

AValiação da Qualidade e Tratamento das Águas Subterrâneas para Irrigação em Jaíba e Janaúba – Precipitação Química e Corrosão

Moisés Santiago Ribeiro¹; Fábio Henrique de Souza Faria²; Luiz Antônio Lima¹; Silvânio Rodrigues dos Santos²; Marina Rosa de Jesus³

¹*Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, moisessantiago@hotmail.com*

²*Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, MG*

³*Graduanda em Geografia, Instituto Superior de Educação de Janaúba, Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, Janaúba, MG*

1 RESUMO

A qualidade inferior das águas subterrâneas e a adoção de sistemas localizados de irrigação agravam os problemas de obstruções dos equipamentos. A avaliação da qualidade das águas com relação a precipitações e corrosão é fundamental para seu uso e manejo. Objetivou-se neste trabalho avaliar a qualidade das águas subterrâneas dos municípios de Janaúba e Jaíba com relação a estes problemas, utilizando o banco de dados de análises de águas do Centro Tecnológico Norte de Minas (CTNM), da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), referente ao período de 1993 a 2006. Foram analisadas as características físico-químicas das águas: pH, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- e CO_3^{2-} e calculados o índice de saturação do carbonato de cálcio (IS), índice de estabilidade (IE) e cálcio corrigido (Ca°). Foram estimados o volume de ácido fosfórico (H_3PO_4) e clorídrico (HCl) para neutralização da alcalinidade da água em quimificação sistemática, a fim de evitar precipitação de CaCO_3 . Elevados teores de HCO_3^- , severamente restritivos, foram verificados em mais de 63% dos poços amostrados. Isto, associado à alta relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, indica o precipitante sob a forma de CaCO_3 . Pelos valores médios de IS pouco acima de 0,3, e de 6,0 para IE, evidencia-se o caráter precipitante em mais de 85% das águas analisadas, porém próximo da neutralidade. Incrustações podem ser evitadas pela aplicação de HCl e H_3PO_4 em quimificação sistemática nas quantidades médias de 1,0 e 0,3 L m^{-3} , respectivamente, para os municípios de Janaúba e Jaíba.

UNITERMOS: carbonato de cálcio, pH, poço tubular, irrigação, entupimentos

RIBEIRO, M. S.; FARIA, F. H. de S.; LIMA, L. A. L.; SANTOS, S. R. dos; JESUS, M. R. de. EVALUATION OF UNDERGROUND WATER QUALITY FOR IRRIGATION IN JAÍBA AND JANAÚBA, MG, BRAZIL – CHEMICAL PRECIPITATION AND CORROSION

2 ABSTRACT

The lower quality of groundwater and the adoption of micro irrigation systems make chemical obstructions of systems possible. Water quality evaluation regarding precipitation and corrosion is crucial for its use and management. The objective of this work was to

evaluate groundwater quality in the towns of Janaúba and Jaíba using water analysis database from CTNM/EPAMIG from 1993 to 2006. The following physical and chemical characteristics were analyzed: pH, EC, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- and CO_3^{2-} calcium carbonate saturation index (SR), stability index (SI) and corrected calcium (Ca°). The volume of phosphoric and hydrochloric acid necessary for neutralization of water alkalinity through systematic chemigation was estimated to avoid calcium carbonate precipitation. High levels of severely restrictive bicarbonate were found in more than 63% of the sampled wells. This, added to high $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ relation, indicates the precipitate in the form of calcium carbonate. SR values a little over 0.3 and 6.0 for SI show the precipitating potential in more than 85% of the analyzed water samples, but close to neutrality. Incrustations can be avoided through application of phosphoric and hydrochloric acid through continuous injection in amounts varying from 1.0 to 0.3 $\text{L}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively, for the towns of Janaúba and Jaíba.

KEYWORDS: calcium carbonate, pH, well, irrigation, clogging

3 INTRODUÇÃO

A região Norte Mineira possui área irrigável que permite produtividades elevadas e isentas de sazonalidade para boa parte dos cultivos. A atividade frutícola irrigada em expansão busca melhoria de eficiência adotando a irrigação localizada com emissores de baixo volume de aplicação e bocais de diâmetro reduzido, o que a torna vulnerável às obstruções. A qualidade inferior das águas subterrâneas, de natureza precipitante, pode agravar o problema e reduzir a eficiência a níveis antieconômicos.

Apesar dos projetos públicos de irrigação não integrarem a região, produtores rurais usuários de poços tubulares exclusivos aos perímetros e outros investidores, tem demonstrado interesse em se integrar à atividade de agricultura irrigada. Estudos geológicos comprovam as potencialidades hídricas do cárstico regional, com vazões específicas de até $36 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$, mas não qualificaram com propriedade a natureza e eventuais problemas de seu uso (Ramos & Paixão, 2003; Peixoto et al., 1986). É notável a intensa carstificação, ou seja, a ocorrência de rochas carbonáticas na região compreendida entre os rios São Francisco, Verde Grande e Gortuba, com domínio geológico do Grupo Bambuí, seguido pela Formação Paraopeba.

