

Otimização da clarificação de águas turvas com sementes de *Moringa oleifera*

Optimization of turbid water clarification with *Moringa oleifera* seeds

- **Data de entrada:**
21/02/2017
- **Data de aprovação:**
04/09/2017

Geraldo Luís Charles de Cangela / Antônio Domingues Benetti*

DOI: 10.4322/dae.2018.019

Resumo

O pó de sementes de *Moringa oleifera* possui a capacidade de coagular e flocular colóides presentes na água. A clarificação depende de fatores como pH inicial, concentração do pó da semente e os tempos de misturas rápida e lenta. Este trabalho objetivou otimizar esses fatores por meio de planejamento experimental pela técnica do Delineamento Central Composto Rotacional (DCCR) e análise pela Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Foram realizados 28 ensaios em Jarreste, sendo usados cor aparente e turbidez como variáveis respostas. Para as condições ótimas, as remoções de cor aparente e turbidez foram de 80% e 94%, respectivamente. A análise dos efeitos principais e das interações das variáveis independentes mostraram que, para a turbidez, os fatores mais significativos foram a concentração de *Moringa*, os tempos de mistura rápida e lenta e a interação entre esses tempos. A análise de variância mostrou que o modelo matemático que melhor se ajustou ao experimento foi o da remoção da turbidez. **Palavras-chave:** *Moringa oleifera*. Delineamento Central Composto Rotacional. Metodologia de Superfície de Resposta.

Abstract

The powder of *Moringa oleifera* seeds has the capability to coagulate and to flocculate colloids present in water. Clarification depends on factors such as pH, powder concentration and rapid and slow mixing times. This work aimed to optimize these factors using the Rotatable Central Composite Design (RCCD) and Surface Response Methodology (SRM). Twenty-eight jarrest assays were performed using apparent color and turbidity as response variables. Under optimal conditions, apparent color and turbidity removals were, respectively, 80% and 94%. Main component analysis and independent variable interactions showed that, for turbidity, the most important factors were the concentration of *Moringa*, the rapid and slow mixing times and the interaction between these times. Analysis of Variance showed that the turbidity removal mathematical model adjusted better to the experimental data. **Keywords:** *Moringa oleifera*. Rotatable Central Composite Design. Surface Response Methodology.

Geraldo Luís Charles de Cangela – Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Environmental and Natural Resources Engineering, Zambeze University, Moçambique.

Antônio Domingues Benetti – Doutor em Engenharia Civil e Ambiental. Professor Titular do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

***Endereço para correspondência:** Av. Bento Gonçalves, 9500, Caixa Postal 15029, Porto Alegre, RS. E-mail: benetti@iph.ufrgs.br

1 INTRODUÇÃO

O acesso à água potável é essencial à saúde, constituindo-se em uma ação prioritária na proteção à saúde da população (WHO, 2011a). Em 2012, 660 milhões de pessoas no mundo não tinham acesso à água potável (WHO; Unicef, 2014). A OMS estima que 94% das diarreias são causadas por água contaminada e falta de saneamento, provocando cerca de 1,5 milhão de mortes anuais de crianças menores de cinco anos (PRÜSS-USTIN; CORVALÁN, 2006).

Em locais onde não há abastecimento de água por rede de distribuição ou inexistem fontes melhoradas de água, é possível fazer o tratamento de água no ponto de uso para torná-la mais segura para o consumo humano. Vários autores têm descrito métodos de purificação da água em nível familiar ou descentralizado (SOBSEY et al., 2008; PETER-VERBANETS et al., 2009; WHO, 2011b; LOO et al., 2012; RAY; JAIN, 2014). Uma alternativa que pode ser utilizada, em determinadas situações, é a aplicação de pó de sementes de *Moringa oleifera* para clarificar águas turvas. Esse método tem sido estudado por vários autores, em geral, com resultados satisfatórios (NKURUNZIZA et al., 2009; PATERNIANI et al., 2009; LEA, 2010; CAMACHO et al., 2017). A água clarificada pode ser encaminhada para um processo de desinfecção complementar, por exemplo, o método SODIS (EAWAG, 2016). Essa sequência de métodos naturais de tratamento pode ser realizada em nível familiar.

As sementes da *Moringa oleifera* contêm proteínas solúveis em água, de baixo peso molecular, que carregam cargas positivas. Quando o pó das sementes é adicionado a uma água turva, as cargas positivas das proteínas neutralizam as cargas negativas dos colóides presentes (NDABIGENGESSE-RE et al., 1995; SCHWARTZ, 2000).

Uma forma de avaliar quais são os fatores que influenciam um determinado processo, assim como suas interações, é a otimização multivaria-

da (MONTGOMERY, 2009). Essa técnica permite a otimização simultânea dos fatores, diminuindo o número total de ensaios necessários. O método multivariado é comumente empregado na Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), na qual a otimização é baseada em delineamento de fatoriais, por exemplo, o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) (MONTGOMERY; RUNGER, 2012). Essa metodologia tem tido aplicação em estudos ambientais (LI et al., 2010; MORAVIA, 2010; ZHANG et al., 2009).

2 OBJETIVO

O presente trabalho teve como objetivo otimizar os tempos de mistura rápida e lenta, pH e concentração de *Moringa oleifera* para a clarificação de uma água turva usando o Delineamento Composto Central Rotacional e a técnica de Metodologia de Superfície de Resposta.

