EATL – ESTUDO ESTATÍSTICO DA PIRÓLISE DA CASCA DA *MORINGA OLEIFERA* PARA PRODUÇÃO DE MATERIAIS ADSORVENTES

Caio Henrique da Silva[1]; Mara Heloisa Neves Olsen Scaliante[1].

1. Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Química, Maringá, Paraná, Brasil.(pg402983@uem.br)

As sementes *de Moringa Oleifera*, em particular, têm sido consideradas como um dos mais importantes floculantes naturais disponíveis comercialmente para tratamento de água e águas residuais devido à sua capacidade de remover muitos poluentes. Então, o presente trabalho tem como objetivo a produção de materiais bioadsorventes por meio de pirólise utilizando biomassa da casca de semente de *Moringa oleifera*, onde foi investigado por análises estatísticas as váriaveis de rendimento da biomassa e teores de carbono em diferentes fatores investigados no processo de pirólise. Os *biochars* produzidos foram ativados com ácido fosfórico (H_3PO_4) e Hidróxido de potássio (KOH) a fim de comparar com o *biochar* in natura as modificações e mecanismos de adsorção do fármaco metronidazol presente no meio aquoso. Através dos testes de adsorção demonstrou que o *biochar* ativado com KOH obteve os melhores resultados na remoção do fármaco.

Palavras-chave: Pirólise; *Moringa Oleífera*; *Biochar*

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o setor industrial desenvolveu-se rapidamente, na qual fornece a melhoria das condições e qualidade de vida das pessoas. No entanto, o desenvolvimento da indústria também causou alguns problemas ambientais. Com o rápido aumento dos tipos e teores de poluentes, a situação dos recursos hídricos está cada vez pior.

Devido a urbanização a indústria farmacêutica vem se expandido tanto nos seus produtos, em ressalta os antibióticos como na geração de resíduos. Com a crescente demanda para satisfazer as necessidades humanas, os fármacos teve um grande aumento na escala de produção, onde são geridos novos recursos a fim de descobrir novos fármacos e também para a produção mais eficiente (BRAZ, 2014; YADAV *et al*., 2022).

Os contaminantes emergentes (CE) são um grupo de poluentes químicos que têm potenciais ameaças à saúde humana e ao meio ambiente ecológico. São questões orgânicas muito complexas, geralmente existem na água. Os CE geralmente vêm de produtos farmacêuticos, produtos de cuidados pessoais, produtos químicos endócrinos, antibióticos, poluentes orgânicos persistentes, subprodutos de desinfecção e outros produtos químicos industriais (BO *et al*., 2015). Esses CE persistem no ambiente e duram muito tempo. Os CE estão constantemente circulando, migrando e transformando-se na mídia ambiental. Embora as concentrações desses CE sejam relativamente baixas em água, elas podem ter potenciais impactos no meio ambiente e na saúde humana através da cadeia alimentar após serem acumuladas por organismos (GOMES *et al*., 2017).

Uma das técnicas de baixo custo e eficiente na remoção de contaminantes é a adsorção no qual é um processo de superfície pelo quais adsorvidos (moléculas, íons, átomos) aderem a um substrato por meio de produtos químicos ou interações físicas (OK *et al*., 2015).

Biochar é um material criado por meio da pirólise utilizando diferentes tipos de biomassa. Pode ser usado não apenas como combustivel na geração de calor e energia, mas também como um adsorvente (CAO *et al*., 2019; TOMCZYK *et al*., 2020). As matérias-primas são abundantes e de baixo custo, obtidas principalmente de origem animal e resíduos de plantas, como sementes, cascas de sementes, bagaço, residuos orgânicos e grãos da produção

agrícola (HOSLETT *et al*., 2019; TAN *et al*., 2015). *Biochar* exibe um alto teor de carbono, seguido por hidrogênio e nitrogênio, bem como concentrações

A pirólise lenta da biomassa decompõe termicamente compostos de elevado peso molecular em fragmentos menores. Este processo envolve a desidratação e a descarboxilação a baixas temperaturas (FUNAZUKURI *et al*., 1986; HAJALIGOL *et al*., 2001; 20 PHAN *et al*., 2008).

