

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

AGRUPAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE POÇOS DE UM PEQUENO AQUIFERO ALUVIAL: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIACHO FORQUILHA EM QUIXERAMOBIM- CE/BRASIL

*João Roberto Façanha de Almeida¹
Horst Frischkorn¹

GROUPING OF WATER QUALITY OF WELLS FROM A
SMALL ALLUVIAL AQUIFER: A CASE STUDY OF THE
FORQUILHA WATERSHED OF QUIXERAMOBIM-
CE/BRAZIL

Recibido el 1 de agosto de 2014; Aceptado el 5 de febrero de 2015

Abstract

In most arid and semi-arid areas, groundwater emerges as an important source of water for human consumption and small irrigation. In the semiarid region of the Northeast of Brazil, alluvial aquifers are presented as a water solution for small isolated communities distant from large urban centers. These aquifers have a moderate hydrogeological potential but water of excellent quality, in comparison with aquifers located in crystalline basement areas, predominant in the Brazilian Northeast. However, these alluvial aquifers are fragile and susceptible to degradation processes of its quality by human activities, climatic variations, or hydrogeological changes. A database consisting of 14 water samples of with hydrochemical analysis of the major ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , and HCO_3^-) from wells distributed throughout the watershed studied, was used in the preparation of water classification diagrams. In addition, multivariate statistical analysis and reverse hydrogeochemical modeling were applied with the purpose of grouping the samples and the identification of the main aquifer recharge mechanisms in a non-rainy season. Satellite images (LandSat 5) were used for delimiting the watershed and alluvial aquifer. The results were interpolated generating maps of similarities of quality levels for human consumption and irrigation.

Key Words: multivariate statistical analysis, alluvial aquifer, Forquilha watershed, Brazilian northeast, PHREEQC.

¹Universidade Federal do Ceará, Brasil

*Autor correspondente: Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Bloco 713, Avenida Humberto Monte S/N Campus do Pici, Fortaleza – CE, Brasil. CEP 60451-970. Email: jr_ufc@yahoo.com.br

Resumo

Na maioria das zonas áridas ou semiáridas, a água subterrânea surge como uma importante fonte de recursos hídricos para usos como consumo humano e de pequenas irrigações. No semiárido do Nordeste brasileiro, os aquíferos aluviais apresentam-se como uma solução hídrica para pequenas comunidades isoladas dos grandes centros urbanos, pois possuem um moderado potencial hidrogeológico e água de excelente qualidade, quando comparada com a dos aquíferos localizados nas áreas de embasamento cristalino, que são predominantes na região Nordeste do Brasil. No entanto, estes aquíferos aluviais constituem recursos frágeis, sendo susceptíveis a processos de degradação da sua qualidade por ações antrópicas, variações climáticas ou modificações hidrogeológicas. Um banco de dados composto por 14 amostras de águas dos poços distribuídos ao longo da bacia hidrográfica estudada contendo análises hidroquímicas dos íons mais abundantes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} e HCO_3^-) foi utilizado na elaboração de diagramas de classificação de águas, e análises estatísticas multivariadas e modelagens hidrogeoquímicas inversas foram aplicadas com os objetivos de realizar o agrupamento das águas e a identificação dos principais mecanismos de recarga do aquífero na época não chuvosa. Imagens de satélite (LandSat 5) foram utilizadas na delimitação da bacia hidrográfica e do aquífero aluvial. Os resultados foram interpolados gerando mapas de similaridades dos índices de qualidade para consumo humano e irrigação.

Palavras chave: análise estatística multivariada, aquífero aluvial, Bacia do Forquilha, nordeste do Brasil, PHREEQC.

Introdução

Aproximadamente 75% do Estado do Ceará se encontram em áreas cristalinas, onde o solo que recobre essas rochas varia entre 0 e 4 metros de espessura (Leal, 1969); já os outros 25% são de coberturas sedimentares cenozóicas presentes principalmente no litoral cearense, na serra de Ibiapaba, com coberturas sedimentares paleozóicas, na chapada do Apodi, com coberturas sedimentares mesozóicas e na chapada do Araripe, com predominância de coberturas da era mesozóica, além da bacia do Iguatu, localizada no sertão central do Ceará, com coberturas predominantemente cenozóicas.

