Enquanto que o de prata reduziu para 17,8 mg/L.

Figura 7. Gráficos de UV-Vis das amostras de água dos carvões C-400 puro (A), C-400 Acetato de sódio (B) e C-400 ácido clorídrico (C) em solução de azul de metileno a 100 mg/L.

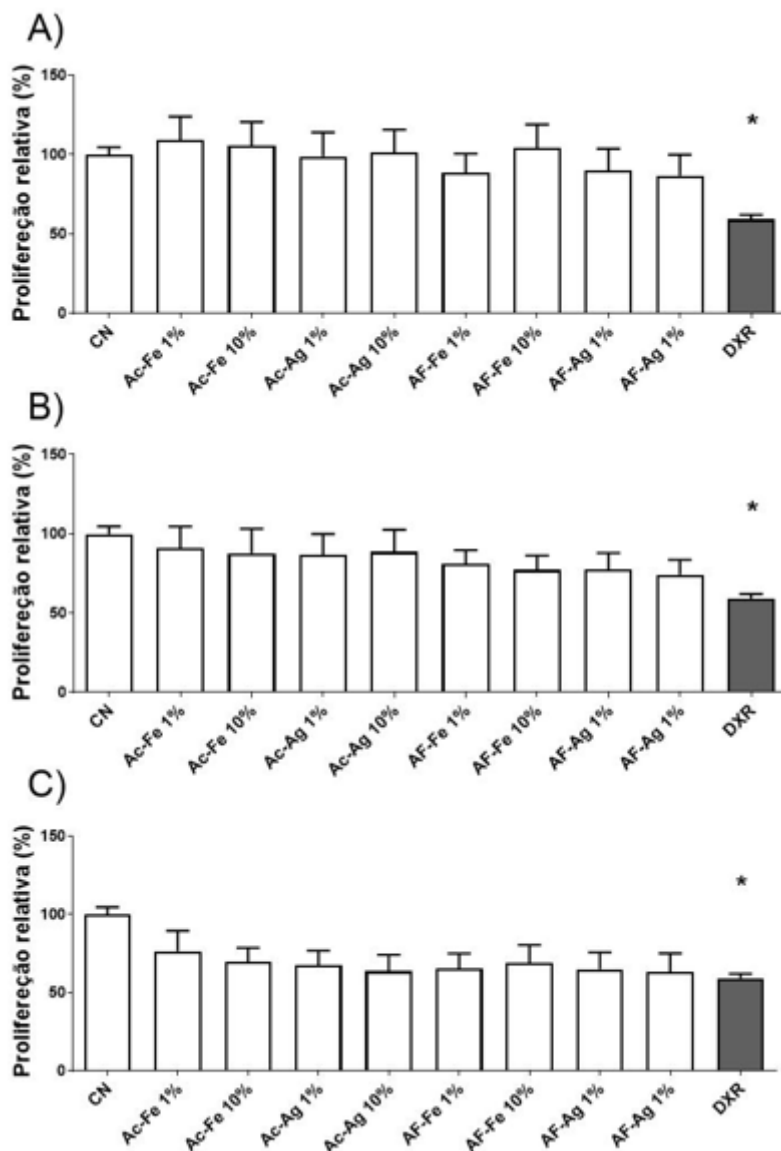


Fonte: Do autor.

Citotoxicidade dos carvões

Na figura 8, é mostrado a comparação dos efeitos citotóxicos das amostras de águas filtradas com os diferentes carvões. Na figura 8A, se observa as amostras de água filtradas em carvões obtidos na temperatura de 400°C. Observa-se que nenhuma das amostras de água nas concentrações de 1% ou 10% apresentaram efeitos citotóxicos em comparação ao controle negativo ($p > 0,05$ para todas as comparações). O tratamento com DRX diminuiu a viabilidade celular ($p < 0,5$) em comparação ao controle negativo, demonstrando que as células eram capazes de responder a estímulos citotóxicos. Não foi observado alterações na proliferação relativa pela exposição as diferentes concentrações de amostras de água filtradas com carvões obtidos a 500°C (figura 8B) ou obtidos a 600°C (figura 8C, $p > 0,05$ para todas as comparações). Esse resultado sugere a viabilidade de se empregar a tecnologia dos carvões de bambu com nanopartículas de prata e/ou ferro no tratamento de água para consumo humano.