Moringa oleifera é uma árvore de madeira macia e de rápido crescimento da família Moringaceae, nativa das áreas sub-Himalaia do Norte da Índia (BHATNAGAR *et al*., 2013). Uma espécie entre outras 13 espécies reconhecidas, *Moringa oleifera* é cultivada principalmente em países africanos, asiáticos e na maioria dos países do Oriente Médio (LEONE *et al*., 2016). Têm sido consideradas como um dos mais importantes floculantes naturais disponíveis comercialmente para tratamento de água e águas residuais (Ang e Mohammad, 2020) devido à sua capacidade de remover muitos poluentes.
Objetivo deste trabalho é avaliar por análises estatistícas as condições ideais para a pirólise da casca da semente da *Moringa Oleífera* para a produção de *biochars* ativado para remoção de contaminantes do meio aquoso.

MATERIAL E MÉTODOS

Matéria prima

As sementes da *Moringa Oleifera* foram gentilmente cedidas por uma empresa privada do Noroeste do estado do Paraná - Brasil. As sementes foram descascadas e somente à casca utilizada, normalmente elas são descartadas se tornando resíduos, assim de ponto econômico e ambiental é de grande interesse. Para utilização como matéria prima do módulo de pirólise, as cascas da *Moringa* foram secas em estufa com circulação de ar a 65ºC por 24h, por possuir um tamanho relativamente pequeno as cascas foram submetidas em seguida aos ensaios de Pirólise.

Preparação dos *biochars*

Os ensaios de Pirólise são baseados de acordo com uma metodologia pré-estabelecida. A unidade pirolítica utilizada é composta por um reator de leito fixo de aço inox com entrada e saída de gases (4 cm de diâmetro x 50 cm de altura) aquecido por um forno tubular bipartido (Sanchis, potência 3 kW, 220 V, temperatura máxima de operação de 1200 °C).

Três fatores foram investigados (Temperatura, Taxa de Aquecimento e Tempo de Residência) para avaliar-se a influência na produção do biocarvão. Com isso o planejamento experimental utilizado foi de acordo com o fatorial 2^3 com 3 fatores independentes executado pelo software Statistica 6.0.

Logo abaixo na Tabela 1 são apresentadas as condições de pirólise para cada corrida, onde as corridas possuem uma vazão de Nitrogênio constante de 150 $mL.min^{-1}$ e uma biomassa bruta de 26 gramas de casca da *Moringa* pirolisadas.

Análise imediata

Durante o processo de aquecimento da biomassa pelo processo de Pirólise é gerado três subprodutos, biogás, bio-óleo e o biocarvão. Para a presente pesquisa o foco principal é a obtenção do biocarvão, assim sendo necessário calcular o rendimento de cada corrida, assim com a equação 1 abaixo é possível determinar o rendimento em porcentagem do biocarvão produzido.

$$\frac{\text{Massa do biocarvao (g)}}{\text{Massa bruta (g)}} . 100 \qquad (1)$$

Análise elementar (CHN)

A análise elementar foi realizada na Central Analítica da Universidade de São Paulo para as amostras de biocarvão da casca de semente da *Moringa Oleifera* empregando-se um analisador CHN Analyser Series II – Perkin Elmer há uma temperatura de combustão a 925°C, com a finalidade de encontrar a porcentagem dos teores de carbono, hidrogênio e

Tabela 1. Condições de Pirólise

N° de corridas	Ordem das corridas	Temperatura °C	Taxa de aquecimento °C min^{-1}	Tempo de residência (min)	X1	X2	X3
1	2	500	10	40	-1	-1	-1
2	7	700	10	40	1	-1	-1
3	1	600	15	60	0	0	0
4	3	700	10	80	1	-1	1
5	4	500	20	80	-1	1	1
6	6	500	20	40	-1	1	-1
7	5	700	20	40	1	1	-1
8	9	500	10	80	-1	-1	1
9	8	700	20	80	1	1	1

nitrogênio nas amostras

Análise estatistica dos *biochars* produzido

Os *biochars* produzidos em 9 tratamentos diferentes foram analisados pelo software STATISTICA utilizando os resultados de teor de carbono e o rendimento de massa como fatores dependentes para definir apenas um tratamento que pudesse ser ativado e prosseguisse nos experimentos de adsorção. Para análise estatística foram usados ANOVA, efeitos estimados, valores preditos e desejabilidade.