As águas desta região são carbonatadas-cálcicas ou calco-magnesianas, e em menor proporção mistas ou cloretadas-sódicas, segundo o Centro Tecnológico Norte de Minas (CTNM, 1981). Há uma predominância de sólidos em solução como carbonato de cálcio (CaCO_3) e de magnésio (Mg^{2+}), com propensão à precipitação sob determinados valores de potencial hidrogeniônico (pH) e altas temperaturas, conforme a composição e concentração iônica.

Os carbonatos (CO_3^{2-}) são os precipitados mais comuns e são produzidos quando sua concentração na solução ultrapassa o produto de solubilidade para o pH e temperatura da água. Lima & Silva (2000) relataram que o bicarbonato de cálcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) encontra-se naturalmente dissolvido nas águas, destacando-se com elevada concentração nas águas calcárias. Sua baixa solubilidade, no entanto, faz com que se dissocie em dióxido de carbono (CO_2) e CaCO_3 na forma de calcita. A solubilidade do CaCO_3 também é muito baixa, em torno de $6,6 \text{ mg L}^{-1}$. A precipitação do CaCO_3 é favorecida sob fluxo laminar ou repouso nos intervalos de rega, ao longo dos tubos de polietileno pretos sob altas temperaturas e raios solares, bem como, e na saída dos emissores, onde a evaporação contribui para o aumento da concentração dos sais.

Pode-se prever a natureza da água, precipitante ou corrosiva, através do cálculo do índice de saturação do carbonato de cálcio na solução (IS), de acordo com Langelier (1936): $IS = pH_a - pH_c$, onde pH_c é o pH teórico da água que esta alcançaria em equilíbrio com o $CaCO_3$ e o pH_a é o pH atual da água. Se o IS for negativo, há subsaturação de $CaCO_3$ e tendência da água ser corrosiva ou dissolver depósitos cálcicos; e se positivo, tendência para formação de precipitados e causar obstruções. Segundo Ayers & Westcot (1991), se as águas contiverem teor de Ca^{2+} maior que $120,24 \text{ mg L}^{-1}$ e bicarbonatos (HCO_3^-) acima de $305,05 \text{ mg L}^{-1}$ podem ocorrer precipitações na fertirrigação de fertilizantes fosfatados. Cuidados devem ser tomados na incorporação de agroquímicos à água de irrigação, em especial os fertilizantes, devido às possíveis condições favoráveis a saturação, provocando precipitação.

A severidade da corrosão ou precipitação de $CaCO_3$ pode ser classificada pelo índice de estabilidade (IE), segundo Ryznar (1944): $IE = 2 \times pH_c - pH_a$. Se o IE for menor que 5 poderão ocorrer incrustações acentuadas, de 5 a 6 ocasionarão incrustações em parte aquecidas, de 6 a 6,5 não ocorrerá problema (neutralidade), de 6,5 a 7 poderá haver corrosão leve, de 7 a 8 poderá ocasionar corrosão em partes aquecidas e acima de 8 poderá ocorrer corrosão acentuada.

A prevenção às obstruções pode ser feita mediante a análise da água de irrigação, devendo-se correlacionar a geometria do emissor (diâmetro e comprimento da saída) com o diagnóstico e cálculo dos possíveis precipitados para adoção de medidas de tratamento e manejo. Segundo Abreu (1987), realiza-se a prevenção de precipitação de HCO_3^- com aplicação de ácidos: clorídrico (HCl), fosfórico (H_3PO_4), nítrico (HNO_3) ou sulfúrico (H_2SO_4) conforme determinação do fator ácido "f" de neutralização, que é o volume de ácido (mg L^{-1}) necessário para atingir o pH desejado, normalmente entre 6 e 6,5, mediante curva de neutralização em laboratório. Ou ainda, pelo cálculo do fator "f" através da alcalinidade corrigida (Alc_c) para evitar precipitação. A aplicação deve ser feita durante a rega ou, de preferência, no final, para que a água acidulada permaneça na tubulação e evite a precipitação (Figueiredo et al., 2004; Nakayama & Bucks, 1981).

Egreja Filho et al. (1999) elaborou um programa computacional para correção da alcalinidade de águas para fertirrigação, denominado AlKa 1.0, que se mostrou eficiente no cálculo do volume de ácido H_3PO_4 , HCl, H_2SO_4 e HNO_3 a ser empregado.