No entanto, em meio a áreas cristalinas, existem, ao longo das margens dos rios, riachos e nas desembocaduras dos cursos d'água, depósitos recentes de sedimentos inconsolidados, chamados de aluvião. Os aluviões são planos, possuem uma drenagem regular e são férteis devido às misturas de materiais diferentes, de primeira classe para a irrigação, sendo o melhor solo, física e quimicamente, de toda zona semiárida (Duque, 2001). A água armazenada nesses aquíferos aluviais é extremamente importante para algumas comunidades locais, devido à fácil exploração e à boa qualidade desse recurso quando comparada às águas armazenadas em fissuras e fraturas de rochas cristalinas (Silva Júnior *et al.*, 1999; Lopes *et al.*, 2008).

Entre os anos de 1998 e 2007, foram instalados, em aquífero aluvial, mais de 350 poços no município de Quixeramobim. Já exclusivamente na bacia do riacho Forquilha, área estudada nesta pesquisa, foram instalados, em aquífero aluvial, 192 poços no mesmo período (Burte, 2008). Os poços no aquífero aluvial presentes ao longo do riacho Forquilha possuem uma grande importância para as comunidades locais por serem, juntamente com os açudes

distribuídos ao longo da bacia, as principais fontes de suprimento de água tanto para o abastecimento quanto para a agricultura em pequena escala.

Em geral, essas águas captadas nos poços monitorados da bacia do riacho Forquilha são de boa qualidade, no entanto é constatada em algumas épocas do ano uma grande variação em alguns parâmetros hidroquímicos entre poços muito próximos, onde alguns apresentam altos teores de sais dissolvidos. Com a finalidade de agrupar essas águas em termos de qualidade para sua melhor utilização, técnicas estatísticas multivariadas e modelagens de fluxo subterrâneo foram aplicadas.

Análises estatísticas de agrupamento hierárquico de dados de solos foram utilizadas por Feldhausen e Ali (1975) para classificarem e interpretar em fácies sedimentares da Baía de Barataria em Louisiana, onde identificaram cinco tipos diferentes de sedimentos nas 69 amostras estudadas; Freire *et al.* (2014) identificaram em análises de agrupamento oito tipos de solos no Perímetro irrigado de Custódia, Pernambuco, Brasil. Dados hidroquímicos foram utilizados por Kamble e Vijay (2011) que classificaram 17 pontos de coletas de águas em três classes de poluição, sendo pouco, moderadamente e altamente poluídas, em uma região costeira de Mumbai, Índia; Hussain *et al.* (2008) examinando a qualidade da água para irrigação de uma área ao leste da Arábia Saudita, classificaram 17 amostras de água em três classes distintas, utilizando 23 parâmetros hidroquímicos; Arslan (2013) classificou em sua pesquisa as águas subterrâneas de uma área de planície ao norte da Turquia, que sofre com problema de intrusão marinha, em três classes distintas sendo água doce, água em processo de salinização e água salinizada; já Boyacıoğlu *et al.* (2013) agruparam os íons semelhantes no estudo da qualidade de 22 amostras de águas utilizadas na investigação de prioridades no uso da água na bacia do Rio Gediz, Turquia.

Page *et al.* (2012) aplicaram a análise de componentes principais (ACP) para examinar a interação entre rio e aquífero aluvial no noroeste da Suíça. Evoluções nas concentrações de flúor desenvolvidas por Hu *et al.* (2013) e o do arsênio por Halim *et al.* (2010) foram identificadas com ACP, enquanto Villegas *et al.* (2013) identificaram pontos de intrusão marinha no aquífero Urabá – Colômbia e Kolsi *et al.* (2013) identificaram a importância da interação água-rocha, dos despejos domésticos e da irrigação na composição das águas subterrâneas em Hajeb Elyoun – Jelma, Tunísia.

A interação entre a água subterrânea e os minerais das rochas, bem como a evolução hidroquímica da água ao longo do seu caminho de fluxo, através dos processos de precipitação e dissolução, vem despertando o interesse de pesquisadores (Fernandes, 2007). O aplicativo PHREEQC Interactive é um *software* para simular reações químicas e processos de transporte em águas naturais ou poluídas. O programa é baseado na química do equilíbrio das soluções aquosas interagindo com minerais, gases, soluções sólidas, trocadores e sorção de superfícies, e

também inclui a capacidade de modelar reações cinéticas com as equações de taxa que são completamente especificadas pelo usuário na forma de instruções básicas. A poderosa capacidade de modelagem inversa permite a identificação de reações que contam para as composições de água observada ao longo de um caminho de fluxo (Parkhurst e Appelo, 1999).