Ativação Química do *Biochar* utilizando H_3PO_4

Nesta Metodologia adaptada de Belhamdi *et al.* (2019) foi utilizado Ácido Fosfórico H_3PO_4 (85% Synth) para ativar quimicamente o *biochar*, deste modo para impregnação do *biochar* com o H_3PO_4 utilizou-se uma razão de proporção 1:2 (m/v). Sendo assim 33g de *biochar* foram misturadas com 66 mL de H_3PO_4 em um agitador por 4 horas, houve um acréscimo de 200 mL de água deionizada para facilitar agitação, depois o material foi levado em estufa para ser seco a 105°C por 24 horas. Logo após as partículas foram submetidas ao processo de pirólise a uma temperatura final de 500°C mantendo-se por 60 minutos, com uma taxa de aquecimento lenta de 5°C/min e um fluxo constante de nitrogênio de 150 mL/min.

Ativação Química do *Biochar* utilizando KOH

Hidróxido de Potássio KOH (85% Synth) foi utilizado para ativar quimicamente o *biochar*, deste modo para impregnação do *biochar* com o KOH utilizou-se uma razão de proporção 1:4 (m/m). Para esta mistura como o KOH não tinha pureza de 100% houve um acréscimo baseado em cálculos matemáticos, sendo assim 35g de *biochar* foi misturado com 165g de KOH em um agitador aquecido a 210°C por 3 horas, houve um acréscimo de 200mL de água deionizada para facilitar agitação, depois o material foi levado em estufa para ser seco a 105°C por 24 horas. Logo após as partículas foram submetidas ao processo de pirolise a uma temperatura final de 850°C mantendo-se por 60 minutos, com uma taxa de aquecimento lenta de 5°C min^{-1} e um fluxo constante de nitrogênio de 150 mL min^{-1}(ARAÚJO *et al.*, 2022). Os *biochars* ativados foram lavados com 7 litros de água deionizada para retirar as impurezas, e em seguida foram submetidos ao processo de secagem em uma estufa a 105°C por 24 horas. Os *biochars* secos passaram pelo processo de moagem e peneirados em fração menor que 0,5mm.

Estudos de adsorção de Metronidazol

Soluções de metronidazol (MNZ) foram preparadas em uma concentração de 50 $mg.L^{-1}$ e 250 $mg.L^{-1}$ aproximadamente, por meio da dissolução de metronidazol obtido através de farmácia de manipulação em sachê com alta pureza (>99%) com água pura milli-Q *18.2* MΩ.cm. Para a leitura das concentrações de metronidazol foi utilizado espectro UV-VIS DR500 da marca HACH, em um comprimento de ondas de 320nm. Foi realizada a construção de curva de calibração.

Os experimentos de adsorção foram realizados em batelada, em duplicata. Foram adicionados separadamente em potes plásticos 25 mg de BCM, BCH_3PO_4 e BCKOH com 30 mL de solução de metronidazol, com concentração aproximadamente de 50 $mg.L^{-1}$ e 250 $mg.L^{-1}$. A solução teve um tempo de contato de 24h com o adsorvente, permanecendo-se nesse tempo sob agitação em uma incubadora shaker MA-420 a 150 rpm e temperatura aproximada de (25 ± 2°C). Logo após 24 horas, os experimentos foram filtrados por uma membrana (ha em ésteres de celulose 0,45µm) para separação do adsorvente com o a solução de MNZ. A concentração de MNZ foi determinada por espectroscopia de aborção na região UV_VIS.

Estudo da Influência do pH nos testes de adsorção.

A fim de avaliar a influência do pH foram preparadas soluções de 50 e 250 $mg.L^{-1}$ de metronidazol (MNZ) que foram ajustadas a pH variando de 2 a 12, foram feitos testes em cada pH pré-estabelecido 2, 4, 6, 6.7(pH natural), 8, 10 e 12. Para isso, cada um dos testes foi pesado 25mg de BCH_3PO_4 e BCKOH, e acrescentou-se 30mL de solução de metronidazol em pH ajustado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise Imediata e Análise Elementar (CHN)

Os rendimentos dos biochars produzidos variaram entre 30,76 e 38,07%, onde a temperatura foi o fator determinante, em temperaturas mais baixas tem uma maior preservação da biomassa, onde ocorre a carbonização, ao contrario das temperaturas mais elevadas que aumenta a decomposição da biomassa, os dados são apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Cálculo dos rendimentos dos *biochars*