Na região Norte Mineira existe poucos trabalhos sobre qualidade de água, porém, sabe-se que a grande maioria das águas possui natureza precipitante com baixo IS e IE próximo da neutralidade. Silva & Carvalho (2004), ao estudarem a água de poços tubulares de 50 propriedades de bananicultores em Janaúba, encontraram valores médios de $pH = 7,0$, $CE = 1,0 \text{ dS m}^{-1}$, razão de adsorção de sódio (RAS) = 0,64, alcalinidade ($HCO_3^- + CO_3^{2-}$) = 7,0, sódio (Na^+) = 1,4, cálcio (Ca^{2+}) = 7,5 e magnésio (Mg^{2+}) = 2,0 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, e $IS = 0,2$. A partir destes dados, foram determinados valores médios de $pH_c = 6,8$ e $IE = 6,6$, configurando uma condição de transição entre isenção de problemas e corrosão leve, que se deve ao fato da proximidade das zonas limítrofes.

Nunes et al. (2005), ao estudarem a qualidade de água da região de Janaúba e Jaíba, avaliaram 10 poços tubulares e encontraram valores médios de $pH = 7,2$, $CE = 1,2 \text{ dS m}^{-1}$, RAS = 0,6, $HCO_3^- + CO_3^{2-} = 7,8$, $Na^+ = 1,7$, $Ca^{2+} = 10,3$ e $Mg^{2+} = 1,6 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, com valores médios de $pH_c = 6,7$, $IS = 0,5$ e $IE = 6,2$. Assim, estas águas foram classificadas como isentas de problemas de precipitação ou corrosão.

Maia et al. (1998) pesquisaram na região do Baixo Assu (RN), as características físico-químicas de 30 análises de águas de poços tubulares para classificação quanto a obstrução e corrosão, e concluíram que 3 análises foram incrustantes e 27 corrosivas. Com a mesma finalidade, Maia et al. (1997) avaliaram 316 análises de água da Chapada do Apodi (CE) e

concluíram que 61% destas foram incrustantes, 29% corrosivas e 31% neutras (IS médio = 0,12). Ambas as águas se caracterizaram como cloretadas-sódicas. Na região do Baixo Assu ocorreram médios teores de Ca^{2+} e HCO_3^- , e no Apodi, ocorreram elevados teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e médios de HCO_3^- .

Este trabalho teve por objetivo avaliar e classificar a qualidade das águas subterrâneas da região de Janaúba e Jaíba para fins de irrigação, com relação à capacidade de incrustação e corrosão e estimar a quantidade média de ácido suficiente para evitar a precipitação sob a forma de carbonatos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização e Fisiografia da Área de Abrangência do Estudo

As amostras de água analisadas foram coletadas na região Norte de Minas, em poços tubulares localizados entre os rios São Francisco, Verde Grande e Gortuba, denominada Depressão SanFranciscana. Essa região possui altitude de aproximadamente 518 m, e está compreendida entre os paralelos $14^{\circ}00'$ e $16^{\circ}00'$ e os meridianos $44^{\circ}00'$ e $44^{\circ}30'$. A classificação do clima da região, segundo Koeppen é Aw, caracterizado por chuvas concentradas no verão e secas nos meses do inverno. Possui pluviosidade média anual de 871 mm, concentrada no período entre os meses de novembro a março. A temperatura média anual é de 24°C e as médias de verão e inverno são 32 e $19,5^{\circ}\text{C}$, respectivamente. A insolação é de 2763 horas anuais com umidade relativa média de 70,6%, sendo que no período seco pode chegar a 20%. A evapotranspiração potencial média calculada pelo método de Hargreaves, para Janaúba, é da ordem de 1.649 mm anuais e o déficit hídrico médio é de 778 mm ano^{-1} (Rodrigues et al., 2002).

Os dados utilizados para o presente estudo foram provenientes dos boletins de análises de água emitidos pelo Laboratório de Solos, Plantas e Água do Centro Tecnológico Norte de Minas (CTNM), da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG). Foi adquirido um total de 280 e 170 análises de água de poços tubulares distribuídos na região de Janaúba e Jaíba, respectivamente, obtidas no período de 1999 e 2006.

4.2 Características e Metodologias de Classificação da Água

Avaliaram-se as características físico-químicas potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE) em dS m^{-1} a 25°C , cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), Cloro (Cl^-), carbonato (CO_3^{2-}) e bicarbonato (HCO_3^-) em mg L^{-1} , determinadas segundo Embrapa (1997), bem como, as relações $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ e $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$. Foram estimadas as médias do índice de saturação do carbonato de cálcio (IS), segundo Ayers & Westcot (1991), do índice de estabilidade (IE), segundo Ryznar (1944) e do cálcio corrigido (Ca°), segundo Suarez (1981). Foi calculado o volume de ácido clorídrico (HCl) e fosfórico (H_3PO_4) para rebaixamento do pH e neutralização da alcalinidade de saturação do CaCO_3 , segundo Abreu (1987). O erro iônico foi calculado segundo Teissedré (1988).

