

ABRANDAMENTO DE ÁGUA CALCÁRIA ATRAVÉS DA INJEÇÃO DE CO₂ E SEMENTES DE *Moringa oleifera*

Gustavo lopes (Munizgustavolopesmuniz@yahoo.com.br), Francinete Veloso Duarte, Priscila Ramos Vieira

Resumo: A utilização de águas subterrâneas para abastecimento humano e irrigação tem crescido atualmente. Em regiões semi áridas essas águas caracterizam-se por apresentar valores elevados de dureza que comprometem seu uso, o que torna necessário estudos em busca de meios alternativos de abrandamento dessas águas. Diante do exposto, objetivou-se avaliar diferentes formas de abrandamento de água com elevado teor de dureza. Utilizou-se 14 tratamentos com três repetições em um delineamento inteiramente casualizado. Os tratamentos compunham-se de: sementes de *Moringa oleifera* com casca e sem casca, in natura e pré-tratadas com NaOH 0,1 mol L⁻¹; injeção de CO₂ à água com análises imediatas e 48 h após a injeção do gás; e combinações do CO₂ com as sementes de moringa. As variáveis analisadas foram: dureza total, Ca⁺², Mg⁺², alcalinidade e pH. Os tratamentos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os resultados indicaram diferença significativa entre os tratamentos testados para todas as variáveis estudadas, sendo que, a dureza reduziu significativamente com relação ao valor inicial, chegando a uma eficiência de 32%. O coeficiente de correlação de Pearson mostrou uma relação forte entre as concentrações residuais de Ca⁺² e Mg⁺². A variação observada na alcalinidade e pH demonstra que não é necessário gasto com produtos adicionais para ajustes desses parâmetros no sistema de tratamento de água ao optar pela utilização de qualquer um dos tratamentos testados nesse trabalho, dado que o pH se manteve na faixa ideal indicada para abastecimento humano.

Palavras-chave: Alcalinidade, coagulante natural, dióxido de carbono, dureza, pH.

SOFTENING THE HARD WATER BY INJECTING CO₂ AND *Moringa oleifera* SEEDS IN IT

Abstract: The use of groundwater for human consumption and irrigation is currently growing. Such water is featured by high hardness levels in semi-arid regions and it compromises its use. Thus, there is the need of studies to find alternative means of easing these waters. Accordingly, the aim of the current study is to assess different forms of softening high hardness level water. We used 14 treatments with three repetitions in a completely randomized design. The treatments were composed of in shell and shelled, raw *Moringa oleifera* seeds pretreated with NaOH 0.1 mol L⁻¹. The CO₂ was injected in the water, which was immediately analyzed. It was also analyzed 48 h after the gas injection and the CO₂ combinations with the *moringa* seeds. The analyzed variables were: total hardness, Ca⁺², Mg⁺², alkalinity and pH. The treatments were subjected to variance analysis and the means were compared through Tukey test, at 5% probability. The results indicated significant differences between the tested treatments in all variables, and the baseline hardness significantly reduced down to 32% efficiency. The Pearson correlation coefficient showed close relationship between the residual Ca⁺² and Mg⁺² concentrations. The alkalinity and pH variations show that it is unnecessary to spend additional products to adjust these parameters in water treatment systems if the choice is made to any of the herein tested treatments because the pH remained in the ideal range for human consumption.

Keywords: Alkalinity, natural coagulant, carbon dioxide, hardness, ph.

1. INTRODUÇÃO

A dureza da água é resultante da presença, principalmente, dos íons cálcio e magnésio ou de outros metais bivalentes, em menor intensidade que, quando presentes em teores elevados, podem causar sabor desagradável na água, além de efeitos laxativos que reduzem a formação de espuma do sabão e provocam incrustações em tubulações e caldeiras (SILVA *et al.*, 2011).

A forma mais utilizada para reduzir a precipitação do carbonato (CaCO₃) em irrigação localizada é a redução do pH com a utilização de ácidos inorgânicos, principalmente ácido

clorídrico (HCl), ácido sulfúrico (H₂SO₄) e ácido fosfórico (H₃PO₄) (EGREJA FILHO *et al.*, 1999; SOUZA *et al.*, 2006). A adição de ácido à água de irrigação, além de perigoso, pode comprometer seriamente o meio ambiente, com problemas advindos durante o transporte, manipulação, adição de outros elementos ao solo e redução excessiva no valor do pH (PIZARRO, 1990; EGREJA FILHO *et al.*, 1999; MAIA *et al.*, 2001).

Além da aplicação de ácido na água para diminuir o pH, outra alternativa para reduzi-lo consiste na injeção de CO₂ à água (DUARTE, 2010). O efeito da injeção do CO₂ na água contribui para evitar o entupimento de gotejadores por carbonatos em irrigação localizada (DUARTE, 2010), além de provocar redução do pH do solo aumentando a disponibilidade de alguns nutrientes (PAULA *et al.*, 2015).

Outra forma alternativa de abrandamento de água consiste na utilização de sementes de *Moringa oleifera*. Conforme Paterniani *et al.* (2009), as sementes da *Moringa oleifera* são substitutas viáveis dos coagulantes químicos para purificação de água, principalmente quanto ao custo de aquisição desses coagulantes, já que, muitas vezes, não estão disponíveis a baixo preço às populações, sendo assim, o uso de suas sementes constitui uma alternativa de baixo custo em relação ao tratamento químico convencional.