Amostras (pela ordem de corrida)	Massa do *biochar* (g)	Rendimento *biochar* (%)
1	8,3	31,92
2	9,1	35,0
3	8,0	30,76
4	9,9	38,07
5	8,2	31,53

6	9,6	36,92
7	8,5	32,69
8	8,2	31,53
9	9,5	36,53

Os *Biochars* apresentaram uma quantidade de carbono variando entre 72,97% e 78,39% descrito na Tabela 3, onde quanto maior a quantidade de carbono, melhor os mecanismos de adsorção. Isso já era esperado, pois, de acordo com García (2018) a presença de altas quantidades de C, O e H estão relacionadas a natureza dos três principais polímeros estruturais presentes na maioria dos precursores lignocelulósicos: celulose, hemicelulose e lignina; bem como por alguns componentes não estruturais menores, como proteínas, clorofilas, cinzas, ceras, taninos (no caso da madeira) e pectina (na maioria das fibras).

Tabela 3. Resultados da análise elementar

Amostras (pela ordem de corrida)	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Nitrogênio (%)
1	77,34	2,64	1,92
2	72,97	2,89	2,31
3	77,48	1,76	1,92
4	75,29	2,66	2,12
5	78,39	2,22	1,55
6	73,62	2,93	1,93
7	76,63	1,88	1,74
8	77,44	2,06	1,72
9	73,80	2,21	1,98

Avaliação estatística dos *biochars* produzidos em diferentes fatores investigados

Os dados foram avaliados pela analise de variância (ANOVA) e do coeficiente de determinação para o Rendimento e o Teor de carbono, descritos nas tabela 4 e 5.

Para análise de rendimento a ANOVA demonstrou que apenas a temperatura é o fator determinante ($p < 0,05$) para a degradação da biomassa, onde esses dados possuem um coeficiente de determinação de 91,7%, com isso este modelo matemático é de confiabilidade para explicar o comportamento dos dados obtidos.

Em relação ao Teor de carbono a temperatura é o fator crucial para a mudança da % de carbono no *biochar*, tendo um p de 0,025, com um fator de coeficiente de determinação de 95,3%. Os Dados estudados como Temperatura, Taxa de aquecimento e Tempo foram relacionados uns com os outros, porém nenhuma dessas relações teve grande influência tanto para o Teor de carbono como Rendimento.

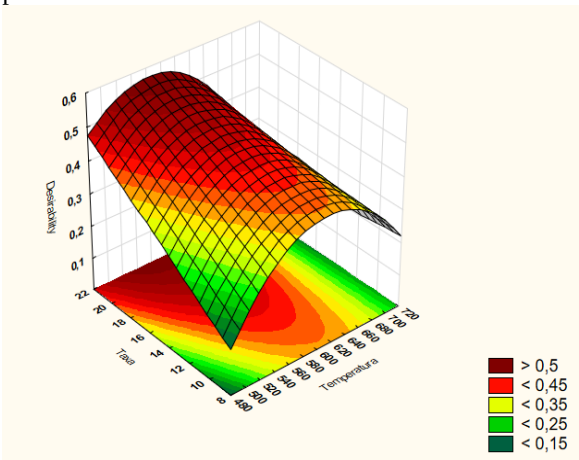

Figura 1. Gráfico de contorno dos *biochars* em função da Taxa de aquecimento e Temperatura.

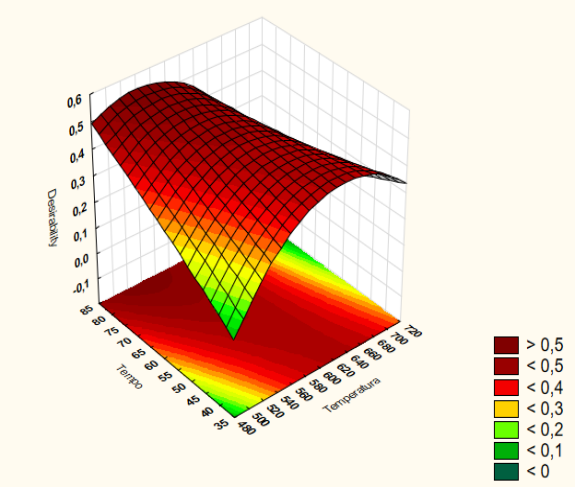

Figura 2. Gráfico de contorno dos *biochars* em função do Tempo e Temperatura.

