

Otimização do tratamento de água superficial utilizando *Opuntia cochenillifera*: uma análise por Delineamento Composto Central Rotacional

Igor Luz Gonçalves^{1a}; Glauber da Rocha Medeiros^{1b}; Cleyse Kelly Barbosa Nunes^{1c};
Kamila Jessie Sammarro Silva^{1d}; Emanuel Júnior Silva Soares^{1e}; Maria Teresa Hoffman^{1f}; &
Lyda Patricia Sabogal-Paz^{1g}

RESUMO – Este estudo teve como objetivo otimizar o processo de coagulação e floculação utilizando um coagulante natural derivado de *Opuntia cochenillifera*. Para tal, empregou-se um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), associado à Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). As variáveis independentes consideradas foram o Tempo de Mistura Rápida (TMR), o Tempo de Mistura Lenta (TML) e a dosagem de coagulante, enquanto a remoção de turbidez foi adotada como variável dependente. Os experimentos foram realizados utilizando água proveniente do Manancial Monjolinho, em São Carlos/SP, Brasil. Os resultados demonstraram uma remoção máxima de turbidez de 40,4%, sendo que o modelo ajustado apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 27,05%. Embora o modelo tenha apresentado baixa significância estatística, observou-se uma relação relevante entre a dosagem de coagulante e o tempo de mistura lenta (TML), indicando uma melhoria na formação de flocos. De maneira semelhante, a interação entre a dosagem e o tempo de mistura rápida (TMR) mostrou-se importante para a adequada dispersão do coagulante. Conclui-se que o coagulante apresenta potencial significativo para aplicação em sistemas de tratamento de água, especialmente em contextos descentralizados, sendo necessário aprimorar a precisão de modelos matemáticos futuros.

Palavras-Chave – Delineamento de Experimentos; Coagulação; Coagulante Natural

ABSTRACT– This study aimed to optimize the coagulation and flocculation process using a natural coagulant derived from *Opuntia cochenillifera*. To this end, a Rotational Central Composite Design (RCCD) was employed in conjunction with Response Surface Methodology (RSM). The independent variables considered were Rapid Mixing Time (RMT), Slow Mixing Time (SMT), and coagulant dosage, while turbidity removal was adopted as the dependent variable. The experiments were conducted using water sourced from the Monjolinho watershed, located in São Carlos, São Paulo, Brazil. The results demonstrated a maximum turbidity removal of 40.4%, and the fitted model presented a coefficient of determination (R^2) of 23.93%. Although the model exhibited low statistical significance, a relevant relationship was observed between coagulant dosage and slow mixing time (SMT), indicating improved floc formation. Similarly, the interaction between dosage and rapid mixing time (RMT) proved to be important for the proper dispersion of the coagulant. It can be concluded that the coagulant shows significant potential for application in water treatment systems, particularly in decentralized contexts. However, further improvements in the accuracy of future mathematical models are required.

Key-words – Design of experiments; coagulation; Natural Coagulant

1) Escola de Engenharia de São Carlos/USP, (16) 3373-9571; Fax: (16) 3373-9550; a) igorluz@usp.br; b) glaubermedeiros@usp.br; c) cleyse.kelly@usp.br; d) kamilajessie@gmail.com; e) emanueljr@usp.br; f) mariateresa@usp.br; g) lysaboga@sc.usp.br

INTRODUÇÃO

A coagulação é uma das etapas mais importantes no tratamento de água, sendo um método eficaz para a desestabilização de impurezas e a consequente remoção dos flocos formados durante o processo. Nos últimos anos, coagulantes naturais têm recebido maior atenção devido aos seus diversos benefícios, como a biodegradabilidade, facilidade de manuseio, disponibilidade local e menor custo em comparação aos coagulantes inorgânicos (Kenea *et al.*, 2023; Gonçalves *et al.*, 2024).