3 METODOLOGIA

3.1 Água usada nos testes

A água bruta usada nos testes era proveniente do lago Guaíba, sendo coletada na entrada da estação de tratamento de água Moinhos de Vento (ETMV) em Porto Alegre, RS. Neste local, a água do lago Guaíba apresenta turbidez de aproximadamente 80 NTU e concentrações de *Escherichia coli* entre 10^3 - 10^4 NMP/100 mL.

3.2 Preparo do extrato das sementes de *Moringa oleifera*

As sementes foram obtidas a partir das vagens da planta *Moringa oleifera* coletadas na cidade de Maputo, Moçambique. As sementes foram descascadas e expostas ao sol durante 15 dias. Após a secagem, as sementes foram trituradas com almofariz e pilão. As sementes esmagadas passaram por uma peneira de 0,85 mm de abertura e armazenadas em garrafas de plástico. Doze gra-

mas do pó foram pesados em balança analítica e diluídos em 100 ml de água deionizada. A suspensão foi misturada em agitador magnético durante 30 minutos. Após agitação, o extrato foi filtrado sob vácuo usando um filtro com porosidade de 7,5 µm. O filtrado foi transferido para um balão de Erlenmeyer. A partir desse extrato, volumes compreendidos entre 10 e 30 ml foram usados para os testes de coagulação e floculação.

3.3 Condições de coagulação e floculação em jarrestes

Os experimentos de jarrestes foram realizados para otimizar os seguintes fatores: (1) pH inicial; (2) concentração do coagulante; (3) tempo de mistura rápida (TMR) e (4) tempo de mistura lenta (TML). Os testes foram realizados em um aparelho jarreste da marca Policontrol, modelo FlocControl III, equipado com seis frascos de dois litros. As velocidades de misturas rápida e lenta foram 120 e 20 rpm, respectivamente. Os tempos de MR e ML variaram de 1 a 5 minutos e de 10 a 30 minutos, respectivamente. Em todos os testes, o tempo de sedimentação foi fixado em 120 minutos.

3.4 Planejamento experimental com Delineamento Composto Central Rotacional – DCCR

O experimento foi realizado em DCCR aplicável à Metodologia de Superfície de Resposta para otimizar pH, concentração de *Moringa*, tempos de mistura rápida e lenta, que constituíram as variáveis independentes ($k = 4$). As variáveis respostas ou dependentes no planejamento foram cor aparente e turbidez. Com base no DCCR, houve 16

ensaios fatoriais completos (2^k), 8 ensaios axiais ($2k$) e 4 repetições em ponto central, somando 28 ensaios. O espaçamento axial α foi igual a $(2^k)^{1/4}$. A Tabela 1 apresenta os níveis fatoriais mínimo (-1) e máximo (+1), ponto central (0) e pontos axiais mínimo (-2) e máximo (+2), com os respectivos valores dos fatores controles.

Tabela 1 – Níveis de variação dos fatores no DCCR

Fator controle	Unidade	Símbolo	Níveis				
			-2	-1	0	1	2
pH	-	X1	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
TMR	min	X2	1	2	3	4	5
TML	min	X3	10	15	20	25	30
DOSE	mg/L	X4	650	950	1250	1550	1850

3.5 Determinação da concentração ótima de *Moringa oleifera*, pH, TMR e TML

A Tabela 2 mostra a matriz de tratamento usada na realização dos 28 ensaios de jarrestes. Cada teste consistiu de uma análise multivariada de dados resultantes de combinações de diferentes níveis (-2, -1, 0, 1, 2), cada um representando um valor para as variáveis pH, TMR, TML e dose de *Moringa* (Tabela 1). Os valores dos níveis foram distribuídos entre os pontos fatoriais (16), pontos axiais (8) e centrais (4), conforme mostrado na Tabela 2. Por exemplo, o primeiro ensaio tinha níveis de -1, -1, -1 e -1. A substituição desses números na Tabela 1 indica que os valores de pH, TMR, TML e concentração de *Moringa* foram, respectivamente 6,5, 2 min, 15 min e 950 mg/L. Em cada ensaio, os valores eram repetidos em 5 jarros, sendo o sexto formado pela amostra controle.

Tabela 2 - Matriz de tratamento para os experimentos com 16 ensaios fatoriais, 8 ensaios axiais e 4 repetições em ponto central

Delineamento composto central	Número do ensaio	Fatores controles				Variável resposta (%) [*]
		pH	TMR	TML	Dose	
Fatoriais completos	1	-1	-1	-1	-1	Y ₁
	2	1	-1	-1	-1	Y ₂
	3	-1	-1	1	-1	Y ₃
	4	1	-1	1	-1	Y ₄
	5	-1	1	-1	-1	Y ₅
	6	1	1	-1	-1	Y ₆
	7	-1	1	1	-1	Y ₇
	8	1	1	1	-1	Y ₈
	9	-1	-1	-1	1	Y ₉
	10	1	-1	-1	1	Y ₁₀
	11	-1	-1	1	1	Y ₁₁
	12	1	-1	1	1	Y ₁₂
	13	-1	1	-1	1	Y ₁₃
	14	1	1	-1	1	Y ₁₄
	15	-1	1	1	1	Y ₁₅
	16	1	1	1	1	Y ₁₆
Pontos axiais	17	-2	0	0	0	Y ₁₇
	18	2	0	0	0	Y ₁₈
	19	0	0	-2	0	Y ₁₉
	20	0	0	2	0	Y ₂₀
	21	0	-2	0	0	Y ₂₁
	22	0	2	0	0	Y ₂₂
	23	0	0	0	-2	Y ₂₃
	24	0	0	0	2	Y ₂₄
Pontos centrais	25	0	0	0	0	Y ₂₅
	26	0	0	0	0	Y ₂₆
	27	0	0	0	0	Y ₂₇
	28	0	0	0	0	Y ₂₈