Foi determinada a média aritmética, a moda e a amplitude da classe modal e o coeficiente de variação dos dados das características físico-químicas da água, com o auxílio do programa computacional estatístico Sisvar, versão 5.0, segundo Ferreira (2003).

Para a interpretação das características da qualidade de água adotaram-se as metodologias, segundo Ayers & Westcot (1991), Ryznar (1944) e Teissedré (1988).

O volume de ácido para neutralizar a alcalinidade foi calculado pelas equações 1, 2, 3 e 4, segundo Abreu (1987).

Cálculo do fator “f” através da alcalinidade corrigida (Alc_c):

$$pAlc_c = pAlc + IS \quad \therefore Alc_c = 10^{-pAlc_c} \quad (1)$$

Cálculo da concentração de $CO_3^{2-} + HCO_3^-$ a eliminar (Alc_e):

$$Alc_e = Alc - Alc_c = f(\text{mmol}_c L^{-1}) \quad (2)$$

Onde:

$$Alc = CO_3^{2-} + HCO_3^- \quad (3)$$

$$\text{Volume do ácido (L)} = \frac{f}{M * x} \quad (4)$$

Onde:

M = Molaridade dos ácidos $H_3PO_4 = 14,61 \text{ mol L}^{-1}$ e $HCl = 11,97 \text{ mol L}^{-1}$;

x = Número de hidrogênios ácidos ou ionizáveis.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi determinado o erro iônico das análises de água, para averiguar o equilíbrio de cátions e ânions, ou seja, verificar a ausência significativa de íons nas análises, devido à probabilidade de ocorrência de elementos como boro, ferro ou sulfato ou de outros íons não quantificados presentes em quantidades apreciáveis nas águas. O erro iônico médio verificado para as análises físico-químicas das águas de diferentes poços tubulares foi igual a -11 e -14% para a região de Janaúba e Jaíba, respectivamente. Com base no valor médio de CE da água, a diferença média entre cátions e ânions admitida seria de até -6,48% para Janaúba e -7,04% para Jaíba, segundo Custodio & Llamas (1983). No entanto, os valores de erro iônico encontrados podem ser creditados à ausência dos íons Fe e Mn nas análises obtidas, uma vez que, segundo Nunes et al. (2005), são elevados os teores destes elementos na água dessa região. É aconselhável, portanto, que se faça uma análise completa para constatação dos teores dos íons ausentes das análises.

As características físico-químicas das águas subterrâneas dos municípios de Janaúba e Jaíba necessárias ao estudo da precipitação ou corrosão pelo $CaCO_3$ estão apresentadas na Tabela 1. A classificação das características físico-químicas: CE, HCO_3^- e pH, relativas à sodicidade e alcalinidade da água de Janaúba e Jaíba, para fins de irrigação estão apresentadas na Tabela 2.

Os valores médios de CE das águas foram de $0,86 \text{ dS m}^{-1}$ e $1,06 \text{ dS m}^{-1}$ para Jaíba e Janaúba, respectivamente. Os menores valores de CE de Jaíba, quando comparados aos de Janaúba, se devem provavelmente a maior proximidade do Rio São Francisco, dreno natural da bacia considerando-se uma macro-toposequência, ou seja, pelo fator de diluição/depuração da água.

Tabela 1. Características físico-químicas da água de poços tubulares da região de Janaúba e Jaíba.

Composição	Janaúba				Jaíba			
	Me	Mo	A	CV	Me	Mo	A	CV
pH	7,11	7,00	2,90	5,81	7,23	7,45	2,20	5,80
CE	1,06	0,98	3,30	45,46	0,86	0,91	1,62	30,45
Ca ²⁺	158,72	145,29	539,68	48,02	131,26	125,25	238,77	34,85
Mg ²⁺	29,18	29,67	132,18	65,27	22,13	16,66	77,82	62,92
K ⁺	6,65	4,69	39,88	51,48	4,69	3,91	39,88	127,31
Na ⁺	42,99	43,45	218,63	69,82	31,27	20,92	188,98	94,92
HCO ₃ ⁻	761,40	912,10	2013,33	42,68	560,68	429,51	1708,28	48,55
CO ₃ ²⁻	1,80	0,00	60,00	397,10	0,90	0,00	30,00	408,10
Cl ⁻	119,14	80,84	624,04	82,67	108,50	120,55	567,31	58,31

pH adimensional; CE em dS m⁻¹; íons em mg L⁻¹; média (Me), moda (Mo); amplitude (A); coeficiente de variação (CV) em %. Fonte de dados: CTNM/EPAMIG (1993 a 2006).

Tabela 2. Classificação das características físico-químicas relativas à sodicidade e alcalinidade da água de Janaúba e Jaíba, para fins de irrigação.