Figura 8. Efeitos das amostras de águas filtradas por carvões a diferentes temperaturas e nanopartículas sobre a proliferação celular. (A) Amostras de águas filtradas por carvões obtidos a temperatura de 400°C, (B) 500°C ou (C) 600°C. CN – controle negativo – meio de cultura. DXR – controle positivo – doxorubicina. * $p < 0,05$ em comparação ao CN.



Parâmetros físico-químicos das amostras de água

A tabela 1 mostra o resultado dos parâmetros físico-químico da amostra de água bruta, isto é, coletada e analisada sem passar por qualquer processo de purificação, da amostra de água filtrada com o carvão puro e das amostras de água filtrada com os nanocompósitos de carvão Np-Ag e Np-Fe. Os resultados mostraram diferenças significativas entre a maioria dos parâmetros.

A amônia, por exemplo, que apresentou concentração de 1,72 mg/L para água bruta, reduziu para 1,33 mg/L quando a água foi filtrada com o carvão puro. A redução foi ainda maior para os nanocompósitos de ferro e prata que apresentaram 1,25 mg/L e 0,60 mg/L, respectivamente. A amônia é um composto tóxico para o organismo humano

por se liga aos intermediários do ciclo de Krebs promovendo a depleção de ATP ou por precisar de íons H^+ o que pode desencadear quadros de alcalose metabólica. Portanto, a expressiva redução na concentração dessa substância pelos nanocompósitos, especialmente o de Fe, que reduziu em mais de 70%, revela a possibilidade de se desenvolver um filtro com tecnologia eficiente, de baixo custo e fácil acesso.

A condutividade das amostras diminuíram após a filtração em todos os tipos de carvões. Antes da filtração, seu valor era de 120,0 uS/cm, após passar pelo carvão bruto, reduziu para 60,0 uS/cm. Essa redução foi ainda maior para os nanocompósitos que apresentaram 50,0 uS/cm (C-Fe) e 45 uS/cm (C-Ag). A alta condutividade elétrica verificada em solos salinos se devem as altas concentrações de sais, podendo restringir a absorção de nutrientes, interferir no desenvolvimento das plantas e reduzir a níveis antieconômicos, em função da elevação do potencial osmótico. É aceitável que a concentração de sais foram reduzidos, haja visto que, o carvão puro, por si só, pode reter íons devido a sua natureza eletrônica de superfície possuir átomos com cargas parciais.

Tabela 1. Parâmetros físico-químico das amostras de água

Parâmetros/Unidade	Resultados H ₂ O-bruta	Resultados H ₂ O-carvão	Resultados H ₂ O-NpAg	Resultados H ₂ O-NpFe	Valor Máximo Permitido CONAMA347 de 17/03/2005
Amônia (mg/L)	1,72	1,33	1,25	0,60	-
Condutividade (uS/cm)	120,0	60,0	60,0	55,0	-
DBO (mg/L)	8,0	1,0	1,5	1,3	5,0
DQO (mg/L)	20,0	11,0	6,7	8,6	-
Fosfato (mg/L)	4,1	0,32	0,70	0,61	-
Nitrato (mg/L)	6,4	4,2	6,1	2,6	10 mg/L
Nitrito (mg/L)	0,053	0,036	0,009	0,006	1 mg/L
OG (mg/L)	34,0	0,0	0,0	0,0	Ausente
OD (mg/L)	5,9	4,7	4,4	4,8	5,0
pH (-)	6,12	6,83	6,24	6,93	6,0 – 9,5
Temperatura (°C)	25,2	25,1	25,2	25,2	-
Turbidez (NTU)	63,2	4,10	3,37	3,72	100

Fonte: Elaborada pelo autor.