* Representa a % da cor ou turbidez removida da água no ensaio

A cor aparente e a turbidez foram as variáveis respostas analisadas para avaliar a eficiência na clarificação com *Moringa*. Para o modelo matemático quadrático, expresso pela Equação 1, Y e β representam, respectivamente, as variáveis respostas (cor aparente ou turbidez) e os coeficientes da equação. Os pontos ótimos da superfície de resposta foram calculados por meio de um sistema com quatro equações lineares e quatro incógnitas.

$$Y(X) = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{i(j)} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \varepsilon \quad (1)$$

Sendo: Y(X) = variável resposta; X_i e X_j = variáveis independentes; β₀ = coeficiente do termo independente; β_j = coeficientes dos termos lineares ou fatores principais; β_{ij} = coeficientes das interações; β_{jj} = coeficientes dos termos quadráticos; ε = resíduo.

A análise de resíduos, análise de variância (ANOVA), determinação do coeficiente de determinação (R²) e teste F ou valor-p foram usados para avaliar a significância ou não dos efeitos principais e das interações das variáveis independentes. Análise de regressão e ANOVA foram usados para a validação do modelo matemático. Foi utilizado o software *Statistic 8* para essas análises e determinações (STATSOFT, 2004).

3.6 Remoção de coliformes totais e *Escherichia coli*

Para as condições ótimas de clarificação com *Moringa oleifera* foram medidas as remoções de coliformes totais e *Escherichia coli* em relação à água bruta. Adicionalmente, foram medidas as concentrações desses organismos após passar por um filtro constituído por tecido de algodão dobrado uma vez. O objetivo dessa filtração simples foi remover flocos leves que ficavam em suspensão após o período de sedimentação. O tecido de algodão foi usado para simular toalhas usadas em residências para secagem de louças.

3.7 Métodos analíticos

Turbidez, cor aparente e pH foram medidos, respectivamente, com turbidímetro Hach modelo 2100, colorímetro Digimed modelo DM-COR e pHmetro Digimed modelo DM-2. As concentrações de coliformes totais e *Escherichia coli* foram feitas com o método Colilert Quanti-Tray (IDEXX Laboratories, 2014).

4 RESULTADOS

4.1 Características da água usada nos testes de clarificação com *Moringa oleifera*

Na Tabela 3 são apresentadas as características da água bruta do lago Guaíba no ponto de captação para a estação de tratamento de água Moínhos de Vento. Essa foi a água usada nos testes de clarificação com *Moringa oleifera*.

Tabela 3 - Características da água bruta usada nos testes de clarificação com *Moringa*

Característica	Unidade	Valor
Cor aparente	Pt-Co	224
Turbidez	NTU	80
pH	-	6,6
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	665
Alcalinidade	mg/L CaCO ₃	20

4.2 Resultados dos ensaios de jartestes

Os resultados dos 28 ensaios de jartestes planejados de acordo com o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) são apresentados na Tabela 4. São mostrados os percentuais de remoções de cor aparente e turbidez para as condições de pH, TMR, TML e concentração do pó das sementes de *Moringa oleifera*.

Tabela 4 - Remoções percentuais de cor aparente e turbidez nos ensaios de clarificação usando pó de semente de *Moringa oleifera* como coagulante

Nº de teste	pH	TMR (min)	TML (min)	Dose de <i>Moringa</i> (mg/L)	Remoção (%)	
					Cor	Turbidez
1	6,5	2	15	950	84	84
2	8,5	2	15	950	84	84
3	6,5	2	25	950	86	86
4	8,5	2	25	950	87	87
5	6,5	4	15	950	84	84
6	8,5	4	15	950	85	85
7	6,5	4	25	950	80	94
8	8,5	4	25	950	90	90
9	6,5	2	15	1550	66	66
10	8,5	2	15	1550	82	82
11	6,5	2	25	1550	75	75
12	8,5	2	25	1550	71	71
13	6,5	4	15	1550	70	70
14	8,5	4	15	1550	68	68
15	6,5	4	25	1550	76	76
16	8,5	4	25	1550	87	87
17	5,5	3	20	1250	80	80
18	9,5	3	20	1250	80	80
19	7,5	3	10	1250	78	78
20	7,5	3	30	1250	84	84
21	7,5	1	20	1250	71	71
22	7,5	5	20	1250	88	88
23	7,5	3	20	650	87	87
24	7,5	3	20	1850	70	70
25	7,5	3	20	1250	85	85
26	7,5	3	20	1250	84	84
27	7,5	3	20	1250	86	86
28	7,5	3	20	1250	84	84