Diversos estudos utilizando o aplicativo PHREEQC e envolvendo a evolução geoquímica das águas localizadas em aquíferos aluviais foram desenvolvidos por Brown *et al.* (1998), Uliana e Sharp (2001), Machado *et al.* (2004) e Sharif *et al.* (2008).

Assim, o objetivo deste trabalho foi, por meio de estatística multivariada de análise de agrupamento hierárquico (AAH), de análise de componentes principais (ACP) e da modelagem geoquímica inversa, definir classes de águas presentes nos poços perfurados ao longo da aquífero aluvial, identificar com base nas análises hidroquímicas nos íons mais abundantes os principais mecanismos de recarga do aquífero e representar através de sistema de informação geográfica (SIG) a distribuição espacial dos índices de qualidade.

Metodologia

A bacia hidrográfica do riacho Forquilha localiza-se a sudoeste do município de Quixeramobim no Estado do Ceará, Brasil (figura 1) e estende-se por trinta quilômetros de comprimento, onde habitam cerca de 800 famílias, compondo 17 comunidades de pequenos produtores rurais (Jacob e Brandão, 2006) que cultivam principalmente milho e feijão. A bacia está localizada em área de rochas cristalinas, com depósitos aluviais dispersos que podem representar uma área de aproximadamente 5.6 km².

Esses depósitos aluviais possuem profundidade média de 6.8 m e nível piezométrico de aproximadamente 2.8 m, e estão neles alocados poços manuais tubulares rasos com mesma profundidade média, explorando o manancial hídrico subterrâneo para uso em pequenas irrigações com vazões médias de 16 m³/h.

Na bacia do riacho Forquilha encontram-se quatro açudes principais, sendo eles: Lagoa Cerada, Riacho Verde, Jardim e Riacho do Algodão. Utilizando 13 amostras de águas dos quatro açudes coletadas no período de estiagem, foi obtida uma composição média da característica físico-química das águas armazenadas nesses açudes reservatórios.

Para a realização dos estudos na bacia do riacho Forquilha, foram utilizadas 14 análises hidroquímicas, sendo 13 de águas de poços presentes no aluvião ao longo do riacho Forquilha e uma referente à média encontrada nos açudes que alimentam o riacho, realizando a recarga do aquífero aluvial em períodos de estiagem.

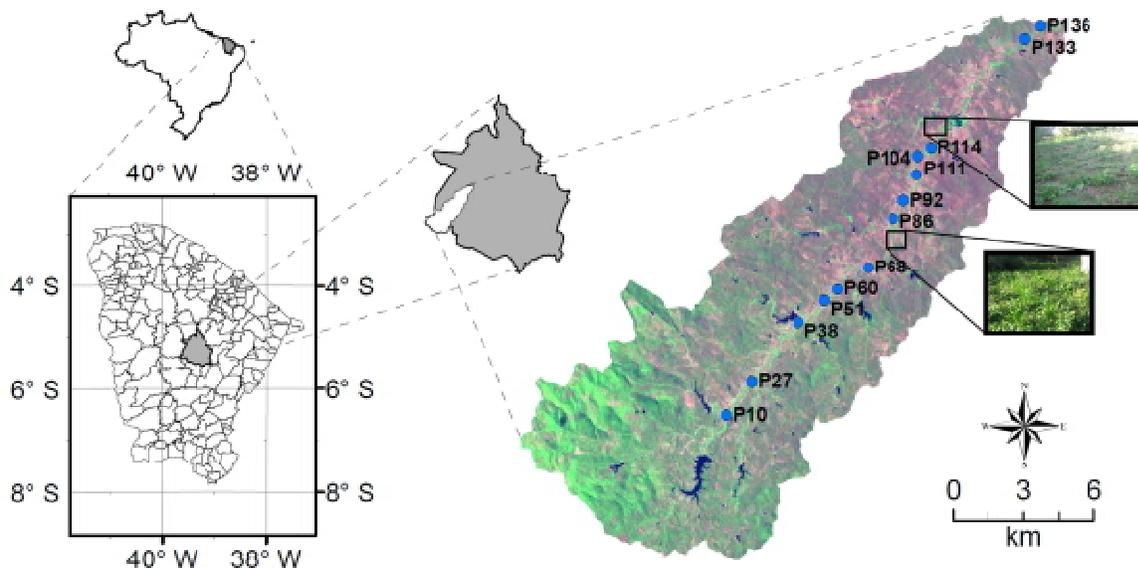


Figura 1. Localização da bacia do riacho Forquilha e dos poços distribuídos ao longo do aquífero aluvial

Esses depósitos aluviais possuem profundidade média de 6.8 m e nível piezométrico de aproximadamente 2.8 m, e estão neles alocados poços manuais tubulares rasos com mesma profundidade média, explorando o manancial hídrico subterrâneo para uso em pequenas irrigações com vazões médias de 16 m³/h.