Características físico-químicas	Janaúba			Jaíba		
	SR	RM	RS	SR	RM	RS
pH	40,14	56,63	3,23	25,00	69,50	5,49
CE	15,41	82,79	1,80	27,44	72,56	0,00
HCO ₃ ⁻	0,40	32,67	66,93	1,45	26,81	71,74
Ca ²⁺	19,0	54,50	26,5	30,5	59,75	9,75

Graus de restrição: SR = sem restrição; RM = restrição moderada; e RS = restrição severa em % de poços amostrados. Fonte de dados: CTNM/EPAMIG (1993 a 2006); Fonte de classificação: Ayers & Westcot (1991).

A classificação da CE quanto ao uso das águas na irrigação é de moderada restrição em 72,56 % a 82,79% dos poços analisados. Isto se deve à ampla faixa de 0,7 dS m⁻¹ a 3,0 dS m⁻¹ considerada de restrição moderada ao uso da água pela classificação de Ayers & Westcot (1991). A CE pode ser uma variável a auxiliar no diagnóstico da precipitação e corrosão, já que em elevados valores tem-se maior probabilidade de conter teores mais elevados de Ca²⁺ e CO₃⁻, ou seja, ocorrer saturação ou subsaturação de CaCO₃, segundo Suarez (1981).

Verificaram-se valores médios dos íons de Ca²⁺ iguais a 158,72 mg L⁻¹ e 131,26 mg L⁻¹ e de Mg²⁺ iguais a 29,18 mg L⁻¹ e 22,13 mg L⁻¹ para Janaúba e Jaíba, respectivamente. Apesar das médias destes íons estarem dentro de uma faixa de normalidade para água de irrigação, a amplitude de seus valores ultrapassam a faixa de normalidade, segundo Ayers & Westcot (1991) e expressam a variação de qualidade de água indicando suficiência de Ca²⁺ para correspondência ao HCO₃⁻ na formação de CaCO₃.

Os valores médios e modais de pH foram pouco superiores a 7 para os dois municípios. Porém, a amplitude de 2,2 e 2,9 para Jaíba e Janaúba, respectivamente, indicam grande variabilidade desta característica nas análises de água. O pH da água segundo Ayers & Westcot (1991) é classificado como de restrição moderada em 56,6% e 69,5% dos poços de Janaúba e Jaíba, respectivamente. Assim, percebe-se para a maioria dos poços analisados dos

dois municípios uma água de moderada alcalinidade ($4,5 < \text{pH} < 5,5$ e $7,0 < \text{pH} < 8,0$). Valores médios de pH semelhantes foram encontrados por Nunes et al. (2005) e Silva & Carvalho (2004), em análise da água calcária da região, com pH 7,2 e 7,0, respectivamente.

Os valores médios de Ca^{2+} $158,72 \text{ mg L}^{-1}$ e $131,26 \text{ mg L}^{-1}$ das águas classificam-nas como de risco moderado para uso na irrigação, observando-se a ocorrência desta classe em 54,50% e 59,75% das análises de água para Janaúba e Jaíba, respectivamente. Salienta-se sobre o risco de formação de precipitados de fósforo se for feita fertirrigação com fertilizantes fosfatados nestas águas.

Observaram-se elevados teores médios e modais de HCO_3^- da água dos dois municípios, e que condizem com a formação geológica cárstica, que confere sua natureza carbonatada-cálcica, conforme os estudos geológicos realizados por Ramos & Paixão (2003). Variações nos teores de HCO_3^- podem ser observadas pelos elevados valores de amplitude verificados para Janaúba e Jaíba, iguais a $2013,33 \text{ mg L}^{-1}$ e $1708,28 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente.

Para a classificação da água quanto aos teores de HCO_3^- , maiores percentuais de poços amostrados, iguais a 63,93% e 71,74% indicaram restrição severa, e 26,81% e 32,67% restrição moderada, observados para Janaúba e Jaíba, respectivamente.

Esta classificação evidencia seu potencial de alcalinização pela ação neutralizadora dos íons H^+ e precipitação de CaCO_3 e carbonato de magnésio (MgCO_3). Em análise conjunta dos valores médios e amplitude de classe do HCO_3^- , do Ca^{2+} e das relações $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ e $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ igualmente elevados, pode-se inferir que seja alta a probabilidade da condição precipitante destas águas.

As características físico-químicas estimadas: pHc, IS, IE, Ca° e as relações $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ e $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Estatística descritiva das características físico-químicas da água subterrânea dos municípios de Janaúba e Jaíba.