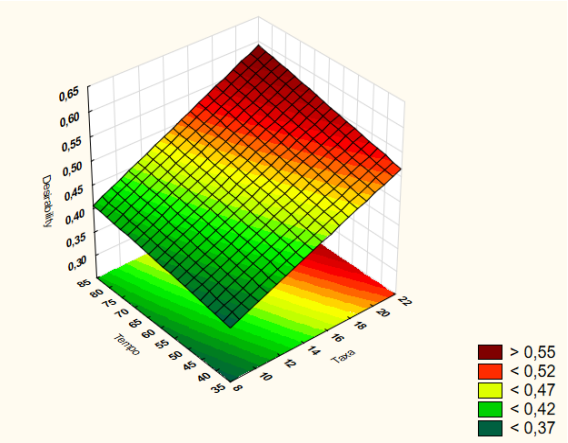

Figura 3. Gráfico de contorno dos *biochars* em função do Tempo e Taxa de aquecimento.

Os gráficos de contornos para os *biochars* produzidos em diferentes condições de Temperatura, Taxa de aquecimento e Tempo são apresentadas na figura 1, 2 e 3, onde essas condições são interagidas para se obter o fator de desejabilidade.

Na figura 1, o gráfico demonstra que a relação entre Temperatura e Taxa, o fator de desejabilidade é para Temperaturas médias (600°C) e com maiores Taxas de aquecimento (20°C min^{-1}). Na figura 2, o gráfico demonstra que a relação entre Tempo e Temperatura, o fator de desejabilidade é para Tempos mais altos (80 min) e Temperaturas um pouco mais baixas da média (560°C).

Na figura 3, o gráfico demonstra que a relação entre Tempo e Taxa, o fator de desejabilidade é para Tempos altos (80 min) e com maiores Taxas de aquecimento (20°C min^{-1}).

Assim para se escolher a condição ideal de produção do *biochar* para se produzir um material que tenha um alto aproveitamento de Rendimento e um Teor decarbono, a figura 4 descreve a desejabilidade para se adotar no experimento.

O fator de desejabilidade descrito no gráfico para se adotar na produção do BCM foram: utilizar Temperatura de 600°C, em uma Taxa de aquecimento de 15°C min^{-1} e um Tempo de residência de 60 min. Com esses dados de desejabilidade foram produzido o BCM e em seguida foram ativados para prosseguir nos testes de adsorção.

Tabela 4. Tabela da ANOVA para o rendimento

Rendimento					
Fator	**Soma dos quadrados**	**Grau de liberdade**	**Média quadrática**	**Estat. F**	**p-valor**
(1) Temperatura	49,75031	1	49,75031	19,88611	0,046786
(2) Taxa de aquecimento	1,22461	1	1,22461	0,48950	0,556575
(3) Tempo	0,07031	1	0,07031	0,02811	0,882281
1 e 2	1,85281	1	1,85281	0,74060	0,480160
1 e 3	2,58781	1	2,58781	1,03440	0,416142
2 e 3	0,32401	1	0,32401	0,12951	0,753386
Erro	5,00352	2	2,50176		
STQ	60,81340	8			
STQ – Soma Total dos Quadrados				**R^2 0,9177**	

Tabela 5. Tabela da ANOVA para o teor de carbono

Teor de carbono					
Fator	**Soma dos quadrados**	**Grau de liberdade**	**Média quadrática**	**Estat. F**	**p-valor**
(1) Temperatura	37,97561	1	37,97561	37,52505	0,025629
(2) Taxa de aquecimento	1,43651	1	1,43651	1,41947	0,355707
(3) Tempo	0,44651	1	0,44651	0,44121	0,574870
1 e 2	0,03001	1	0,03001	0,02966	0,879122
1 e 3	1,54001	1	1,54001	1,52174	0,342658
2 e 3	0,17701	1	0,17701	0,17491	0,716411
Erro	2,02401	2	1,01201		
STQ	43,62969	8			
STQ – Soma Total dos Quadrados				**R^2 0,9536**	