Em regiões semiáridas, geralmente, as águas subterrâneas costumam ser altamente calcárias. Na região do Norte de Minas Gerais essas águas apresentam valores de dureza que variam de 150 a mais de 800 mg L⁻¹ em CaCO₃. Conforme Duarte (2010), essas águas causam entupimentos em sistemas de irrigação e de abastecimento acarretando no aumento do consumo de energia e à inviabilização da irrigação por gotejamento. Em alguns municípios da região são utilizados dessalinizadores para tratamento da água de abastecimento público, o que tem gerado um problema ambiental com os efluentes salinos desse tratamento. Portanto, são necessários mais estudos a fim de buscar novas formas de abrandamento de água que sejam eficientes, de baixo custo e que não gere passivo ambiental.

Neste contexto, o trabalho teve por objetivo avaliar formas alternativas e de baixo custo para abrandamento de água calcária, classificada como muito dura, proveniente de poço tubular de região semiárida, através da injeção de CO₂ e sementes de moringa *in natura* e pré-tratadas com solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Aparato e delineamento experimental

O experimento foi conduzido no Laboratório de Química Analítica do Instituto de Ciências Agrárias da UFMG em Montes Claros-MG, sob as coordenadas geográficas de referência: latitude 16°40'54'' S, longitude 43°50'27'' W e altitude 630 m. Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado com três repetições dos tratamentos dispostos na Tabela 1.

A água de trabalho foi coletada de um poço tubular localizado no município de QuemQuem, região semiárida no Norte de Minas Gerais. Esta, apresenta dureza de 510 mg L⁻¹ em CaCO₃, o que a classifica como muito dura (SILVA *et al.*, 2011) e a coloca fora do limite máximo de dureza para consumo humano, que é de 500 mg L⁻¹ em CaCO₃, segundo a Portaria 2.914 de 2011 do Ministério da Saúde.

Tabela 1- Descrição dos tratamentos.

Tratamentos	Descrição
T1	Moringa sem casca
T2	Moringa com casca
T3	Moringa sem casca pré-tratada com NaOH
T4	Moringa com casca pré-tratada com NaOH
T5	CO ₂
T6	Moringa sem casca + CO ₂
T7	Moringa com casca + CO ₂
T8	Moringa sem casca pré-tratada com NaOH + CO ₂
T9	Moringa com casca pré-tratada com NaOH + CO ₂
T10	CO ₂ após 48h
T11	Moringa sem casca + CO ₂ após 48h
T12	Moringa com casca + CO ₂ após 48h
T13	Moringa com casca pré-tratada com NaOH + CO ₂ após 48h
T14	Moringa sem casca pré-tratada com NaOH + CO ₂ após 48h
T15	Água <i>in natura</i>

2.2 Procedimento experimental

As sementes de moringa foram colhidas em árvores localizadas no Instituto de Ciências Agrárias em período de estiagem, conforme recomenda Arantes *et al.* (2012), para evitar interferência da umidade na sua qualidade. Assim que coletadas as sementes foram levadas para o laboratório e retiradas da vagem.

No intuito de buscar um procedimento simples e prático, conforme recomenda Muniz *et al.* (2015), parte das sementes permaneceram com as cascas e outra parte teve suas cascas removidas de forma manual. Posteriormente, as sementes foram trituradas em liquidificador doméstico conforme descrito por Ndabigengesere *et al.* (1995) e Katayon *et al.* (2006) e peneiradas para retirada de partículas maiores (PATERNIANI *et al.*, 2009; 2010).

Assim que peneiradas, parte do pó de ambas as sementes foi tratado com solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ (COSTA; COELHO, 2011). Para isso, pesou-se 50 g de pó de semente que foram adicionados em cerca de 100 ml de solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹. Essa mistura foi levada para um agitador magnético durante 30 min. Em seguida, a referida mistura foi lavada diversas vezes com água destilada para eliminação completa do excesso de NaOH na suspensão, até neutralização do pH. A massa lavada foi filtrada e seca em estufa até peso constante (COSTA; COELHO, 2011). O mesmo procedimento foi adotado para ambas as sementes, com casca e sem casca.

A solução coagulante de moringa foi preparada e utilizada no mesmo dia seguindo as recomendações de Ndabigengesere e Narasiah (1998). A quantidade de semente a ser utilizada foi baseada em ensaios realizados, anteriormente, por Muniz *et al.* (2015), optando por uma quantidade de 2000 mg de pó de semente para cada litro de água a ser tratada. A referida quantidade de semente foi pesada em uma balança analítica de alta precisão e adicionada em 20 ml de água destilada, formando, assim, uma mistura esbranquiçada e pastosa. Essa mistura foi adicionada em 1 L de água proveniente do poço tubular, *in natura* e, em água pré tratada com

CO₂, as quais foram levadas para o agitador magnético a uma velocidade de 1300 rpm durante 20 min.

Após a agitação a solução foi colocada durante 6 h para sedimentação. Posterior à sedimentação retirou-se o sobrenadante e o filtrou com auxílio de uma bomba a vácuo.

Amostras do filtrado foram utilizadas para análise imediata da dureza total, concentração de Ca⁺² e Mg⁺², alcalinidade e pH.