Características físico-químicas	Janaúba				Jaíba			
	Me	Mo	A	Cv	Me	Mo	A	Cv
pHc	6,69	6,55	2,50	5,30	6,79	6,80	2,80	5,62
IS	0,41	0,36	3,44	121,09	0,30	0,37	3,90	123,70
IE	6,04	5,89	4,72	12,61	6,37	6,26	6,18	9,42
$\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$	4,24	3,81	14,16	63,20	4,79	3,70	17,10	68,91
$\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$	2,86	2,10	43,44	159,43	2,01	2,11	14,77	75,84
Ca°	33,67	32,06	379,96	77,83	32,87	35,27	63,93	31,13

Concentração de íons de hidrogênio associada com o equilíbrio do carbonato (pHc); índice de saturação (IS); índice de estabilidade (IE); relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$; e relação $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ adimensionais; cálcio corrigido (Ca°) em mg L^{-1} ; média (Me), moda (Mo); amplitude (A); coeficiente de variação (CV) em %. Fonte de dados: CTNM/EPAMIG (1993 a 2006); Fonte de cálculos das variáveis físico-químicas: Ayers & Westcot (1991); Ryznar (1944); Suarez (1981).

Os valores médios e modais de pHc foram próximos de 7, mas com uma amplitude média elevada de pelo menos 2,5 e CV pouco acima de 5%, para os dois municípios. Esses valores propiciam um IS médio variável de 0,30 a 0,41, o que confere às águas a condição de precipitantes, com valores de amplitude pouco acima de 3 e CV próximo de 120%.

Verificaram-se valores médios e de amplitude da relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ superiores a 4,0 e 14,0, respectivamente para os dois municípios. A magnitude destes valores indica a disponibilidade do Ca^{2+} devido a sua predominância como cátion e permite concluir que se o valor de pH for favorável, pode ocorrer precipitação de CaCO_3 .

O Ca° , segundo Suarez (1981), representa a concentração final de Ca^{2+} que permaneceria na solução do solo como resultado da interação entre a relação $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ e a salinidade total (CE) da água de irrigação. Os teores médios estimados de Ca° foram semelhantes nos dois municípios. Porém, se verificou elevado valor de amplitude para Janaúba, quando comparado a Jaíba. Empiricamente, a diferença entre os teores Ca^{2+} e Ca° poderia ser considerada como a quantidade de Ca^{2+} precipitado sob alguma forma de sal.

Os valores médios do IS de 0,41 e 0,30 para os municípios de Janaúba e Jaíba, respectivamente, são indicativos de condição precipitante, porém, próxima à neutralidade. Em Janaúba, as análises precipitantes somam um percentual de 85,25 contra 14,75 das análises corrosivas, e em Jaíba, 89,10% das análises são precipitantes e 10,90% são corrosivas.

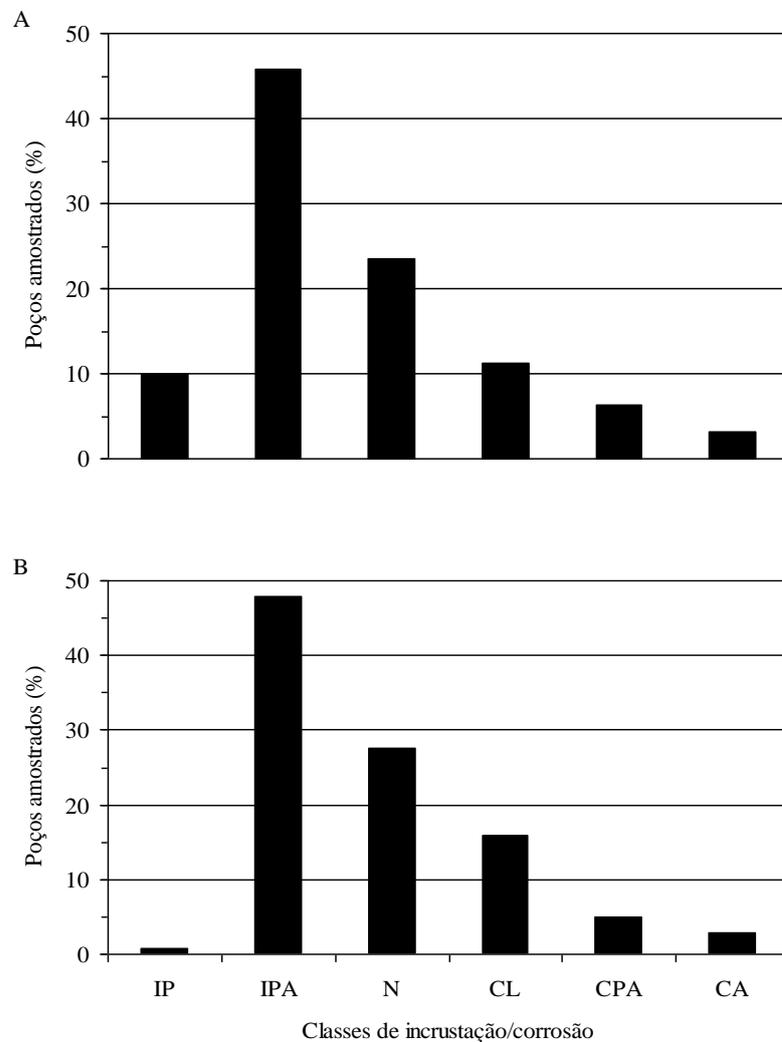


Figura 1. Distribuição de frequência das classes de incrustação e corrosão da água de Janaúba (A) e Jaíba (B). Fonte de dados: CTNM/EPAMIG (1993 a 2006); Fonte de classificação: Riznar (1944).