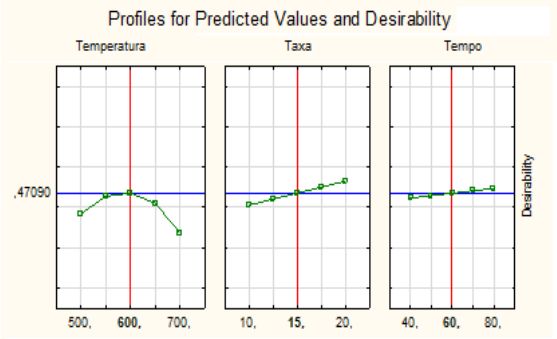

Figura 4. Valores preditos e desejabilidade dos *biochars* em função da Temperatura, Taxa de aquecimento e Tempo.

Estudos de adsorção de metronidazol

As Figura 5 e 6 mostra os testes realizados com o contaminante metronidazol no BCM e os ativados BCH_3PO_4 e BCKOH, antes da ativação o *biochar* teve uma taxa de remoção de 3,12% e uma capacidade de adsorção de 1,56 mg g^{-1}, logo após ativação estes valores tiveram um aumento de 19% e 9,5 mg g^{-1}, 82,2% e 308,25 mg g^{-1} respectivamente.

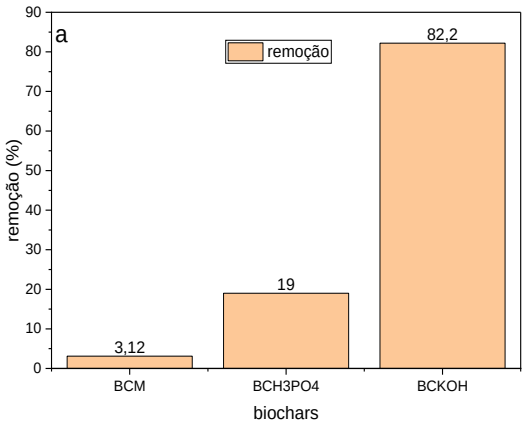

Figura 5. Testes de adsorção analisando a remoção.

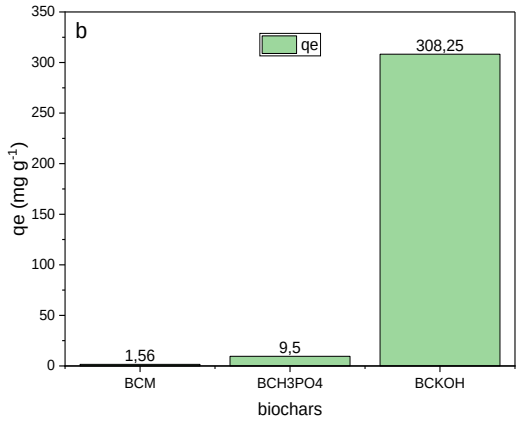

Figura 6. Testes de adsorção analisando a capacidade de adsorção.

Os agentes químicos ajudam a desenvolver a porosidade, por meio da desidratação e degradação da estrutura de biomassa (GARCIA, 2018). Aqui, é importante mencionar que a distribuição do tamanho dos poros e a área da superfície são determinadas pela razão entre o agente químico e o precursor. Durante a ativação utilizando o ácido fosfórico, o volume dos microporos é modificado de acordo com a concentração de ácido. A alta concentração de ácido inibe o desenvolvimento de microporosidade e promove a formação de meso e macroporos, que facilitam a adsorção de inúmeras moléculas de fármacos (ZUO *et al.*, 2010). O KOH tem grande potencial para a formação dos poros no *biochar*, além de degradar alguns grupos funcionais (GARCIA, 2018; CAO *et al.*, 2006).

Estudos de adsorção em diferentes pH

Os testes realizados anteriormente destacam-se que o BCM não possui resultados de adsorção interessantes para o metronidazol, assim os próximos testes serão apenas para os *biochars* ativado, onde a seguir nas figursa 7 e 8 são descritos testes em solução de metronidazol com diferentes pH variando de 2 a 12, tendo o ponto central como pH da natural da solução.