Na Tabela 4, estão ressaltadas em negrito as condições das variáveis controles que proporcionaram a maior remoção de turbidez, que foi de 94% (teste no 7). Essas condições foram: pH = 6,5; TMR = 4 min; TML = 25 min e concentração = 950 mg/L. A remoção de cor aparente para esses valores das variáveis controles foi de 80%. Os valores remanescentes de cor aparente e turbidez, nessas condições, foram, respectivamente, 44,8 mg/L Pt-Co e 4,8 NTU. A máxima remoção de cor aparente, 90%, ocorreu para as mesmas condições das que ocorreram para turbidez, exceto pH inicial, que foi de 8,5. A Figura 1 ilustra visualmente as aparências das águas bruta e clarificadas com *Moringa*.



Figura 1 - Aparências das águas bruta (à esquerda) e clarificadas com *Moringa* (à direita). As amostras são do ensaio 7.

4.3 Identificação dos principais fatores responsáveis pela remoção de cor aparente e da turbidez

A Tabela 5 mostra os resultados da Análise de Variância para a variável turbidez. Os valores destacados em negrito mostram que as variáveis independentes que influenciaram a remoção da turbidez foram os tempos de misturas rápida (TMR) e lenta (TML), a concentração de *Moringa* (L) e a interação entre os tempos de misturas rápida e lenta (TMR*TML). Para o nível de significância de 95%, os valores de p foram menores que 0,05. Para cor aparente, os fatores concentração de *Moringa* e tempo de mistura lenta apresentaram efeitos significativos (tabela não mostrada).

A Figura 2 representa o gráfico de Pareto mostrando os efeitos principais e os das interações, sendo consideradas significativas as colunas horizontais que passaram a linha tracejada ($p = 0,05$). As variáveis dose ótima de *Moringa*, TMR e TML, TMR*TML, exerceram maior influência de forma direta a um grau de confiança de 95%.

4.4 Metodologia de Superfície de Resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é uma técnica usada na modelagem e na análise em aplicações em que as respostas de interesse sejam influenciadas por muitas variáveis. A validação do modelo matemático é feita estatisticamente por meio da análise de variância, da estimativa dos efeitos principais e das interações das variáveis independentes nas respostas (MONTGOMERY; RUNGER, 2014).

As Equações 2 e 3 representam, respectivamente, as remoções de turbidez e cor aparente, de acordo com os dados experimentais. Os valores destacados em negrito são os estritamente significativos.

Tabela 5 - Análise de variância dos variáveis controles na remoção da turbidez

Fatores	SQ	GL	QM	F	p (0,05)
pH (L)	17,19	1	17,19	0,9	0,36
pH (Q)	22,68	1	22,68	1,18	0,29
TML (L)	127,4	1	127,36	6,63	0,02
TML (Q)	13,06	1	13,06	0,68	0,42
TMR (L)	112,2	1	112,18	5,84	0,03
TMR (Q)	32,79	1	32,79	1,71	0,21
Dose de <i>Moringa</i> (L)	734,7	1	734,69	38,25	0
Dose de <i>Moringa</i> (Q)	49,82	1	49,82	2,59	0,13
pH*TML	5,87	1	5,86	0,31	0,59
pH*TMR	2,02	1	2,02	0,11	0,75
pH*Dose de <i>Moringa</i>	32,88	1	32,88	1,71	0,21
TML*TMR	90,43	1	90,43	4,71	0,05
TML*Dose de <i>Moringa</i>	0,46	1	0,46	0,02	0,88
TMR*Dose de <i>Moringa</i>	1,75	1	1,75	0,091	0,77
Erro	249,7	13	19,21		
SST	1447				
R2	0,83				

Legenda: SQ - soma dos quadrados; GL - grau de liberdade; QM - Quadrados médios; F - teste F calculado; p - nível de significância; TMR - tempo de mistura rápida; TML - tempo de mistura lenta; Q - modelo quadrático; L - modelo linear; SST - soma dos quadrados dos totais; R2 - coeficiente de determinação