Ao estabelecer-se uma relação entre HCO_3^- e Ca^{2+} pode-se analisar empiricamente a disponibilidade do ânion e do cátion para a formação do CaCO_3 . Para Janaúba, tem-se que em 78,5% das águas analisadas os valores da relação $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ são maiores que 1, enquanto em Jaíba, 66,67% foram maiores que 1. É forte o indicativo da condição precipitante das águas.

Os valores médios e modais para o IE entre 6 e 6,4 são indicativos de que as águas dos dois municípios, de modo geral, são classificadas como neutras, à exceção de Janaúba com moda igual a 5,89 (incrustante em partes aquecidas). Apesar de um valor relativamente baixo de CV igual a 12,6 e 9,4, observou-se elevada amplitude de classe igual a 4,72 e 6,18, para Janaúba e Jaíba, respectivamente, o que indica uma grande variabilidade da qualidade de água da região, quanto a propensão à precipitação.

A distribuição de frequência das classes de precipitação/corrosão das análises de água está apresentada na Figura 1, indicando: IP - incrustações pesadas, IPA - incrustações em partes aquecidas; N - neutra, CL - corrosão leve, CPA - corrosão em partes aquecidas e CA - corrosão acentuada. Observa-se que em pouco mais de 45% dos poços amostrados a água propicia problemas de incrustações em partes aquecidas.

Tabela 4. Quantidade de ácido (L m^{-3}) a se aplicar na água subterrânea de Janaúba e Jaíba para neutralizar a sua alcalinidade e acidificá-la a diferentes valores de pH.

Ácido/Redução de pH	Janaúba				Jaíba			
	Me	Mo	A	Cv	Me	Mo	A	Cv
HCl / 5,5	1,065	1,067	2,780	41,277	1,019	1,161	2,276	40,662
HCl / 6,0	1,045	1,053	2,780	42,168	0,998	1,133	2,274	41,553
HCl / 6,5	1,033	1,043	2,780	42,686	0,986	1,113	2,278	42,101
HCl / 7,0	1,024	1,039	2,770	43,093	0,976	1,109	2,279	42,509
H_3PO_4 / 5,5	0,284	0,305	0,740	41,250	0,272	0,310	0,607	40,659
H_3PO_4 / 6,0	0,279	0,296	0,740	42,244	0,266	0,302	0,606	40,535
H_3PO_4 / 6,5	0,275	0,278	0,740	42,822	0,263	0,300	0,608	42,107
H_3PO_4 / 7,0	0,273	0,294	0,740	43,045	0,260	0,296	0,608	42,508

Ácido clorídrico (HCl) e fosfórico (H_3PO_4); média (Me), moda (Mo); amplitude (A); coeficiente de variação (CV) em %. Fonte de dados: CTNM/EPAMIG (1993 a 2006); Fonte de cálculo do volume de ácido: Abreu (1987).

Entretanto, ao considerar a normalidade de cada ácido para o cálculo do volume de ácido a ser aplicado, se observa uma quantidade média igual a 0,7 L excedente de HCl com relação ao H_3PO_4 . Assim, em função da solubilidade dos elementos resultantes da aplicação destes ácidos: fosfato de cálcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) = 1,2 mg L^{-1} a 20°C e cloreto de cálcio (CaCl_2) = 813 g L^{-1} a 25°C, da concentração do produto comercial e do custo de mercado, pode-se optar pelo ácido mais adequado sob ponto de vista técnico e econômico para prevenção de precipitações na forma de CO_3^{2-} . Com o propósito de racionalizar o uso de ácido na prevenção de precipitação, segundo Vermeiren & Jobling (1997) são realizados ensaios satisfatórios com injeções periódicas de soluções (0,5 a 1%) de HCl a 36%, seguidas de uma lavagem com água.

6 CONCLUSÕES

Elevados valores médios de bicarbonato (HCO_3^-) e da relação $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ conferem potencial precipitante à maioria da água de poços tubulares dos municípios de Janaúba e Jaíba, especificamente na forma de carbonato de cálcio (CaCO_3), sob condições climáticas favoráveis.

Valores médios de índice de saturação do carbonato de cálcio (IS) e índice de estabilidade (IE) são indicativos da ocorrência de precipitação em uma condição próxima à neutralidade.