A adição de CO₂ na água foi feita através de um cilindro de CO₂ de 4,5 kg com regulador de pressão e medidor de vazão para oxigênio de 0 – 15 L min⁻¹, adaptado para CO₂, calibrado para uma pressão de 3,5 kgf cm⁻² a fim de controlar a vazão de injeção de CO₂ (DUARTE, 2010). A vazão de gás a ser utilizada foi escolhida baseado em ensaios realizados por Duarte (2010). Para tanto, optou-se por uma vazão de 6 L min⁻¹ para a injeção de CO₂ na água de trabalho.

Após a injeção de CO₂, uma amostra da água foi coletada para a análise imediata da dureza, Ca⁺², Mg⁺², alcalinidade e pH (T5). Após 48 h de aplicação do CO₂ uma nova amostra foi coletada para análise das mesmas variáveis (T10). No tratamento 15 (T15) caracterizou-se a água *in natura* (sem adição de moringa e/ou gás) com relação às mesmas variáveis, afim de obter os valores iniciais das variáveis estudadas.

2.3 Variáveis analisadas e tratamento estatístico

Após o procedimento os tratamentos foram analisados em relação à dureza total, Ca⁺², Mg⁺², alcalinidade e pH. As análises foram realizadas com três repetições e com base no Standard Methods (APHA, 2005). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) a um nível de 5% de probabilidade, a testemunha foi comparada com os tratamentos pelo teste de Dunnett a 1% de significância, os demais tratamentos foram comparados entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5%. As concentrações residuais de Ca⁺² e Mg⁺² foram correlacionadas utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comparação da testemunha com os tratamentos

Na Tabela 2 encontra-se o resultado do teste de Dunnett. Em relação à dureza da água, apenas o T10 não diferiu da testemunha, que apresentou dureza de 510 mg L⁻¹ em CaCO₃. O T10 foi analisado após 48h da injeção de CO₂, tal resultado comprova que não é necessário deixar a água em repouso após a injeção do gás, já que a redução da dureza não foi significativa quando comparada ao valor inicial.

Para o Ca⁺², a testemunha diferiu apenas do T12, T13 e T14, vale ressaltar que estes tratamentos receberam sementes de moringa e foram analisados após 48h da injeção do CO₂, vindo a apresentar uma menor concentração de Ca⁺² em relação à testemunha. A concentração residual de Ca⁺² dos outros tratamentos não diferiu estatisticamente da testemunha. Já em relação ao Mg⁺² não foi observado diferença significativa dos tratamentos quando comparados com a testemunha.

A alcalinidade da água do tratamento testemunha não diferiu do T1, T2 e T5, esses resultados indicam que a alcalinidade da água permanece praticamente constante para a maioria dos tratamentos após a água passar pelo processo de abrandamento com sementes de moringa e CO₂. O pH da água do tratamento testemunha foi igual ao pH do T12 e diferiu estatisticamente

dos demais, no entanto, a variação observada no pH, com excessão do T5, ainda a coloca como sendo propícia para o consumo humano, já que permaneceu na faixa indicada pelo Ministério da Saúde (Portaria 2.914/2011) como ideal para abastecimento humano.

Tabela 2 - Resultado do teste de Dunnett..

Tratamentos	Dureza (mg L ⁻¹ em CaCO ₃)	Ca ⁺² (mg L ⁻¹)	Mg ⁺² (mg L ⁻¹)	Alcalinidade (mg L ⁻¹ em CaCO ₃)	pH
1	427	146	15	315	7,6
2	433	137	22	317	7,6
3	392	137	13	354	7,9
4	411	130	21	336	8,0
5	415	150	10	316	5,7
6	409	117	29	345	6,7
7	398	119	25	344	6,7
8	385	107	29	356	6,8
9	405	119	26	348	7,0
10	468	184	2	345	7,0
11	437	132	26	344	7,6
12	404	141	13	362	7,1
13	393	121	22	360	7,6
14	348	99	24	356	7,6
15	510	174	12	360	7,1
CV* (%)	5,68	5,11	22.68	4.54	0,21

*CV: coeficiente de variação

3.2 Dureza total

As sementes de moringa utilizadas sem casca e pré-tratadas com NaOH, após 48h da injeção do CO₂ na água, proporcionaram maior eficiência na remoção da dureza. Embora este tenha sido o tratamento mais eficiente (T14) ao nível de 5% de significância, ele não diferiu estatisticamente dos outros tratamentos, onde as sementes foram pré-tratadas com NaOH e nem dos que tiveram o CO₂ injetado na água (TABELA 3).

Tabela 3 - Resultado do teste de Tukey para dureza.

Tratamentos	Médias de dureza (mg L ⁻¹ em CaCO ₃)	Resultado do teste
T14	348	a
T8	385	a b
T13	393	a b
T3	392	a b
T7	398	a b c
T12	404	a b c
T9	405	a b c
T6	409	a b c
T4	411	a b c
T5	415	a b c

T1	427	b c
T2	433	b c
T11	437	b c
T10	468	c

Médias seguidas de mesma letra não diferem entresi ao nível de 5% de probabilidade.

Observa-se ainda que os tratamentos mais eficientes na remoção da dureza da água foram aqueles nos quais utilizaram-se as sementes de moringa sem a casca, exceto os tratamentos T5, T7 e T9 (Tabela 3). Vale, porém, ressaltar que, estes tratamentos T5, T7 e T9 tiveram em comum a injeção de CO₂ na água, comprovando que o uso de CO₂ é eficiente no abrandamento de água. Apesar do T14 ter sido o mais eficiente na redução da dureza, os resultados comprovaram que não é necessário deixar a água em repouso durante 48 h após a aplicação do CO₂ para que a dureza diminua, já que os tratamentos que foram analisados logo após a injeção do CO₂ não diferiram estatisticamente do T14.