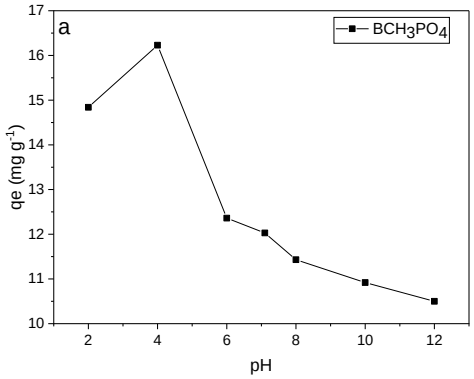

Figura 7. Testes de adsorção de MNZ em diferentes pH para BCH_3PO_4.

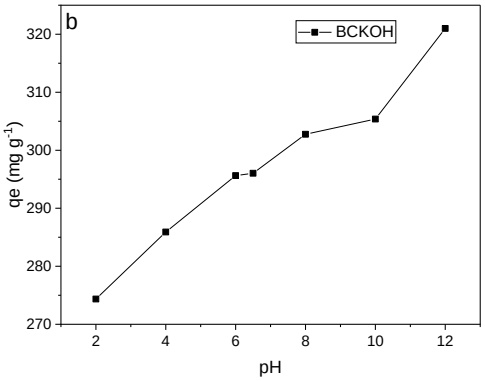

Figura 8. Testes de adsorção de MNZ em diferentes pH para BCKOH.

O pH influencia diretamente no processo de adsorção, o BCH_3PO_4 adsorvendo metronidazol teve maiores rendimentos em condições ácidas (pH<6), onde em pH 4 teve sua condição ideal um pouco acima de 16 mg g^{-1}, o metronidazol é de caráter ácido, tendo um pKa em torno de 2,58, portanto o pH>pKa, onde está ocorrendo uma perca de íons do MNZ, assim recebendo uma carga negativa. Com os ions H^+ presente na solução aumenta a interação eletrostática com o fármaco MNZ. Em outro estudo adsorvendo metronidazol obtiveram os maiores valores de eficiência em torno de pH 4 e 6,2, semelhantes a este trabalho (AARAB *et al*., 2020).

Para o BCKOH obteve maiores rendimentos de adsorção em pH alcalino, especificamente a maior taxa em pH 12, com a capacidade de adsorção proximamente de 320 mg g^{-1}, um dos grandes fatores seriam a grande concentração de íons OH^- que estariam tendo uma ligação eletrostática com os íons H^+ do fármaco. Adsorvendo metronidazol em materiais a base de grafeno apresentou melhores eficiências em pH alcalino, onde uma das hipóteses que ao elevar o pH consideravelmente há uma diminuição da solubilidade dos compostos aromáticos, promovendo as interações hidrofóbicas (CARRALES-ALVARADO *et al*. 2020).

CONCLUSÃO

Foram investigados mecanismos que possam ter melhores rendimentos e teor de carbono na pirólise da casca da *Moringa*, para o seu uso como bioadsorvente, análise estatistica demonstrou que temperatura de 600°C, taxa de aquecimento de 10°C min^{-1} e tempo de 60 minutos são ideais para esses aspectos. Os *biochars* ativado tiveram melhores resultados para adsorção de metronidazol, onde o ativado com KOH obteve uma capacidade de adsorção de 308,25 mg g^{-1}, sendo assim viável o seu uso.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela manutenção de bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

AARAB, N., HSINI, A., ESSEKRI, A., LAABD, M., LAKHMIRI, R., ALBOURINE, A. Removal of an emerging pharmaceutical pollutant (metronidazole) using PPY-PANi copolymer: Kinetics, equilibrium and DFT identification of adsorption mechanism. **Groundwater for Sustainable Development.** v. 11, p. 100416, 2020

ANG W.L., MOHAMMADAB A.W. State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment.. **J. Clean. Prod.**, 262 (2020), pp. 121-267.

ARAÚJO, T.P. QUESADA, H.B., SANTOS, D.F., FONSECA, B.C.S., BARBIERI, J.Z., BERGAMASCO, R., BARROS, M.A.S.D. Acetaminophen removal by calcium alginate/activated hydrochar composite beads: Batch and fixed-bed studies. **International Journal of Biological Macromolecules.** Vol. 203, p. 553-562, 2022.