DBO = Demanda bioquímica de oxigênio
DQO = Demanda química de oxigênio
OG = Óleos e graxas
OD = Oxigênio dissolvido

A amostra de água bruta apresentou DBO e DQO 8,0 e 20,0, respectivamente, valor muito elevado, até mesmo acima do valor permitido pelo CONAMA347 que é de 5,0. O lago onde a coleta foi realizado é impróprio para banho e consumo humano, isso porque, o ambiente é habitat de animais como peixes pirarucu (que é de grande porte), jacarés e até capivaras que se alimentam e defecam ali mesmo. De modo geral, quanto maior for DQO e a DBO maior é o nível de poluição da água. Por outro lado, as amostras

de água filtradas apresentaram expressiva redução no valor de DBO e DQO, de modo que os valores para água filtrada com carvão puro foram 1,0 e 11,0, já a amostrada filtrada com carvão Np-Ag foram de 1,5 e 6,7 e as de carvão Np-Fe foram de 1,3 e 8,6, respectivamente. Esses resultados expressam o quanto os carvões foram eficientes para a redução da poluição biológica e química das amostras de água. O motivo disso se deve em decorrência da retenção de matéria orgânica e química das amostras pelos poros dos carvões.

Os íons fosfatos também apresentaram significativa redução de concentração, apresentando concentrações de 0,32 mg/L, 0,70 mg/L e 0,61 mg/L para água filtrada com carvão puro, com o carvão Np-Ag e carvão Np-Fe, respectivamente. O principal efeito do aumento da concentração de fósforo nas águas superficiais é a eutrofização, responsável pelo aparecimento de cianotoxinas (microcistinas). As microcistinas constituem um risco para a saúde pública, havendo então uma grande necessidade de evitar a contaminação das águas com fósforo. Já a presença de nitrato na água pode causar hipotensão postural (devido à vasodilatação), dores de cabeça, diarreia e mal-estar. Apesar de serem nutrientes essenciais para as plantas, podem, em excesso, causar problemas significativos na água, isto é, juntamente com o fósforo, podem acelerar a eutrofização dos lagos.

Para água bruta, a concentração de nitrato foi de 6,4 mg/L enquanto que para água filtrada apenas com carvão, com carvão Np-Ag e com carvão NpFe₂O₃ foi de 4,2, 6,1 e 2,6, respectivamente. Já o nitrito foi de 0,053 mg/L para água bruta e 0,036, 0,009 e 0,006 para as amostras de água filtrada com os carvões puro, Np-Ag e Np-Fe, respectivamente. Tanto nitrato quanto nitrito foi reduzido mais intensamente pelo carvão Np-Fe, isso pode ser justificável pela maior interação eletrostática que há entre um óxido metálico e ânions.

O índice de óleos e graxas presentes na água bruta do lago foi de 34 mg/L, valor considerado alto e bem longe do exigido pelo CONAMA347 que é de 'ausente'. Esses contaminantes apresentam elevado potencial de toxicidade, capacidade de bioacumulação provocando danos irreparáveis para flora e fauna aquáticas, pois interferem nas trocas gasosas e transferência de energia, afetando a saúde humana. Por outro lado, todas as amostras de água filtrada tiveram remoção total de óleos e graxa, uma total adsorção dessas substâncias pelos carvões.

Apesar da sobrevivência de espécies aquáticas está diretamente ligada à presença de oxigênio dissolvido (OD) na água, o CONAMA347 exige um limite de 5,0 mg/L dissolvido para consumo humano. Enquanto a água bruta do lago apresentou aceitável concentração (5,9 mg/L) de OD para vida aquática, as amostras de água filtradas

apresentaram valores abaixo do limite permitido para consumo humano, de modo que as concentrações foram de 4,7 mg/L, 4,4 mg/L e 4,8 mg/L para as amostras de água do carvão puro, carvão Np-Ag e carvão Np-Fe, respectivamente.

Sabe-se que idealmente o pH do sangue humano deve ser discretamente alcalino, permanecendo entre 7,35 e 7,45. Um pH superior ou inferior a esta faixa pode trazer prejuízos ao equilíbrio interno do organismo (homeostase), com sérias consequências à saúde. Um pH ácido no sangue e fluídos corporais provoca redução na capacidade do corpo de absorver nutrientes e minerais, além de diminuir a eficácia das células na produção de energia. Portanto, o CONAMA347 permite valores de pH de água para consumo entre 6 e 9,5. Os valores encontrados para todas amostras de água, incluindo a água bruta, estiveram dentro do intervalo permitido, apresentando 6,12, 6,83, 6,24 e 6,93 na temperatura de 25,2 °C, para as amostras de água bruta, carvão puro, C-Ag e C-Fe, respectivamente. Apesar de suave, houve um aumento na alcalinidade das amostras de água filtrada, se distanciando do extremo valor ácido.