Embora alguns tratamentos tenham sido mais eficientes que outros, observa-se que, após a aplicação dos mesmos, a dureza reduziu significativamente para um valor abaixo de 500 mg L⁻¹ em CaCO₃, limite máximo de dureza na água para fins de potabilidade estabelecido pela Portaria 2.914 de 2011 do Ministério da Saúde. O T14 apresentou eficiência de 32% na remoção da dureza (FIGURA 1B), com redução de 162 mg L⁻¹ em CaCO₃ quando comparado com a

dureza inicial da água, que era de 510 mg L⁻¹ em CaCO₃ (T15) (FIGURA 1).

Verifica-se ainda que, o pré-tratamento das sementes de moringa com solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ foi eficiente, vindo a ser uma alternativa para melhorar o processo de remoção da dureza de águas altamente calcárias com o uso de coagulante natural.

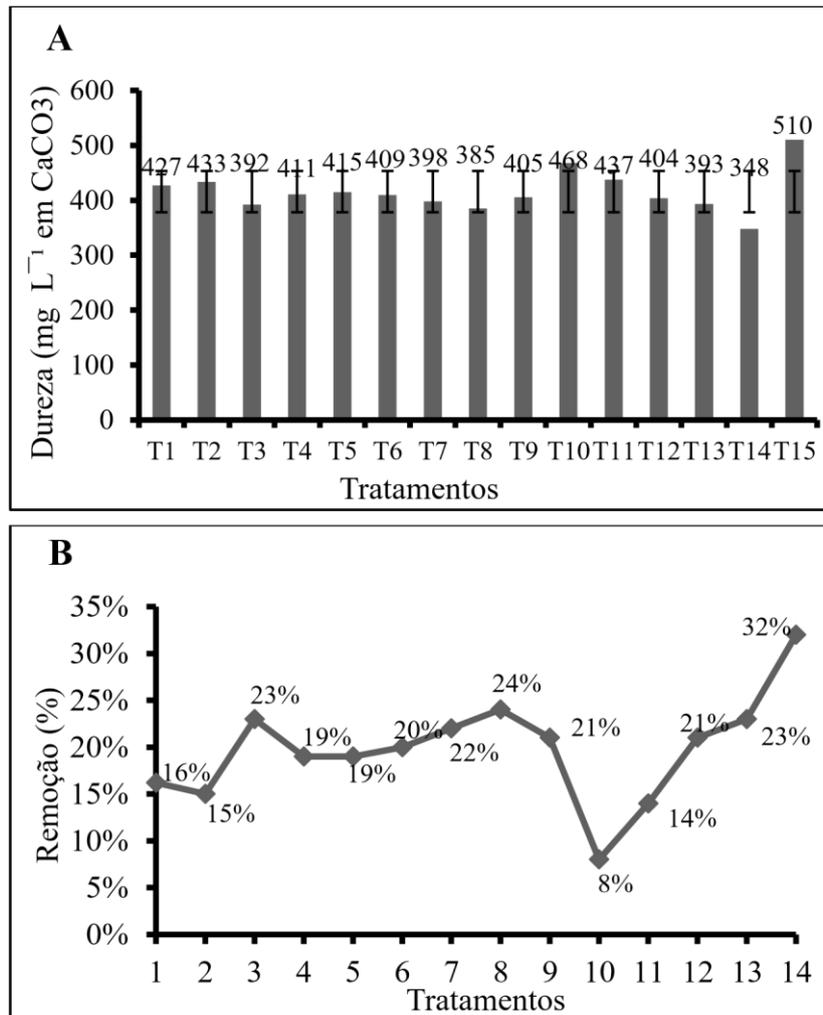


Figura 1 - Valores médios da dureza final das amostras seguidos dos respectivos desvio padrão (A) e eficiência de remoção da dureza (B) em função dos tratamentos utilizados.

Costa e Coelho (2011) em seu estudo sobre a remoção de Cd(II) e Cr(III) em sistemas aquosos com sementes de moringa comprovaram que as sementes, quando pré-tratadas com solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹, são mais eficientes na remoção desses elementos, corroborando, assim, com os resultados encontrados neste trabalho. Segundo Marques *et al.* (2009), durante o pré-tratamento das sementes com solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹, os íons hidroxila provocam hidrólise alcalina das carbonilas presentes na estrutura da semente da moringa e estas apresentam um aumento na porosidade do material, tornando-as mais expostas para adsorver as espécies em questão.

A diminuição da dureza devido à adição de CO₂ na água pode ser explicada pelo efeito do equilíbrio do sistema carbonato. Conforme Duarte (2010), a presença de bicarbonato em solução ou de carbonatos precipitados em água depende da presença de maiores ou menores quantidades de gás carbônico no meio, que aumenta todas as espécies carbonato (H₂CO₃, HCO₃⁻, CO₃²⁻), o que justifica a maior precipitação de carbonato de cálcio nos tratamentos que tiveram a injeção de CO₂ na água.