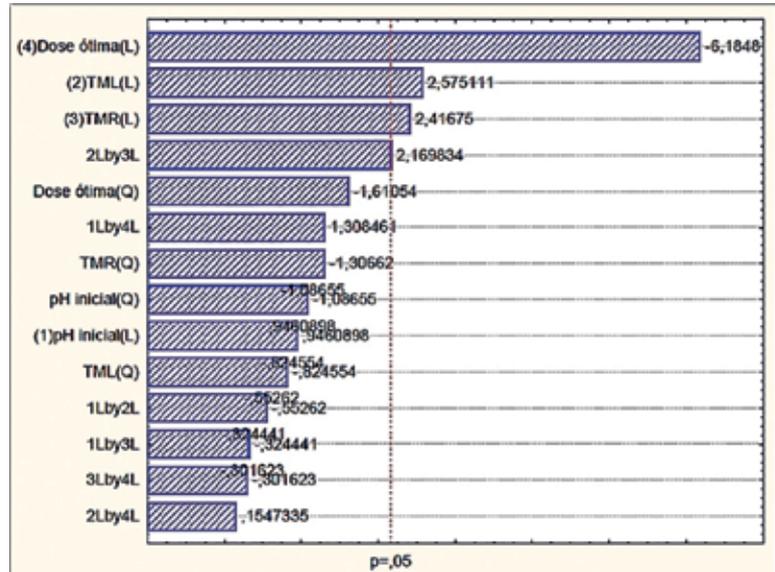


Figura 2 - Gráfico de Pareto para a remoção da turbidez

$$Y_1(X) = 84,59 + 1,69X_1 + 4,61X_2 + 4,32X_3 - 11,07X_4 - 1,94X_1^2 - 1,48X_2^2 - 2,34X_3^2 - 2,88X_4^2 - 1,21X_1X_2 - 0,71X_1X_3 + 2,87X_1X_3 + 4,75X_2X_3 + 0,34X_2X_4 - 0,66X_3X_4 \quad (2)$$

$$Y_2(X) = 71,67 + 0,004X_1 + 5,19X_2 + 2,27X_3 - 4,93X_4 + 1,84X_1^2 - 0,27X_2^2 + 1,20X_3^2 + 1,05X_4^2 - 0,06X_1X_3 - 1,18X_1X_3 + 1,79X_1X_4 + 2,91X_2X_3 + 2,59X_2X_4 + 0,59X_3X_4 \quad (3)$$

Sendo: $Y_1(X)$ e $Y_2(X)$ = remoção da turbidez e da cor aparente (%); X_1 = pH inicial; X_2 = tempo de mistu-

ra lenta; X_3 = tempo de mistura rápida; X_4 = concentração do pó da semente de *Moringa oleifera*

A Tabela 6 mostra a análise de variância (ANOVA) para validação do modelo matemático das variáveis turbidez e cor aparente para o nível de significância de 95%. Os coeficientes de determinação (R^2) do modelo ajustado para a turbidez e cor aparente foram, respectivamente, 0,828 e 0,665. A análise de variância foi significativa para a variável-resposta turbidez, pois o F calculado (4,51) é duas vezes superior ao F crítico (2,23). Para cor aparente, ao contrário, o F calculado (1,87) foi menor que o F crítico (2,23), indicando falta de ajuste do modelo.

Tabela 6 - Análise de variância da turbidez e cor aparente para o modelo quadrático

Fonte de variação	Turbidez					Cor aparente				
	SQ	GL	QM	F _{cal}	F _{cr}	SQ	GL	QM	F _{cal}	F _{cr}
Regressão (R)	1.197,41	17	70,44	4,51	2,32	450,25	17	26,49	1,87	2,32
Resíduos (r)	249,61	16	15,60			226,71	16	14,17		
Falta de ajuste (FA)	246,68	7	35,24	36,06	8,88	224,72	7	32,10	48,43	8,88
Erro puro (EP)	2,93	3	0,98			1,99	3	0,66		
Total	1.447,02	27				676,96	27			
R ²	0,828					0,665				
R ² _{adj}	0,982					0,974				

Legenda: SQ - soma dos quadrados; GL - graus de liberdade; QM - Quadrados médios; F_{cal} - teste F calculado; F_{cr} - teste F crítico

4.5 Superfícies de respostas para a remoção de turbidez

Com base nos modelos, foram elaboradas as superfícies de respostas para a remoção da turbidez, cujo modelo foi mais significativo. As Figuras 3, 4 e 5 mostram as interações entre as variáveis pH, TMR, TML e concentração de *Moringa*, respectivamente, na remoção de turbidez. Nas figuras, as regiões em vermelho mais fortes representam as zonas de maior remoção para turbidez, que foram pH de 6,5, TMR de 4 min, TML de 25 min e concentração de *Moringa* de 950 mg/L.

4.6 Remoção de coliformes totais e *Escherichia coli* em teste de clarificação com *Moringa oleifera*

Um teste usando as condições ótimas de clarificação determinadas nos jarrestes foi realizado para medir as concentrações de coliformes totais e *E. coli* na água clarificada. Esses parâmetros foram medidos, também, após a água clarificada passar por um filtro simples constituído por tecido de algodão dobrado. Os resultados são mostrados na Tabela 7. Nesse teste, os valores de turbidez nas águas bruta, clarificada e filtrada foram, respectivamente, 47,5 NTU, 7,3 NTU e 1,5 NTU.

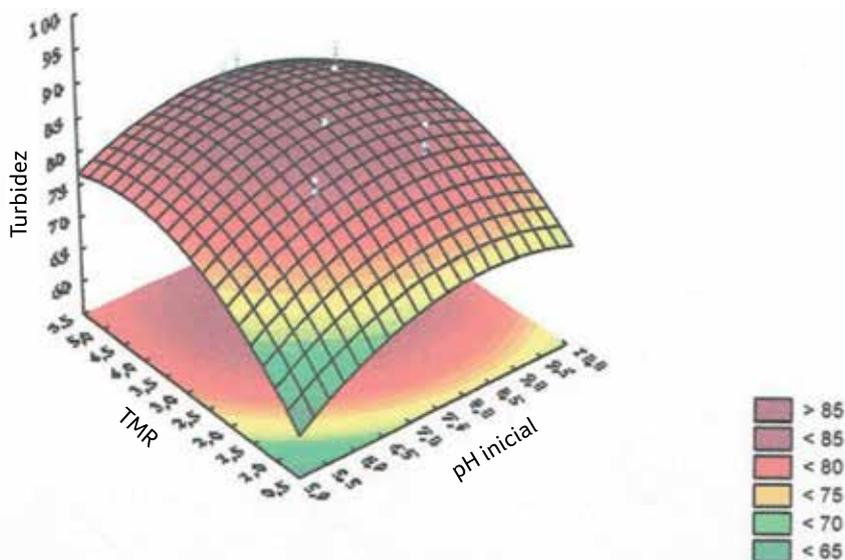


Figura 3 - Curva de superfície de resposta na remoção da turbidez: interação TMR e pH inicial