BELHAMDI B., MERZOUGUI Z., LAKSACI H., TRARI M. The removal and adsorption mechanisms of free amino acid l-tryptophan from aqueous solution by biomass-based activated carbon by H3PO4 activation: Regeneration study, Physics and Chemistry of the Earth, **Parts A/B/C**, Vol. 114, p. 102791, 2019.

BHATNAGAR A.S., GOPALA KRISHNA A.G. Natural antioxidants of the Jaffna variety of *Moringa Oleífera* seed oil of Indian origin as compared to other vegetable oils. **Grasasy Aceites**, 64 (5) (2013), pp. 537-545.

BRAZ, FARLEY SOARES**. Degradação do ibuprofeno por fotocatálise com TiO2 e avaliação dos efeitos agudos dos subprodutos.** 2014. 68 páginas. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.

BO L., ZHANG S.G., CHANG C.C., DONG Z.F., LI H.X. Emerging pollutants - Part II: treatment. **Water Environ.** Res., 87 (2015), pp. 1873-1900.

CAO Q, HUANG Z, LIU S, WU Y. Potential of Punica granatum biochar to adsorb Cu (II) in soil. **Sci Rep** 2019;9:11116.

CAO Q., XIE K.C., LV Y.K., BAO W.R. Process effects on activated carbon with large specific surface area from corn cob. **Bioresource Technology**,Vol. 97, Issue 1, 2006, P. 110-115.

CARRALES-ALVARADO D.H., OCAMPO-PÉREZ R., LEYVA-RAMOS R., RIVERA-UTRILLA J. Removal of the antibiotic metronidazole by adsorption on various carbon materials from aqueous phase. **Journal of Colloid and Interface Science**, Vol. 436, p. 276-285, 2014.

FUNAZUKURI, T.; HUDGINS, R.R.; SILVESTON, P.L. Product distribution in pyrolysis of cellulose in a microfluidized bed. **Journal Analytical Appliel Pyrolysis,** v. 9, p. 139-158, 1986.

GARCIA G. Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** Vol. 82, pp. 1393-1414, 2018. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.117.

GOMES A.R., JUSTINO C., ROCHA-SANTOS T., FREITAS A.C., DUARTE A.C., PEREIRA R. Review of the ecotoxicological effects of emerging contaminants to

soil biota. J. Environ. Sci. Health - Part A Toxic/Hazard. **Subst. Environ. Eng**., 52 (2017), pp. 992-1007.

HAJALIGOL, M.; WAYMACK, B.; KELLOG, D. Low temperature formation of aromatic hydrocarbon from pyrolysis of cellulosic materials. **Fuel,** v. 80, p.1799-1807, 2001

HOSLETT, J., H. GHAZAL, D. AHMAD, AND H. JOUHARA. Removal of copper ions from aqueous solution using low temperature biochar derived from the pyrolysis of municipal solid waste: **Science of The Total Environment**, v. 673, p. 777-789, 2019.

LEONE A., SPADA A., BATTEZZATI A., SCHIRALDI A., ARISTIL J., BERTOLI S. *Moringa oleifera* seeds and oil: characteristics and uses for human health. **Int. J. Mol. Sci**., 17 (2141) (2016).

OK Y.S., S.M. UCHIMIYA, S.X. CHANG, N. BOLAN. Biochars: Production, Characterization and Applications; 2015.

PHAN, A.N.; RYU, C.; SHARIFI, V.N.; SWITHENBANK, J. Characterisation of slow pyrolysis products from segregated wastes for energy production. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 81, p. 65-71, 2008.

TAN, X., Y. LIU, G. ZENG, X. WANG, X. HU, Y. GU, AND Z. YANG. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions: **Chemosphere**, v. 125, p. 70-85, 2015.

TOMCZYK A, SOKOŁOWSKA Z, BOGUTA P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Rev Environ Sci Biotechnol** 2020;19:191–215.

YADAV, A.; DINDORKAR, S.S.; RAMISETTI, S.B. Adsorption behaviour of boron nitride nanosheets towards the positive, negative and the neutral antibiotics: Insights from first principle studies. **Journal of Water Process Engineering,** Vol. 46, p. 102555, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102555.

Zuo S., Yang J., Liu J. Effects of the heating history of impregnated lignocellulosic material on pore development during phosphoric acid activation. **Carbon**. Vol. 48, pp. 3293-3295, 2010.