Segundo Bessler e Rodrigues (2008), a precipitação de carbonato de cálcio a partir de soluções aquosas pode ocorrer simplesmente pela adição de um carbonato solúvel a uma solução contendo um sal solúvel de cálcio ou pela solubilização do CaCO₃ em água saturada com CO₂, formando bicarbonato de cálcio Ca(HCO₃)₂. Quando o gás carbônico é liberado dessa solução para a atmosfera, a reação se inverte com o CaCO₃ e precipita novamente.

Alguns trabalhos publicados (LANGERAK *et al.*, 2000; GAL *et al.*, 2002; DUARTE *et al.*, 2010) mostram que a precipitação de carbonato de cálcio ocorre em pH inferiores a 8 devido à perda de CO₂ e, a precipitação depende da velocidade de perda de CO₂. Tal afirmação corrobora com os resultados encontrados nos tratamentos T12 e T13, que foram analisados 48h após a injeção de CO₂, já que houve tempo suficiente para que o gás carbônico fosse liberado da solução para a atmosfera.

3.3 Cálcio e magnésio

As menores concentrações de Ca⁺² residual foram encontrados nos tratamentos T14, T8 e T6, que não diferiram entre si estatisticamente (TABELA 4). Nesses tratamentos observa-se uma concentração elevada de Mg⁺², ou seja, houve maior remoção da dureza cálcica. Isso se comprova quando se compara às concentrações iniciais de cálcio e magnésio da água (T15), que era de 174 mg L⁻¹ e 12 mg L⁻¹, respectivamente. Sendo assim, houve um aumento da dureza magnésiana em todos os tratamentos, exceto nos tratamentos T10 e T5, enquanto que a dureza cálcica diminuiu em praticamente todos os tratamentos.

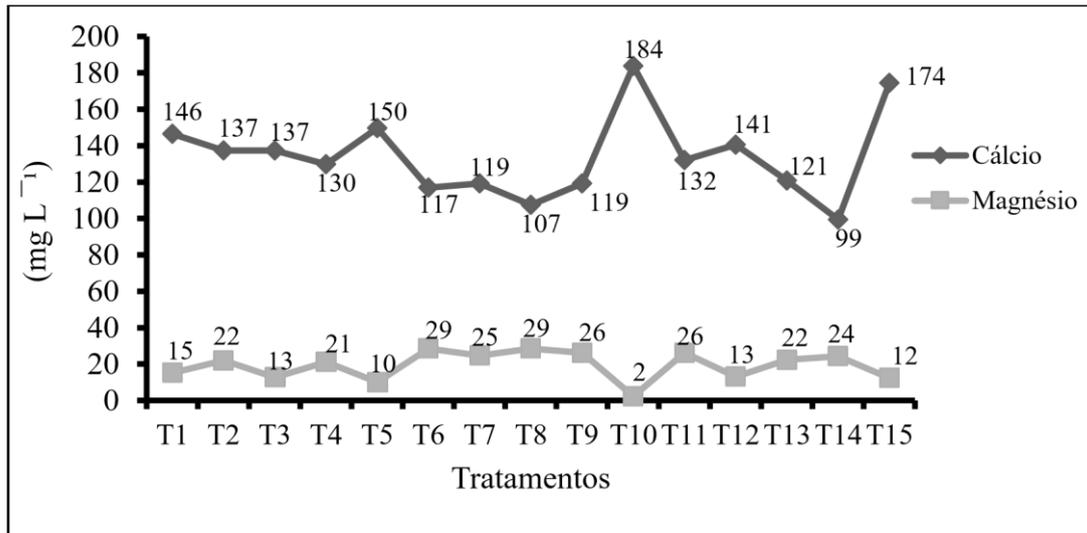
A diminuição da dureza cálcica, concomitantemente, com o aumento da dureza magnésiana pode ser comprovada pelo coeficiente de correlação linear de Pearson de -0.87. O valor calculado mostra uma relação clara e forte entre os teores residuais de cálcio e magnésio, ou seja, a medida que a concentração de cálcio aumenta a concentração de magnésio diminui, isso se justifica devido ao fato da adsorção/precipitação de um ser maior que do outro. Essa relação também pode ser vista no Figura 2.

Os resultados encontrados neste trabalho estão em conformidade com Muybi e Evison (1994), segundo os autores, quando se utiliza sementes de moringa para abrandamento de água com elevada dureza, a dureza restante é devida, principalmente, ao magnésio, uma vez que os íons cálcio são adsorvidos mais rapidamente que os íons magnésio.

Tabela 4 - Teste de Tukey para as variáveis Ca⁺² e Mg⁺².

Tratamentos	Médias de Ca ⁺² (mg L ⁻¹)	Resultado do teste	Tratamentos	Médias de Mg ⁺² (mg L ⁻¹)	Resultado do teste
T14	99	a	T10	2	a
T8	107	a b	T5	10	a b
T6	117	a b c	T15	12	a b
T7	119	a b c	T3	13	a b
T9	119	a b c	T12	13	a b
T13	121	b c d	T1	15	a b
T4	130	c d e	T4	21	a b
T11	132	c d e	T2	22	a b
T2	137	c d e	T13	22	b
T3	137	c d e	T14	24	b
T12	141	d e	T7	25	b
T1	146	e	T9	26	b
T5	150	e	T11	26	b
T10	184	f	T8	29	b

Médias seguidas de mesma letra não diferem entresi ao nível de 5% de probabilidade.