Na bacia do riacho Forquilha encontram-se quatro açudes principais, sendo eles: Lagoa Cerada, Riacho Verde, Jardim e Riacho do Algodão. Utilizando 13 amostras de águas dos quatro açudes coletadas no período de estiagem, foi obtida uma composição média da característica físico-química das águas armazenadas nesses açudes reservatórios.

Para a realização dos estudos na bacia do riacho Forquilha, foram utilizadas 14 análises hidroquímicas, sendo 13 de águas de poços presentes no aluvião ao longo do riacho Forquilha e uma referente à média encontrada nos açudes que alimentam o riacho, realizando a recarga do aquífero aluvial em períodos de estiagem.

Todos os dados utilizados nesta pesquisa passaram pelos seguintes critérios de seleção: i) exclusão de dados no período chuvoso: o estudo se baseou no período não chuvoso. Desta forma, os dados obtidos para o meses chuvosos foram descartados, pois os efeitos da diluição com água de recarga poderiam levar a médias menores do que as realmente encontradas nos poços do aquífero aluvial nos períodos não chuvosos; ii) balanço iônico: em uma análise hidroquímica completa, a concentração (em meq/L) total de íons positivos (cátions) deve ser aproximadamente igual à concentração de íons negativos (ânions). O desvio percentual desta

igualdade é determinado pelo coeficiente de erro da análise. Os erros admitidos nesta pesquisa foram de até 10%. Os dados dos reservatórios tiveram uma tolerância maior por se tratarem de águas pouco mineralizadas. Os dados são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Valores das variáveis para as observações (CE em $\mu\text{S}/\text{cm}$ e concentrações dos íons em mg/L)

Observações	CE	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
Açudes	361.9	22.0	16.0	31.0	13.5	47.1	4.2	134.8
P10	1090.0	30.4	72.5	87.1	1.8	167.6	31.9	409.1
P27	435.0	22.4	23.0	30.1	6.8	54.3	5.4	175.0
P38	1170.0	39.2	44.2	143.1	2.5	178.9	20.6	420.2
P51	928.0	42.4	40.3	103.7	3.7	113.1	21.0	398.0
P60	736.0	28.8	36.5	73.1	7.1	106.9	9.7	295.7
P68	1242.0	56.8	55.0	117.3	7.1	243.7	12.5	363.5
P86	1298.0	36.0	51.8	154.8	5.3	233.4	45.2	372.1
P92	1160.0	40.0	39.6	144.7	4.9	206.1	29.9	342.6
P104	1368.0	68.2	67.6	120.7	11.1	239.9	46.8	419.0
P111	937.0	38.7	38.2	104.8	11.7	152.0	25.8	340.1
P114	1203.0	49.6	66.2	110.4	1.8	191.7	29.7	415.7
P133	1297.0	31.2	45.1	172.3	5.9	234.4	5.5	391.8
P136	1491.0	35.2	66.7	167.0	6.1	321.8	15.9	373.4

Análises estatísticas multivariadas

A análise estatística de agrupamento hierárquico, também conhecida como análise de conglomerados, classificação ou cluster, tem como objetivo dividir os elementos da amostra, ou população, em grupos de forma que os elementos pertencentes a um mesmo grupo sejam similares entre si com respeito às características, que são as variáveis de cada elemento.

O agrupamento dos elementos é realizado de acordo com as distâncias de dissimilaridade, produzindo um dendrograma onde as amostras semelhantes são agrupadas entre si. A interpretação do dendrograma é: quanto menor a distância entre os elementos, maior a semelhança entre eles. Os dendrogramas apresentam os elementos e os respectivos pontos de fusão ou divisão dos grupos formados em cada estágio (Ferreira, 1996) e são especialmente úteis na visualização dos elementos semelhantes que possuem dimensão maior do que três, onde a representação em gráficos convencionais não é possível.