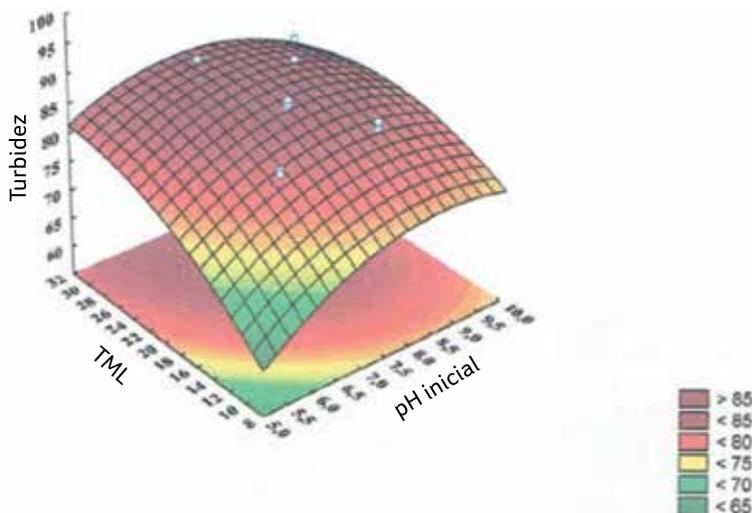


Figura 4 - Curva de superfície de resposta na remoção da turbidez: interação TML e pH

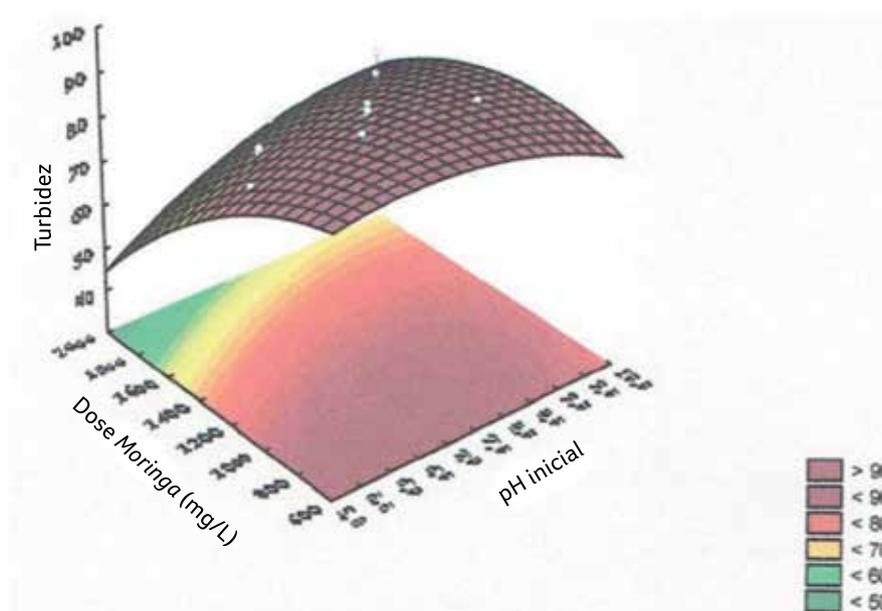


Figura 5 - Curva de superfície de resposta na remoção da turbidez: interação concentração e pH inicial

Tabela 7 - Concentrações de coliformes totais e *E. coli* nas águas bruta e clarificada com *Moringa*, com e sem filtração em tecido de algodão dobrado (concentrações em NMP/100 ml)

Organismos	Água Bruta	Água clarificada com <i>Moringa</i> oleifera			
		Sem filtração	% de remoção	Com filtração	% de remoção
C. Totais	$7,3 \times 10^5$	$2,7 \times 10^4$	96,3	$3,6 \times 10^3$	99,5
<i>E. coli</i>	$2,0 \times 10^3$	$3,1 \times 10^1$	98,5	$1,0 \times 10^1$	99,5

5 DISCUSSÃO

5.1 Resultados dos ensaios de jarrestes

De acordo com os resultados mostrados na Tabela 4, a máxima remoção de turbidez (94%) ocorreu para pH inicial de 6,5, tempos de mistura rápida e lenta de 4 e 25 min e concentração de *Moringa* de 950 mg/L. A máxima remoção de cor aparente, 90%, ocorreu para as mesmas condições das que ocorreram para turbidez, exceto pH inicial, que foi de 8,5. O pH ótimo de coagulação para turbidez, 6,5, foi bastante próximo do pH natural da água bruta, 6,6. Observou-se, nos testes de clarificação, que o pH final da água variava muito pouco em relação ao pH inicial. Por exemplo, o pH final após a clarificação com as condições ótimas foi de 6,3.