Figura 2 – Teores residuais de Ca⁺² e Mg⁺².

Duarte (2010) observou que a velocidade de dissolução do carbonato na água diminuiu a partir de determinada concentração de Ca⁺² na água, isto é, águas com concentração de Ca⁺² acima de, aproximadamente, 170 mg L⁻¹ sofreram um efeito reduzido na dissolução de carbonato, mesmo com supersaturação de CO₂. Conforme Saweret *al.* (1994), para que ocorra precipitação de CaCO₃ na água é necessária uma maior concentração de cálcio. Uma vez que esta água apresenta concentração de Ca⁺² inicial acima de 170 mg L⁻¹, favoreceu-se a precipitação de carbonatos via injeção de CO₂.

3.4 pH

O pH da água oscilou a um valor máximo de 8,0 no T4 e a um valor mínimo de 5,7 no T5 (FIGURA 3). O valor de pH de 5,7 deve-se ao aumento das espécies carbonato total na água.

De acordo com Duarte (2010), o aumento de carbonato total na água, pela dissolução de CO₂, não altera a alcalinidade, mas reduz o pH até que o equilíbrio $H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^{-1}$ seja atingido (pH de saturação). A autora, que analisou a influência da aplicação de gás carbônico na redução de precipitação de carbonatos em sistema de irrigação localizada, observou uma variação no pH de 7,3 a 6,0 após a injeção de CO₂, permanecendo constante, o que é explicado pelo efeito tampão do sistema carbonato (RODIER, 1981; STUMM, 1996; DUARTE, 2010).

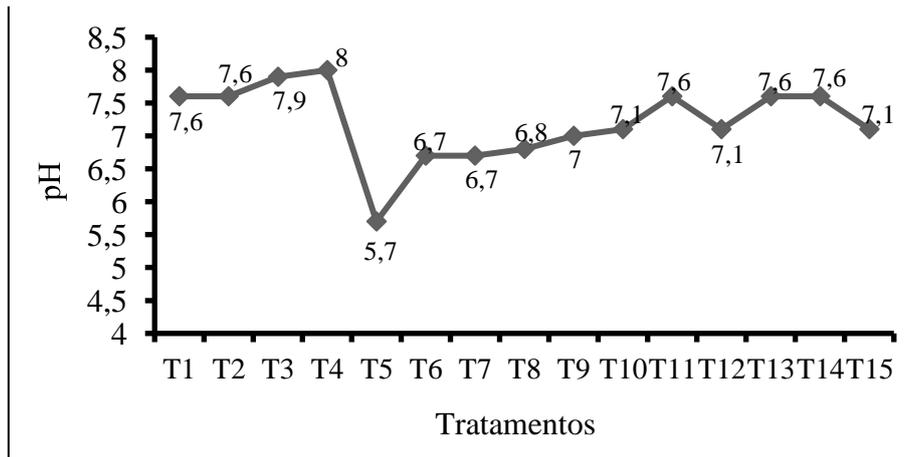


Figura 3 – Variação do pH em função dos tratamentos.

Tabela 5 – Teste de Tukey para o pH.

Tratamentos	Medias de pH	Resultado do teste
T5	5.7	a
T7	6.7	b
T6	6.7	b
T8	6.8	c
T9	7.0	d
T10	7.0	d
T12	7.1	e
T13	7.6	f
T11	7.6	f
T1	7.6	f
T14	7.6	f
T2	7.6	f
T3	7.9	g
T4	8.0	h

Médias seguidas de mesma letra não diferem entresi ao nível de 5% de probabilidade.

Corroborando ainda com os resultados encontrados nesse trabalho, Duarte (2010) explica que, em águas com adição de CO₂, o pH será determinado pela relação entre os íons H⁺, resultantes da dissociação do H₂CO₃, e os íons OH⁻, provenientes da hidrólise dos carbonatos, sendo assim, produz-se o efeito tampão da mistura carbonato-ácido carbônico, a qual dificulta a existência de flutuações de pH, além de limites estreitos (DUARTE, 2010).

De acordo com Silva *et al.* (2011), águas com baixos valores de pH tendem a ser corrosivas, já águas com valores de pH elevados tendem a ser incrustantes, assim, favorecem a precipitação de carbonatos e obstrui os sistemas de irrigação. Conforme a Tabela 5, embora o pH tenha diferido estatisticamente na maioria dos tratamentos, em termos de uso da água para abastecimento humano, essa variação não é considerada relevante.

Recomenda-se que, no sistema de distribuição, o pH da água seja mantido na faixa de 6,0 a 9,5, mas o ideal para abastecimento humano é que esteja na faixa de 7,2 a 7,6 (BRASIL, 2011). Conforme os resultados encontrados, verifica-se que 50% dos tratamentos mantiveram

o pH da água na faixa ideal para abastecimento humano. Já em termos de uso para irrigação de culturas, a faixa de pH adequada varia de 6,5 a 8,4 (SILVA *et al.*, 2011). Sendo assim, o pH final observado em todos os tratamentos, com exceção do T5, está dentro da faixa adequada para irrigação.

3.5 Alcalinidade

A alcalinidade variou conforme os tratamentos utilizados (FIGURA 4). A alcalinidade inicial da água era de 360 mg L⁻¹ em CaCO₃ (T15), após os tratamentos houve uma redução nos valores de alcalinidade da água, atingindo valores mínimos com os tratamentos T1, T5 e T2, onde os valores observados foram, respectivamente, 315, 316 e 317mg L⁻¹ em CaCO₃ (TABELA 6) . Vale ressaltar que nos tratamentos T1 e T2 utilizou-se apenas as sementes de moringa em sua forma *in natura*, já no tratamento 5, apenas o CO₂.