Existem muitas maneiras de serem medidas as dissimilaridades entre elementos, como, por exemplo, a distância generalizada ou ponderada, distância de Minkowsky, coeficiente de concordância simples, coeficiente de concordância positiva, coeficiente de concordância de Jaccard, que podem ser encontradas na literatura (Rencher, 2002; Mingoti, 2005; Härdle e Simar, 2007).

Nesta pesquisa, foi utilizada a distância euclidiana, que é uma das técnicas mais utilizadas em análise de agrupamentos hierárquicos (Gauch, 1982). A distância euclidiana entre os elementos $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ e $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ em um espaço n-dimensional é obtida pela seguinte equação:

$$DE(P, Q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

$DE(P, Q)$: Distância Euclidiana entre os elementos P e Q

As técnicas hierárquicas aglomerativas são realizadas por sucessivas fusões, onde iniciam com tantos grupos quanto aos objetos, ou seja, cada objeto forma um agrupamento. Inicialmente, os objetos mais similares são agrupados e fundidos formando um único grupo. O processo é repetido, e com o decréscimo da similaridade, todos os subgrupos são fundidos, formando um único grupo com todos os objetos (Ferreira, 1996).

Existem diversas técnicas hierárquicas aglomerativas, como: ligação simples (single linkage), ligação completa (complete linkage), média das distâncias (average linkage), método do centroide (centroid method) e método de Ward.

O método de Ward foi a técnica utilizada nesta pesquisa e baseia-se na análise de variância, agrupando os elementos em grupos nos quais promovem a menor variância intra-grupo. Essa técnica é chamada também de “Mínima Variância” e os princípios em que a técnica se fundamenta são: i) cada elemento é considerado um único conglomerado e ii) em cada passo do algoritmo de agrupamento, calcula-se a soma de quadrados dentro de cada conglomerado, onde esta soma é o quadrado da distância euclidiana de cada elemento amostral pertencente ao conglomerado em relação ao correspondente vetor de médias do conglomerado (Mingoti, 2005).

O procedimento da análise de agrupamento aplicado nesta pesquisa seguiu o seguinte roteiro: i) coleta e seleção dos dados e variáveis: tratamento dos dados; ii) construção da matriz $n_{linhas} \times m_{colunas}$ (onde n são os elementos e m são as análises hidroquímicas); iii) escolha da medida de dissimilaridade: distância euclidiana; iv) escolha do método de agrupamento para a construção do dendrograma: método de Ward; e v) interpretação do significado dos grupos: interpretação dos dendogramas.

Segundo Landim (2002), a análise de componentes principais é o mais antigo método de ordenação estatística, sendo o mais conhecido com diversas aplicações em geologia, e define como sendo simplesmente o cálculo de coeficientes de correlação entre variáveis. Assim, os objetivos dessa análise foram: i) reduzir a dimensão original das n variáveis de cada observação, gerando coeficientes de correlação; e ii) facilitar a interpretação do domínio de observações,

identificando grupos de águas e seus principais componentes de qualidade. Foi utilizado o software XLSTAT 2014 nas análises de agrupamento hierárquico e de componentes principais.

Diagramas e representação espacial

O diagrama de Piper foi utilizado na classificação e comparação de diferentes grupos de águas quanto à predominância de cátions e ânions. Nos triângulos dos cátions e dos ânions são plotadas as proporções dos cátions ($rNa^+ + K^+$, rCa^{2+} e rMg^{2+}) e dos ânions (rCl^- , $rHCO_3^-$ e rSO_4^{2-}), mostrando assim as proporções relativas dos íons principais e não suas concentrações absolutas. No losango, são combinadas as informações dos dois triângulos, dando assim o tipo da água analisada.