As principais causas da turbidez da água são: presença de matérias sólidas em suspensão (silte, argila, sílica, coloides), matéria orgânica e inorgânica finamente divididas, organismos microscópicos e algas. Apesar do CONAMA determinar valor de turbidez máxima de 100 NTU para água potável, o valor máximo permitido desse parâmetro para o ser humano ingerir é de 5,0 NTU, valor esse muito acima do encontrado na amostra de água bruta do lago que foi de 63,2 NTU. Enquanto isso, as amostras de água filtradas ficaram translúcidas ao ponto de obter valores de turbidez abaixo do máximo permitido, 4,10 NTU, 3,37 NTU e 3,72 NTU para as amostras de água de carvão puro, C-Ag e C-Fe, respectivamente.

Coliformes fecais e totais das amostras de água

A presença de coliformes totais na água potável indica que o sistema pode estar contaminado por fezes ou vulnerável à contaminação fecal. A Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde (Portaria de Potabilidade) estabelece que seja verificada, na água para consumo humano afim de garantir sua potabilidade, a ausência de coliformes totais e *Escherichia coli* e determinada contagem de bactérias heterotróficas.

Tabela 2. Resultado dos coliformes totais e fecais em UFC.100 ml⁻¹

Amostras	Coliformes totais	Coliformes fecais
H ₂ O-bruta	120,0	26,0
H ₂ O-carvão	45,0	13,0
H ₂ O-NpAg	0,0	0,0
H ₂ O-NpFe	19,0	9,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 2 mostra o resultado das análises de coliformes fecais e totais para as amostras de água coletada e filtradas. A amostra de água bruta apresentou concentração de coliformes fecais e totais de 120,0 UFC.100⁻¹ e apesar da expressiva redução dessa concentração nas amostras de água filtrada com carvão puro e carvão-Np-Fe, a água desses filtros não poderia ser consumida. Por outro lado, o filtro do carvão Np-Ag eliminou completamente os coliformes da amostra de modo que isso reforça a teoria da eficiência das nanopartículas de prata como um potente agente bactericida.

4 CONCLUSÃO

Os parâmetros físico-químicos mostraram que os filtros foram eficientes na purificação da água a ponto de torna-se própria para consumo humano, com destaque para OG que foram removidos completamente da amostra de água após filtração. Tanto o filtro sem nanopartículas quanto o que continha Np-Fe removeram significativamente os coliformes fecais e totais das amostras de água, enquanto que o que continha Np-Ag removeu completamente. Portanto, a combinação de carvão ativado feito a partir do bambu e funcionalizado com nanopartículas de prata ou óxido de ferro, se mostrou eficiente para descontaminação de água para consumo humano pois descontaminou as amostras de água, eliminou coliformes fecais e não apresentou citotoxicidade *in vitro*.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). (2005) **Standard methods for the examination of water and waste water**. 21. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association.

ARAÚJO, E. A. **Caracterização físico-química e ação antimicrobiana de nanopartículas de prata obtidas por uma nova síntese**. Viçosa, MG. 2010. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

BORGES, F. M. et al. **Desenvolvimento e criação de uma unidade produtiva de carvão ativado**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 21.out.2003, Ouro Preto, MG. Anais... Rio de Janeiro: ABEPRO, 2003. Disponível em:. Acesso em: 02 Fevereiro 2020.

BRITO, J. O.; FILHO, M. T.; SALGADO, A. L. B. **Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, IPEF, nº 36, p.13-17, agosto, 1987.

BARCELOS, A. M. **Sistemas nanocompósitos carvão/óxido de ferro para remoção de pesticida de água**. Rio de Janeiro, RJ. 23p, 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CABALA, G. V. E. **Desenvolvimento de filtros cerâmicos impregnados com nanopartículas de prata para desinfecção de água potável**. Natal, RN. 136p, 2013. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

COSTA, T. M. S. **Estudo da viabilidade técnica do emprego do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schard como carvão vegetal**. São Paulo, SP. 74p, 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – IPEN, Universidade de São Paulo.

DRUMOND, P. M., WIEDMAN, G. (org.). **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. 1ª ed. Rio de Janeiro, RJ. 655p. Ed. ICH, 2017.