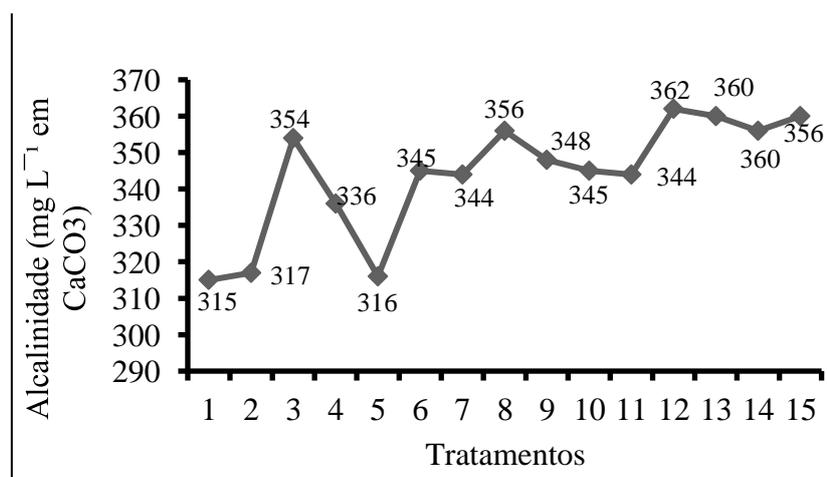


Figura 4 – Variação da alcalinidade em função dos tratamentos.

A redução da alcalinidade da água observada com o uso sementes de moringa está em conformidade com os resultados encontrados por Muybi e Evison (1995) que observaram uma leve redução da alcalinidade da água tratada com sementes de moringa.

Duarte (2010) observou que a alcalinidade da água de estudo permaneceu praticamente constante após a injeção de gás carbônico, 239,2 mg L⁻¹, comparado com o valor inicial, que era de 249 mg L⁻¹ em CaCO₃. Segundo a autora, a adição de CO₂ à água aumenta a concentração total das espécies carbonato sem alterar significativamente a alcalinidade, pois aumenta na mesma proporção todas as espécies carbonato e H⁺.

Tabela 6 – Teste de Tukey para alcalinidade.

Tratamentos	Médias de alcalinidade (mg L ⁻¹ em CaCO ₃)	Resultado do teste
T1	315	a
T5	316	a b
T2	317	a b

T4	336	a b c
T11	344	a b c
T7	344	a b c
T10	345	a b c
T6	345	a b c
T9	348	b c
T3	354	c
T8	356	c
T14	356	c
T13	360	c
T12	362	c

Médias seguidas de mesma letra não diferem entresi ao nível de 5% de probabilidade.

A variação na alcalinidade pode ainda ser explicada devido à absorção e/ou desprendimento do CO₂ na água. Ao se observar os tratamentos mais eficientes para a redução da dureza (TABELA 3), percebe-se não haver diferença estatística a 5% de significância entre eles, em relação à variação da alcalinidade. Desta forma, ao se adotar quaisquer um dos tratamentos, dentre os mais eficientes, como o ideal para abrandamento de água, não será necessário gastos com produtos adicionais para correção da alcalinidade e pH da água em questão, indicando uma alta viabilidade dos tratamentos estudados.

4 CONCLUSÕES

O uso de CO₂ foi eficiente no abrandamento de águas altamente calcárias, sendo que a dureza cálcica diminuiu à medida que dureza magnésiana aumentou.

O pré-tratamento das sementes de moringa com NaOH 0,1 mol L⁻¹ favoreceu a precipitação de CaCO₃.

Estatisticamente, não é necessário deixar a água em repouso durante 48 h após a injeção de CO₂ para que o carbonato de cálcio precipite mais facilmente.

A combinação do uso de sementes de moringa com o CO₂ mostrou ser uma técnica bastante promissora, de baixo custo, ambientalmente correta e eficiente no abrandamento de águas para abastecimento humano e irrigação, além disso, não é necessário gasto com produtos adicionais para correção da alcalinidade e do pH da água após o processo de abrandamento.

REFERÊNCIAS

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21 ed. Washington: APHA, 2005, 1268 p.

ARANTES, C. C.; RIBEIRO, T. A.; PATERNIANI, J. E. S. *Processamento de sementes de Moringa oleifera utilizando-se diferentes equipamentos para obtenção de solução coagulante*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 6, p. 661–666, 2012.

BESSLER, K. E.; RODRIGUES, L. C. *Os polímeros de carbonato de cálcio – uma síntese fácil de aragonita*. *Química Nova*, v. 31, n. 1, p. 178-180, 2008.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância Sanitária. Portaria nº. 2914 de 12 de Dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para o consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, 2011. Disponível em:

<http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>
Acesso em: 13 dez. 2016.

COSTA, B. E. S.; COELHO, L. M. Avaliação das sementes de *Moringa oleifera* como biosorvente aplicado a remoção de cádmio e cromo em sistemas aquíferos. In: Reunião da SBPC, 63., 2011, Goiânia. Anais do VIII CONPEEX, Goiânia: Universidade, 2011. Disponível em: http://www.sbpcnet.org.br/livro/63ra/conpeex/pibic/trabalhos/BRUNO_EL.PDF. Acesso em: 20 dez. 2016.