Outros autores, usando sementes de *Moringa* para clarificação da água, encontraram remoções similares para turbidez. Nkurunziza et al. (2009) observaram remoções entre 83,2% e 99,8% na clarificação de águas em rios de Ruanda, com turbidez iniciais de 50 e 450 UNT, respectivamente. Pateriani et al. (2009), para água bruta com 100 UNT de turbidez inicial, mediram 92% de remoção após tempo de sedimentação de 30 minutos. Amaral et al. (2006) observaram remoções de 90,8% e 98,1% para águas com turbidez iniciais de 39,9 e 290 NTU, respectivamente. Madrona et al. (2010) também observaram que a remoção de turbidez com *Moringa* é mais elevada para águas com maiores valores de turbidez.

5.2 Análise dos efeitos principais e das interações dos fatores nas variáveis respostas

De acordo com a Tabela 5 e a Figura 2 (diagrama de Pareto), para um nível de significância de 95%, as variáveis independentes que influenciaram a remoção da turbidez foram os tempos de mistura rápida e lenta, a concentração de *Moringa* e a interação entre os tempos de misturas rápida e lenta. A variável pH e as demais interações não apresentaram influência significativa. A concentração de *Moringa* e o tempo de mistura lenta também influenciaram significativamente os resultados de cor aparente.

5.3 Modelo matemático da Superfície Resposta

Após a análise de variância e a estimativa dos efeitos principais, foi possível determinar um modelo matemático polinomial de segunda ordem para as remoções de turbidez e cor (Equações 2 e 3). Os respectivos coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados foram 0,828 e 0,665, respectivamente. A análise de variância mostrada na Tabela 6 indicou que o modelo quadrático foi adequado para explicar os efeitos dos fatores independentes na variável-resposta turbidez. Entretanto, o modelo não se ajustou à cor aparente, indicando que outras variáveis omitidas no modelo influenciaram sua remoção.

5.4 Remoção de coliformes totais e *Escherichia coli* em teste de clarificação com *Moringa oleifera*

As concentrações iniciais de coliformes totais e *E. coli*, $7,3 \cdot 10^5$ NMP/100 mL e $2,0 \cdot 10^3$ NMP/100 mL, foram reduzidas para $2,7 \cdot 10^4$ NMP/100 mL e $3,1 \cdot 10^1$ NMP/100 mL, respectivamente, após a clarificação com *Moringa*. Após filtração em um tecido de algodão, as concentrações de coli totais e *E. coli* foram ainda mais reduzidas, para $3,6 \cdot 10^3$ NMP/100 mL e $1,0 \cdot 10^1$ NMP/100 mL, o que corresponde a mais de duas unidades logarítmicas de redução. Microrganismos dispersos na água não são removidos por filtração em tecido (WHO, 2011b); contudo, aque-

les associados a partículas maiores poderão ficar retidos no tecido (Colwell et al., 2003). A turbidez da água bruta, inicialmente de 47,5 NTU, reduziu-se para 7,3 NTU após a clarificação e para 1,5 NTU após a filtração. Com essas características de turbidez, é possível fazer uma etapa complementar de tratamento, por exemplo, por desinfecção solar da água por meio da técnica SODIS (EAWAG, 2016). Com isso seria possível alcançar um padrão microbiológico capaz de tornar a água segura para beber.

6 CONCLUSÕES

Extratos de sementes de *Moringa oleifera* foram usados como coagulante para clarificar água bruta que abastece uma estação de tratamento de água. Usando a técnica de análise fatorial de planejamento experimental, foram realizados 28 jartestes, variando-se as concentrações de pó de semente de *Moringa*, pH e tempos de mistura rápida e lenta. Sob as condições ótimas de concentração do coagulante, pH e tempos de mistura, houve uma remoção de 80% e 94%, respectivamente, para cor aparente e turbidez. A clarificação com *Moringa* permitiu, também, a redução de 99,5% de coliformes totais e *E. coli* após filtração do sobrenadante em tecido de algodão.

O uso do DCCR - MSR mostrou-se útil para a validação dos fatores que exerceram maior influência na remoção de turbidez da água bruta utilizada. A concentração de *Moringa*, os tempos de mistura rápida e lenta e a interação entre os tempos foram os fatores que se mostraram significativos na remoção da turbidez. Foi determinada uma equação quadrática de segunda-ordem para representar o processo, sendo considerada significativa a remoção da turbidez ao nível de confiança de 95%. O valor inicial de pH não afetou de forma significativa a remoção de turbidez.