GANVIR, V., KALYAN, D. **Removal of fluoride from drinking water using aluminum hydroxide coated rice husk ash**. 185, 1287-1294, 2011. Journal of Hazardous Materials. Disponível em:<<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21074319>> Acesso em 11 de setembro de 2016.

GORGULHO, H. F.; MESQUITA, J. P.; GONÇALVES, F.; PEREIRA, M. F. R.; FIGUEIREDO, J. L. **Characterization of the surface chemistry of the carbon materials by potentiometric titrations and temperature-programmed desorption**. Carbon, v. 46, p. 1544-1555, 2008.

HAYASHI, J. et al.. Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation. **Carbon**, v. 38, p. 1873-1878, 2000.

IMBROISI, B. A. **Uso de bambu nativo acreano *Guadua weberbaueri* Pilger para o desenvolvimento de um carvão funcional em um sistema de baixa tecnologia.** Rio Branco, AC. 122p, 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Bionorte, Universidade Federal do Acre.

KAUR, R. et al. **Synthesis and surface engineering of magnetic nanoparticles for environmental cleanup and pesticide residue analysis: A review.** Journal of Separation Science, vol. 37, p. 1805 – 1825, 2014.

KYZAS, G. Z.; MATIS, K. A. **Nanoadsorbents for pollutants removal: a review.** Journal of Molecular Liquids, v. 203, p. 159-168, 2015.

LEAL, Paulo. V. B; GREGÓRIO, Airton M; OTONI, Emiret; SILVA, Paulo R. da; KRAUSER, Maíke de O; HOLZBACH, Juliana C. **Estudo da Adsorção do Corante Azul de Metileno em Resíduos de Babaçu.** Journal of Biotechnology and Biodiversity. Gurupi, v. 3, n.4, p. 166-171, Nov. 2012.

LODOÑO, X., ZURITA, E. **Two new species of *Guadua* (Bambusiodeae: Guaduiniae) from Colombia and Bolivia.** Journal of the Botanical Research Institute of Texas, v. 2, p. 25-34. 2008.

LODOÑO, X. **Dos nuevos especies de *Guadua* para el Perú.** Journal of Botanical Research Institute of Texas, v. 7, p. 145 – 153, 2013.

MACEDO, J. S. **Aproveitamento dos resíduos do beneficiamento de fibras de coco na obtenção de um eco-material: carbono ativado mesoporoso.** São Cristóvão, SE. 73p, 2005. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

MELO JR, M. A.; SANTOS, L. S. S.; GONÇALVES, M. DO C.; NOGUEIRA, A. F. **Preparação de nanopartículas de prata e ouro: um método simples para a introdução da nanociência em laboratório de ensino.** Química Nova, Vol. 35, p. 1872-1878, 2012.

NIEDERSBERG, C. **Ensaio de adsorção com carvão ativado produzido a partir da casca do tungue (*Aleurites fordii*), resíduo do processo de produção de óleo.** Santa Cruz do Sul, RS. 65p, 2012. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC.

PEREIRA, J.O.; AZEVEDO, J. L.; PETRINI, O. **Endophytic fungi of *Stylosanthes*: a first report.** Mycologia, v. 85, p. 362-364, 1993.

PINTO, N. O., HERMES, C. L. **Sistema simplificado para melhoria da qualidade da água consumida nas comunidades rurais do semi-árido do Brasil.** Jaguariúna, SP. Embrapa Meio Ambiente, 47p., 2006.

PORTARIA Nº 2.914, DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html> Acesso em 17 de dezembro de 2019.

SRICHAROENCHAIKUL, V. et al. **Preparation and Characterization of Activated Carbon from the Pyrolysis of Physic Nut.** *Waste, Energy & Fuels*, v. 22, n. 1, p. 31-37, 2007.

SRINIVASAN, N. R.; SHANKAR, P. A.; BANDYOPADHYAYA, R. **Plasma treated activated carbon impregnated with silver nanoparticles for improved antibacterial effect in water disinfection.** *Carbon*, v. 57, p. 1–10, 2013.

ZHANG, S.; FU, R.; WU, D.; XU, W.; YE, Q.; CHEN, Z. **Preparation and characterization of antibacterial silver-dispersed activated carbon aerogels.** *Carbon*, v.42, p.3209–3216, 2004.