Entre os coagulantes naturais, diversas plantas têm demonstrado potencial para aplicação em sistemas de tratamento. O cacto do gênero *Opuntia* é uma dessas espécies, amplamente estudado pela sua capacidade de remover turbidez de águas naturais (Gandiwa *et al.*, 2020). Essa eficiência é atribuída à presença de um biopolímero aniônico em sua estrutura interna, o ácido poligalacturônico, que promove adsorção e formação de pontes químicas, sendo os principais mecanismos de coagulação associados à planta (Nharingo *et al.*, 2015)

Fatores operacionais, como a dosagem de coagulante e a energia cinética aplicada durante o tratamento, por meio do tempo de mistura e da velocidade de rotação, desempenham papel crucial na eficiência das Estações de Tratamento de Água (ETAs) (Igwegbe *et al.*, 2021). Uma abordagem eficaz para otimizar esses fatores é o uso do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) associado à Metodologia da Superfície de Resposta (MSR). Esse método permite reduzir o número de ensaios necessários, interrelacionando variáveis independentes (fatores de controle) e variáveis dependentes (respostas) para identificar condições ótimas (Menezes Filho *et al.*, 2020)

O presente estudo teve como objetivo otimizar as condições de coagulação utilizando *Opuntia cochenillifera* como coagulante natural na remoção de turbidez de uma fonte de água superficial. Nesse sentido, empregou-se o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) associado à Metodologia da Superfície de Resposta (MSR).

METODOLOGIA

Preparo do Coagulante Natural

Amostras do cacto *Opuntia cochenillifera* foram coletadas durante o verão, em São Carlos, São Paulo, Brasil, e processadas para a obtenção de um coagulante natural em pó. A preparação seguiu os procedimentos descritos por Miller *et al.* (2008).

As palmas foram limpas, sendo retirados os espinhos, partes secas ou que apresentavam presença de parasitas. Após a limpeza, as palmas foram cortadas em pedaços de aproximadamente

1cm, sendo secos em estufa a 60°C, por 24±4 horas. Após a secagem, as amostras foram trituradas em um processador doméstico, até a obtenção de um pó homogêneo. O pó foi peneirado em malha de 300µm, para a obtenção do coagulante em pó.

Delineamento Composto Central Rotacional

O trabalho utilizou a associação do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) e a Metodologia da Superfície de Resposta (MSR), de modo a otimizar os fatores Tempo de Mistura Rápida (TMR), Tempo de Mistura Lenta (TML) e a Dosagem de Coagulante (Dose). Como variável resposta, tem-se a remoção de turbidez.

O DCCR foi determinado com 8 fatoriais completos (2^k), 6 pontos axiais ($2k$) e 4 repetições no ponto central, resultando em 18 ensaios. O espaçamento axial é dado por $(2^k)^{1/4}$, o que nesse caso, corresponde a 1,68. A Tabela 1 apresenta os níveis estabelecidos, sendo os valores adotados através dos estudos de Freitas *et al.* (2020):

Tabela 1- Níveis do DCCR

Fator de Controle	Unidade	Níveis				
		-1,68	-1	0	1	1,68
TML	min	15	17	20	23	25
TMR	s	43,2	50	60	70	76,83
Dose	mg/L	10,2	15	30	45	50,2

Ensaios Jar Test

Para os ensaios jar test foram realizados utilizando a água coletada na cidade de São Carlos/São Paulo (-22°01'2.40" S, -47°53'16.19" W), a partir do Rio Monjolinho. Antes de cada ensaio, a água foi devidamente homogeneizada e caracterizada quanto a turbidez inicial.

Variável Resposta

A equação 1 representa o cálculo para a obtenção da remoção final, utilizada como variável resposta no DCCR:

$$R(\%) = \frac{Turb_i - Turb_f}{Turb_i} \times 100 \quad (1)$$

Onde

R é a remoção de turbidez, em percentual

Turb_i é a turbidez inicial da amostra, em NTU

Turb_f é a turbidez final da amostra, em NTU

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se na Tabela 2 os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 2- Resultados dos ensaios