DUARTE, F. V. Influência da aplicação de gás carbônico na redução de precipitação de carbonatos em sistema de irrigação localizada. 123f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

DUARTE, F. V.; SCHWABE, W. K.; VIEIRA, E. O.; CONCEIÇÃO, B. C. L.; MARTINS, T. M. Avaliação da solubilidade de CaCO_3 em uma água calcária sob injeção de gás carbônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 51., São Luís. Anais eletrônicos... São Luís, 2011. Disponível em: <http://www.abq.org.br/cbq/2011/trabalhos/2/2-592-9955.htm>. Acesso em: 10 jan. 2017.

EGREJA FILHO, F. B.; MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C. Método computacional para correção da alcalinidade de águas para fertirrigação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p. 415-423, 1999. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v23n2/24.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2016.

GAL, J.Y.; FOVET, Y.; GACHE, N. Mechanisms of scale formation and carbon dioxide partial pressure influence. Part II. *Water Research*, v. 36, p. 755-763, 2002.

KATAYON, S.; NOOR, M. J. M. M.; ASMA, M.; GHANI, L. A. A.; THAMER, A. M.; AZNI, I.; AHMAD, J.; KHOR, B. C.; SULEYMAN, A. M. Effects of storage conditions of *Moringa oleifera* seeds on its performance in coagulation. *Bioresource Technology*, v. 97, p. 1455-1460, 2006.

LANGERAK, E. P. A. V.; BEEKMANS, M. M. H.; BEUN, J. J.; HAMELERS, H. V. M.; LETTINGA, G. Influence of phosphate and iron on the extent of calcium carbonate precipitation during anaerobic digestion. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v. 74, n. 11, p. 1030-1036, 1999.

MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C.; OLIVEIRA, M. Estimativa de carbonato de cálcio aplicado via água de irrigação nas regiões da Chapada de Apodi e Baixo Açu. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 5, n. 1, p. 71-75, 2001.

MARQUES, T. L.; COELHO, N. M. M.; COELHO, L. M.; TARLEY, C. R. T.; SEGATELLI, M. G. Estudos de caracterização das sementes da *moringa* aplicados à biosorção de metais. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, 32., Fortaleza.

Anais eletrônicos... Fortaleza, 2009. Disponível em: <http://sec.sbq.org.br/cdrom/32ra/resumos/T1444-1.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2016.

MUNIZ, G. L.; DUARTE, F. V.; OLIVEIRA, S. B. *Uso de sementes de Moringa oleífera na remoção da turbidez de água para abastecimento. Revista Ambiente & Água, v. 10, n. 2, p. 454-463, 2015.*

MUYIBI, S. A.; EVISON, L. M. Moringa Oleifera seeds for softening hardwater. *Water Research, v. 29, n. 4, p. 1099-1105, 1994.*

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S. *Quality of water treated by coagulation using Moringa oleifera seeds. Water Research, v. 32, p. 781-791, 1998.*

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, S. K.; TALBOT, B. G. *Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleifera. Water Research, v. 29, p. 703-710, 1995.*

OLIVEIRA, L. L. C.; FERREIRA, G. G.; FERREIRA, G. R.; CORRÊA, L. F.; PEREIRA, R. R. *Análise da taxa de remoção de turbidez em águas naturais utilizando-se extrato de sementes de Moringa oleifera Lam. Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável, v.1, n. 1, p. 204-210, 2011.*

PATERNIANI, J. E. S.; MANTOVANI, M. C.; SANT'ANNA, M. R. *Uso de sementes de Moringa oleifera para tratamento de águas superficiais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 765-771, 2009.*

PATERNIANI, J. E. S.; RIBEIRO, T. A. P.; MANTOVANI, M. C.; SANT'ANNA, M. R. *Water treatment by sedimentation and slow fabric filtration using Moringa oleifera seeds. African Journal of Agricultural Research, v. 5, n. 11, p. 1256-1263, 2010.*

PAULA, F. L. M.; FRIZZONE, J. A.; PAULA, A. L.; MANFRON, P. A.; SOARES, T. M.; ROJAS, R. S. D. *Concentração foliar de nutrientes na pimenta 'Tabasco' em função da aplicação de CO₂ via irrigação. Horticultura Brasileira, v. 33, n. 2, p. 224-229, 2015.*

PIZARRO, F. *Riegos localizados de alta frecuencia.* 3. ed. Madrid: Mundi Prensa, 1990. 513p.

RODIER, J. *Análisis de Las Aguas. Aguas naturales, Aguas residuales, Agua del Mar: química, físico-química, bacteriología, biología.* Barcelona: Omega, 1990. 1059 p.

SAWYER, C. N.; McCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. *Chemistry for environmental engineering. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering.* 4. ed. New York, USA, 1994. 658 p.

SILVA, I. N.; FONTES, L. O.; TAVELLA, L. B.; OLIVEIRA, J. B.; OLIVEIRA, A. C. *Qualidade de água na irrigação, Agropecuária Científica no Semi-Árido, v. 7, n. 3, p. 1-15, 2011.*

STUMM, W.; MORGAM, JAMES J. *Aquatic chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters,* 3. ed. New York: John Wiley, 1996. 2022 p.