Com o uso dessas águas na irrigação, tornar-se-á mais freqüente a ocorrência de problemas de incrustações, quando comparados àqueles advindos de sua ação corrosiva.

A precipitação do carbonato (CO_3^{2-}) em tubulações de irrigação pode ser evitada pela aplicação sistemática de ácido clorídrico (HCl) e fosfórico (H_3PO_4) nas quantidades médias de $1,0 \text{ L m}^{-3}$ e $0,3 \text{ L m}^{-3}$, respectivamente, para as águas subterrâneas de Janaúba e Jaíba.

7 AGRADECIMENTOS

À Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) pelo fornecimento dos boletins de análises de água da região de Janaúba e Jaíba. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão de bolsas de estudos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, J. M. H. **Obturaciones**. In: CURSO INTERNATIONAL DE RIEGO LOCALIZADO, 1987, Canárias: INIA, 1987, p. 16.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. 2. ed. Campina Grande: UFPB, 1991. 218 p. (Estudos FAO: Irrigação e drenagem, 29).

CENTRO TECNOLÓGICO NORTE DE MINAS. **Segundo plano de desenvolvimento integrado do Noroeste Mineiro**: Síntese. Belo Horizonte: CTNM, 1981. 130 p. (Série de publicações técnicas).

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. 2. ed. Barcelona: Omega, 1983. 1200 p.

EGREJA FILHO, F. B.; MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C. de. Método computacional para correção da alcalinidade de águas para fertirrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 415-423, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

- FERREIRA, D. F. **Programa de análises estatísticas (statistical analysis software) e planejamento de experimentos - SISVAR 5.0 (Build 67)**. Lavras: UFLA/DEX, 2003. CD-ROM.
- FIGUEIREDO, L. P. et al. **Uso de ácido cítrico e complexo enzimático na prevenção de obstrução de vazão em simulação de fertirrigação**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 8., 2004, Lages. **Anais...** Lavras: UFLA, 2004. CD-ROM.
- LANGELIER, W. F. The analytical control of anticorrosion water treatment. **Journal of American Water Works Association**, Denver, v. 28, n. 10, p. 1500-1521, 1936.
- LIMA, L. A.; SILVA, E. Irrigação por gotejamento em café. **Revista Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, DF, v. 48, p. 50-55, set. 2000.
- MAIA, C. E; MORAIS, E. R. C. de. Qualidade da água para fertirrigação por gotejamento. II. Região do Baixo Assu, RN. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 6 n. 1, p. 12-26, 1998.
- MAIA, C. E; MORAIS, E. R. C. de; OLIVEIRA, M. de. Qualidade da água para fertirrigação por gotejamento. I. Região da Chapada do Apodi, RN. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 5, n. 4, p. 293-307, 1997.
- NAKAYAMA, F. S, BUCKS, D. A. Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 24, n. 4, p. 77-80, 1981.
- NUNES, W.A.G. de A. et al. Qualidade da água de irrigação de poços tubulares e do rio Gorutuba na região de Janaúba-MG. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 4, p. 403-410, nov./dez. 2005.
- PEIXOTO, C. A. de M.; ESCODINO, P. C. B.; MARQUES, A. F. S. M. Água subterrânea para irrigação na região cárstica do Norte de Minas Gerais e Sul da Bahia: discussão preliminar. **Revista Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, DF, n. 86, p. 11-17, 1986.
- RAMOS, M. L. S.; PAIXÃO, M. M. O. M. **Disponibilidade hídrica de águas subterrâneas: produtividade de poços e reservas explotáveis dos principais sistemas aquíferos**. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2003. 41 p.
- RODRIGUES, M. G. V.; SOUTO, R. F.; MENEGUCCI, J. L. P. Efeito da poda da última penca do cacho da bananeira prata anã (AAB) irrigada na produção de frutos no norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 108-110, abr. 2002.
- RYZNAR, T. A new index for determining the amount of calcium carbonate scale formed by a water. **Journal of American Water Works Association**, Denver, v.36, n.3, p.472-494, 1944.

SILVA, J.T.A. da; CARVALHO, J.G. de. Propriedade do solo, estado nutricional e produtividade de bananeiras 'Prata anã' (AAB) irrigadas com águas calcárias. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.28, n.2, p.332-338, mar./abr., 2004.

SUAREZ, D. L. Relation between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternate method of estimating SAR of soil or drainage waters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 469-475, 1981.

TEISSÉDRE, J. M. **Qualidade da água para irrigação**. ABEAS: Brasília, DF, 1988. 31 p. (Curso de elaboração de projetos de Irrigação. Módulo 3.2).

VEIMEIREN, L.; JOBLING, G. A. Irrigação localizada. **In: GHEYI, H. R. et al. Campina Grande: UFPB, 1997. 184 p. (Estudos FAO Irrigação e drenagem, 36).**