Fatorial	Ensaio	Fator Controle			Turbidez Inicial	Resposta	
		TML (min)	TMR (s)	Dose (mg/L)		Turbidez Final	Remoção (%)
		X1	X2	X3			
Fatorial Completo	1	17	50	15	26,7	21,4	19,9%
	2	17	50	45	26,7	21,2	20,6%
	3	17	70	15	26,7	22,4	16,1%
	4	17	70	45	26,7	21,1	21,0%
	5	23	50	15	26,7	20,4	23,6%
	6	23	50	45	26,7	19,2	28,1%
	7	23	70	15	22,3	13,3	40,4%
	8	23	70	45	22,3	14,6	34,5%
Ponto Axial	9	15	60	30	22,3	14,7	34,1%
	10	25	60	30	14,6	11,4	21,9%
	11	20	43	30	18,6	10,8	41,9%
	12	20	77	30	18,6	11,6	37,6%
	13	20	60	10,2	26,7	20,1	24,7%
	14	20	60	50,2	26,7	19,1	28,5%
Ponto Central	15	20	60	30	26,7	20,2	24,3%
	16	20	60	30	26,7	20,1	24,7%
	17	20	60	30	26,7	20,4	23,6%
	18	20	60	30	26,7	20,9	21,7%

Observa-se que, houve pouca variação de resultados, sendo a remoção máxima de 41,94% no ensaio 11 (destacado em negrito), utilizando 30mg/L de coagulante, e tempo de mistura rápida e lenta de 43 segundos e 20 minutos, respectivamente. Em contrapartida, grande parte das remoções de turbidez permaneceram próximas a 25% (com exceção dos ensaios 7 e 11), demonstrando uma baixa remoção de turbidez. Nenhum dos ensaios atingiram o padrão de potabilidade estabelecido de 5 NTU.

A partir dos dados experimentais, procedeu-se ao ajuste estatístico para avaliar a influência de cada fator, através do ajuste do modelo matemático, utilizando o software R (R Core Team, 2022). As variáveis independentes Tempo de Mistura Lenta (X1), Tempo de Mistura Rápida (X2) e Dose de

Coagulante (X3) e a variável resposta Remoção de Turbidez (Y), são analisadas para a equação do modelo, seguindo as estimativas do DCCR, conforme o modelo demonstrado na Equação 2:

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{33}x_3^2 \quad (2)$$

Onde:

Y é a resposta predita (remoção de turbidez, %);

x_1, x_2, x_3 são as variáveis independentes, de entrada codificadas;

β_0 é o intercepto;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ são os coeficientes lineares;

$\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ são os coeficientes de interação;

$\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ são os coeficientes quadráticos, sendo estes coeficientes definidos para o modelo.

A Tabela 3 demonstra os resultados obtidos para o ajuste.

Tabela 3- Coeficientes do modelo ajustado

	Estimativa	Erro Padrão	t-value	Significância
Intercessão	23,90579	3,30442	7,2345	***
TML	-1,18406	1,79097	-0,6611	
TMR	0,92053	1,79097	0,514	
DOSE	4,05291	1,79097	2,263	
TML: TMR	-0,775	2,34002	-0,3312	
TML: DOSE	-0,87	2,34002	-0,3718	
TMR: DOSE	3,3225	2,34002	1,4199	
TML ²	0,16672	1,86095	0,0896	
TMR ²	4,33336	1,86095	2,3286	*
DOSE ²	-0,33179	1,86095	-0,1783	

Legenda: ***- altamente significativo (valor de $p < 0,001$); **- muito significativo (valor de $p < 0,01$); *- significativo (valor de $p < 0,05$).

Pelo ajuste realizado no modelo, nota-se apenas a relação quadrática do tempo de mistura rápida, se mostrou significativo. Partindo-se para a aplicação da ANOVA, onde busca-se validar o modelo ajustado. A Tabela 4 indica os coeficientes obtidos para o modelo.

Tabela 4- Teste ANOVA

Fonte de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F-calc.
Regressão	9	615,84	205,28	1,56
Residual	8	350,44	43,805	
Total	17	966,28	249,085	

Legenda: G.L.: Grau de Liberdade; S.Q. Soma dos Quadrados; Q.M.: Quadrados Médios; F-calc.: Teste F calculado. Respostas: $F_{9;8;0,05} = 3,39$; $R^2 = 0,6373$; ; R^2 ajustado = 0,2705; p-value: 0,2705

Observa-se que o teste F aplicado demonstrou valor inferior ao tabelado ($1,56 < 3,39$), demonstrando que o modelo não é representativo. Além disso, os valores encontrados para o R^2 ajustado é de 0,2705, valor inferior ao encontrado em modelos obtidos pelo mesmo método

Apesar do modelo não apresentar alta significância, é possível realizar as elaborações das superfícies de resposta e contorno, que servirão como seguimento para o refinamento do modelo. A Figura 1 demonstra as superfícies de resposta:

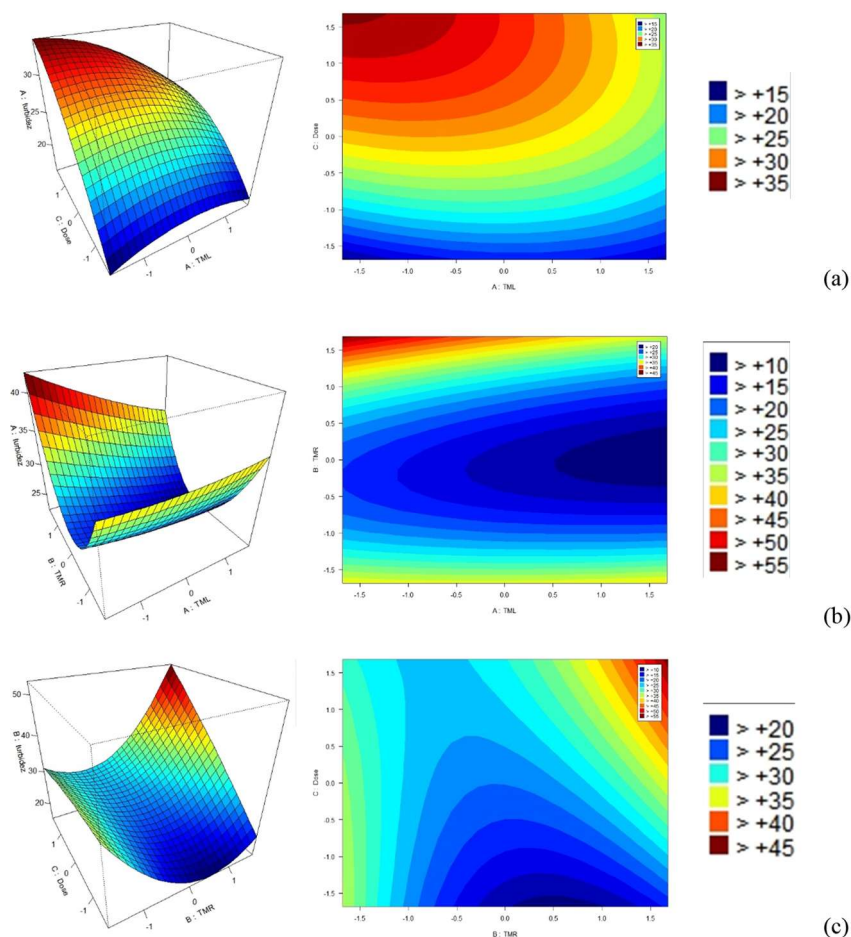


Figura 1-Superfícies de Resposta. Legenda: (a) Superfície de Resposta e de Contorno para TML x Dose; (b) Superfície de Resposta e de Contorno para TMR x TML (c) Superfície de Resposta e de Contorno para TMR x Dose

As superfícies geradas neste estudo não apresentaram as concavidades necessárias para indicar máximos e mínimos globais dos fatores de controle. Entretanto, observou-se que o aumento da dosagem de coagulante reduz o tempo de mistura lenta (TML), indicando maior facilidade na formação dos flocos e menor energia necessária para sua aglutinação. Por outro lado, o aumento da

dosagem exige maior tempo de mistura rápida (TMR), uma vez que maiores quantidades de coagulante demandam mais energia para dispersão adequada.

Estudos com *Opuntia* têm demonstrado remoções de turbidez (e.g., Rachdi *et al.*, 2017; Freitas *et al.*, 2020), especialmente em águas com altos valores de turbidez. No entanto, este estudo aponta que baixas concentrações de sólidos podem ser um fator limitante para a eficiência da remoção, já que os processos de coagulação e floculação dependem da presença de partículas que atuam como núcleos de agregação.

Um aspecto relevante identificado em estudos anteriores é a idade da planta, que demonstrou influência significativa na eficiência do coagulante. Contudo, como a *Opuntia* utilizada neste trabalho foi coletada em área urbana de São Carlos, não foi possível controlar esse parâmetro. Além disso, o uso de um manancial natural para a geração do modelo limitou o controle sobre outros fatores associados à qualidade da matriz, os quais podem impactar a eficiência do coagulante.