O uso da água subterrânea na irrigação depende de alguns fatores, entre eles: a salinidade da água e a proporção de sódio em relação a outros cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} . Deste modo, foi usado nas áreas estudadas as medidas propostas pelo United States Salinity Laboratory – USSL para classificar e comparar a qualidade das águas para uso na irrigação. A medida consiste em relacionar os valores dos cátions Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , em meq/L, de acordo com a equação 2. Os valores obtidos são chamados de razão de adsorção de sódio – RAS, que mede o risco de sódio. Quanto maiores os valores de condutividade elétrica e de RAS, menos adequada é a água para a irrigação. Porém, águas com concentrações iônicas muito baixas podem ser prejudiciais aos solos devido ao potencial de dissolução do sódio.

$$RAS = \frac{rNa^+}{\sqrt{\frac{(rCa^{2+} + rMg^{2+})}{2}}} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

RAS = Razão de Adsorção Sódio

Para realizar a representação espacial dos índices de qualidade de água encontrados na área estudada, foi utilizado um conjunto de imagens LandSat 5 que possui sete imagens de bandas espectrais diferentes e uma de Modelo Digital de Elevação – DEM, para que fossem delimitados a área da bacia hidrográfica, os cursos d'água e área aluvial do rio Forquilha. Para delimitar a área aluvial, foram gerados buffers com largura média de 250 metros e inclinação máxima para extração das áreas aluvias de 4%, como sugeridos por (Burte, 2008) para o aluvião do rio da bacia hidrográfica estudada.

Modelagem geoquímica inversa

No período de estiagem, a liberação de água a partir dos açudes se tornou a principal forma de recarga do aquífero aluvial. Neste sentido, a modelagem hidrogeoquímica inversa aplicada nesta pesquisa por meio do *software* PHREEQC 2.15.0 (Parkhurst e Appelo, 1999), consistiu em encontrar um conjunto de transferências molares de minerais, gases e íons metálicos, através

de processos de dissolução e precipitação, necessárias para a obtenção da composição média dos sais dissolvidos de uma água observada em um determinado ponto do aquífero aluvial (poços de observação), a partir de uma composição média das águas dos açudes, que são as fontes de recarga do aquífero no período de estiagem. As simulações foram feitas para os poços constantes na tabela 1.

Resultados e discussões

A técnica de agrupamento hierárquico interliga as amostras por suas associações, produzindo um dendrograma onde as amostras semelhantes, segundo as variáveis escolhidas, são agrupadas entre si. A suposição básica de sua interpretação é que quanto menor a distância entre os pontos, maior a semelhança entre as amostras. Os dendrogramas são especialmente úteis na visualização de semelhanças entre amostras ou objetos representados por pontos em espaço com dimensão maior do que três, onde a representação de gráficos convencionais não é possível.

Nos dendrogramas gerados é possível identificar a formação de três classes de águas distintas, divididas entre águas de baixa (classe C1: Açude e P27), média (classe C3: P60, P51 e P111) e alta mineralização (classe C2: P10, P92, P38, P114, P136, P104, P68, P86 e P133), como mostrado na figura 2.

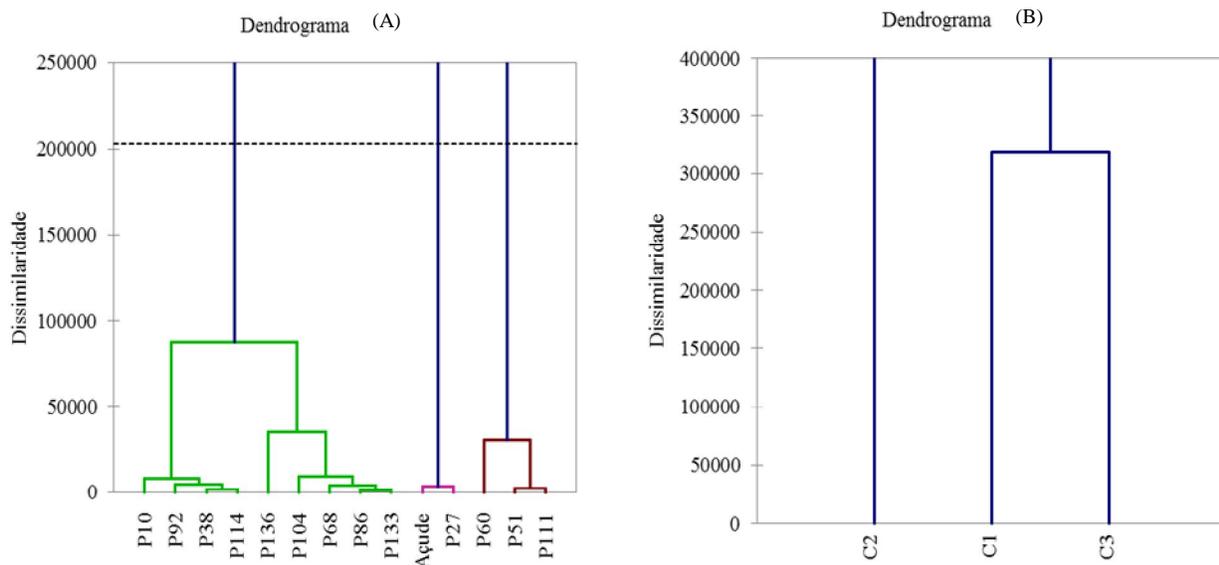


Figura 2. Dendrograma de dissimilaridade entre os poços aluviais e os açudes (A) e Dendrograma de dissimilaridade entre os centroides dos grupos (B)