Os ensaios realizados demonstraram o potencial do uso de *Moringa oleifera* para clarificar águas turvas. Embora a água clarificada não possa ser considerada potável, ela apresenta muito melhor qualidade em termos de turbidez, cor aparente,

coliformes totais e *E. coli* que a água bruta. Considerando que a água clarificada possui baixa turbidez, um tratamento adicional por desinfecção solar pode eliminar microrganismos tornando a água potável do ponto de vista microbiológico. A técnica pode ser usada em nível domiciliar ou ponto de uso em situações em que não haja água segura para abastecimento, e onde existam árvores de *Moringa oleifera* para coleta de sementes.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, L.A.; ROSSI Jr., O.D.; BARROS, L.S.; LORENZON, C.S.; NUNES, A.P. Tratamento alternativo da água utilizando extrato de sementes de *Moringa oleifera* e radiação solar. **Arquivos dos Instituto Biológico**, v. 73, n. 3, p. 287-293, 2006.
- CAMACHO, F.P.; SOUZA, V.S.; BERGAMASCO, R.; TEIXEIRA, M.R. The use of *Moringa oleifera* as a natural coagulant in surface water treatment. **Chemical Engineering Journal**, v. 303, p. 226-237, 2017.
- COLWELL, R.R.; HUG, A.; ISLAM, I.S.; AZIZ, K.M.A.; YUNUS, M.; KHAN, N.H.; MAHMUD, A.; SACK, R.B.; NAIR, G.B.; CHAKRABORTY, J.; SACK, D.A.; RUSSEK-COHEN, E. Reduction of cholera in Bangladesh villages by simple filtration. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States**, v. 100, p. 1051-1055, 2003.
- EAWAG. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Department of Water and Sanitation in Developing Countries (SANDEC). **SODIS Manual**. Guidance on Solar Water Disinfection. Dübendorf, 2016.
- IDEXX Laboratories, Inc. **Quant-Tray System**. Westbrook, Maine, 2014 Disponível em: <<http://www.idexx.com/water/water-testing-solutions.html>>. Acesso em: 10.nov.2015.
- LEA, M. Bioremediation of turbid surface water using seed extract from *Moringa oleifera* Lam. (Drumstick) Tree. **Current Protocols in Microbiology**, 16:G:1G.2:1G.2.1-1G.2.14., 2010.
- LI, H.; ZHOU, S.; SUN, Y.; LV, J. Application of response surface methodology to the advanced treatment of biologically stabilized landfill leachate using Fenton's reagent. **Waste Management**, v. 30, n. 11, p. 2122-2129, 2010.
- LOO, S.; FANE, A.G.; KRANTZ, W.B.; LIN, T. Emergency water supply: a review of potential technologies and selection criteria. **Water Research** v. 46, p. 2125-3151, 2012.
- MADRONA, G.S.; SERPELLONI, G.B.; VIEIRA, A.M.S.; NISHI, L.; CARDOSO, K.C.; BERGAMASCO, R. Study of the effect of saline solution on the extraction of the *Moringa oleifera* seed's active component for water treatment. **Water, Air and Soil Pollution**. v. 211, p. 409-415, 2010.
- MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. 8th ed. Wiley: New Delhi, 2009.
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5^a ed. LTC, Rio de Janeiro, 2012.
- MORAVIA, W. G. **Avaliação do tratamento de lixiviado de aterro sanitário através de processo oxidativo avançado conjugado com sistema de separação por membranas**. 2010. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K.S.; TALBOT, B.G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. **Water Research**, v. 29, n. 2, p. 703-710, 1995.
- NKURUNZIZA, T.; NDUWAYEZU, J. B.; BANADDA, E. N.; NHAPE, L. The effect of turbidity levels and *Moringa oleifera* concentration on the effectiveness of coagulation in water treatment. **Water Science and Technology**, v. 59, p. 1551-1558, 2009.
- PATERNIANI, J. E. S.; MANTOVANI, M. C.; SANTANA, M. R. Uso de sementes de *Moringa oleifera* para tratamento de águas superficiais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 765-771, 2009.
- PETER-VARBANETS, M.; ZURBRÜGG, C.; SWARTZ, C.; PRONK, W. Decentralized systems for potable water and the potential for membrane technology. **Water Research**, v. 43, p. 245-265, 2009.
- PRÜSS-ÜSTÜN, A.; CORVALÁN, C. **Preventing Diseases through Healthy Environments: Towards an Estimate of the Environmental Burden of Disease**. Geneva: WHO press, 2006.
- RAY, C.; JAIN, R. **Low Cost Emergency Water Purification Technologies**. Oxford: IWA Publishing/Elsevier, 2014.
- SCHWARTZ, D. (2000). **Water Clarification Using *Moringa oleifera***. Disponível em: <http://www.deutsch-aethiopischerverein.de/Gate_Moringa.pdf>. Acesso em: 8.out.2016.
- SOBSEY, M.D.; STAUBER, C.E.; CASANOVA, L.M.; BROWN, J.M.; ELLIOT, M.A. Point of use household drinking water filtration: a practical, effective solution for providing sustained access to safe drinking water in the developing world. **Environmental Science and Technology**, v. 42, p. 4261-4267, 2008.
- STATSOFT, INC. **Statistica**, versão 8.0, 2004.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO); UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND (UNICEF). **Progress on Drinking Water and Sanitation**. Geneva: WHO press, 2014.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) **Guidelines for Drinking Water Quality**. 4th ed. GENEVA: WHO press, 2011a.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Evaluating Household Water Treatment Options: Health-Based Targets and Microbiological Performance Specifications**. Geneva: WHO press, 2011b.
- ZHANG, H.; CHOI, H.J.; CANAZO, P.; HUANG, C. P. Multivariate approach to the Fenton process for the treatment of landfill leachate. **Journal of Hazardous Materials**, v. 161, p. 1306-1312, 2009.