Embora este estudo não tenha gerado um modelo significativo, há evidências promissoras de eficiência com outros coagulantes naturais, como a *Moringa oleifera*. Por exemplo, (Gonçalves *et al.*, 2023) reportaram um modelo com remoção de turbidez de 68% em águas sintéticas, utilizando variáveis de controle semelhantes. Esses resultados ressaltam o potencial da *Opuntia* como uma alternativa válida para investigações futuras relacionadas à geração de modelos de tratamento.

CONCLUSÃO

Ao final do estudo, não foi possível estabelecer um modelo representativo para o uso do coagulante a base de *Opuntia cochenillifera*, utilizando águas superficiais. Apesar do processo de coagulação apresentar efetividade, uma vez que houve remoção de turbidez através do processo de coagulação.

Levanta-se que, a elaboração de modelos matemáticos exige variáveis controladas, o que não é possível garantir ao utilizar águas de mananciais naturais. A presença de compostos ou ainda, a baixa turbidez da água, são fatores que podem interferir no ajuste do modelo.

Para estudos futuros, recomenda-se a aplicação do DCCR associado ao MSR em águas sintéticas padrão, de alta turbidez. As variações dos níveis utilizados nesse estudo servem como direcionamento para a geração de outros modelos, uma vez que demonstraram uma boa remoção de turbidez inicial. Ressalta-se que a criação de modelos é uma iniciativa para a otimização dos

processos, uma vez que permite estabelecer os parâmetros de tratamentos de forma efetiva e de menor custo, fatores essenciais para contextos descentralizados.

REFERÊNCIAS

Gandiwa, B.I. *et al.* (2020) “Optimisation of using a blend of plant based natural and synthetic coagulants for water treatment: (Moringa Oleifera-Cactus Opuntia-alum blend)”, *South African Journal of Chemical Engineering*, 34, p. 158–164. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SAJCE.2020.07.005>.

Gonçalves, I.L. *et al.* (2024) “Optimization of the use of Moringa oleifera in wastewater treatment by rotational central composite design”, *Desalination and Water Treatment*, 320. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100765>.

Igwegbe, C.A. *et al.* (2021) “Coagulation-flocculation of aquaculture wastewater using green coagulant from garcinia kola seeds: Parametric studies, kinetic modelling and cost analysis”, *Sustainability (Switzerland)*, 13(16). Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13169177>.

Kenea, D. *et al.* (2023) “Investigation on surface water treatment using blended moringa oleifera seed and aloe vera plants as natural coagulants”, *South African Journal of Chemical Engineering*, 45, p. 294–304. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.06.005>.

M. Miller, S. *et al.* (2008) “Toward Understanding the Efficacy and Mechanism of Opuntia spp. as a Natural Coagulant for Potential Application in Water Treatment”, *Environmental Science & Technology*, 42(12), p. 4274–4279. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es7025054>.

Menezes Filho, A.C.P. de *et al.* (2020) “Produção, rendimento e caracterização físico-química de pectina a partir da entrecasca de melancia (*Citrullus lanatus*): otimização por experimento Box-Behnken”, *Revista Agraria Academica*, 3(1), p. 44–55. Disponível em: <https://doi.org/10.32406/v3n12020/44-55/agrariacad>.

Nharingo, T. *et al.* (2015) “Exploring the use of cactus Opuntia ficus indica in the biocoagulation–flocculation of Pb(II) ions from wastewaters”, *International Journal of*

Environmental Science and Technology, 12(12), p. 3791–3802. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0815-0>.

R Core Team (2022) “R: A Language and Environment for Statistical Computing English. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Accessed 15 jun 2022. <https://www.R-project.org/>”, *R Foundation for Statistical Computing* [Preprint]. Vienna, Austria: <https://www.R-project.org/>.

Freitas, B.L.S. *et al.* (2020) “Pretreatment using *Opuntia cochenillifera* followed by household slow sand filters: technological alternatives for supplying isolated communities”, *Environmental Technology (United Kingdom)*, 41(21), p. 2783–2794. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1582700>.

AGRADECIMENTOS - Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (processos 442074/2023-9 e 302112/2025-1) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (PROEX – Código 001) pelos recursos e bolsas outorgados.