Na classe C1 de agrupamento, podemos observar que a água do poço P27 se classifica como água de açude, já que a dissimilaridade calculada é de aproximadamente zero. O poço P27 é sensivelmente influenciado pelas liberações de água do açude Riacho Verde, reservatório mais próximo a montante, que libera água em períodos de estiagem. Essas duas observações possuem menores valores de mineralização.

A classe C2 de agrupamento possui o maior número de poços e, apesar de consistir em apenas uma categoria de águas, para uma melhor interpretação dos dados, essa classe foi dividida em duas, sendo classe C2I: P10, P92, P38 e P114 e classe C2II: P136, P104, P68 P86 e P133. A classe C2I se caracteriza por águas mais empobrecidas nos valores de minerais dissolvidos e de menores riscos de sodicidade para irrigação, em relação às águas da classe C2II. No gráfico de ACP (figura 3), podemos observar que as águas da classe C2I estão registrando valores negativos quanto ao fator F2, caracterizando águas mais empobrecidas nos íons K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , enquanto possuem menores valores de fator F1, caracterizando águas menos enriquecidas nos íons Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- . O poço P104, representante da classe C2II, possui altos valores da componente F1, o que lhe confere altos índices de sódio dissolvido em suas águas, o que é implica a possibilidade de algum risco de sodicidade desse grupo de águas para a irrigação.

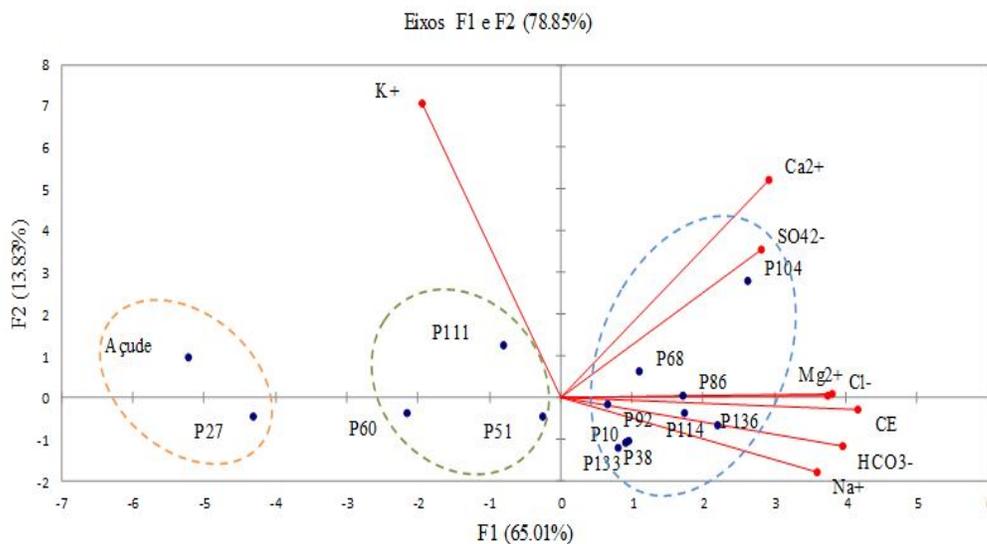


Figura 3. Análise de componentes principais das observações em relação aos fatores F1 e F2

A classe C3 se apresenta como uma classe intermediária entre águas da classe C1 e classe C2, o que implica em possíveis pontos com maiores índices de recarga por água liberadas dos açudes nos períodos de estiagem. Esses pontos possuem condutividades elétricas moderadas e baixos riscos de sodicidade.

Os poços P133 e P136 são muito próximos geograficamente, explicando assim a grande semelhança na composição química de suas águas. No entanto, os poços P60 e P68, apesar de serem próximos foram agrupados em classes distintas, apresentando assim uma grande dissimilaridade. Uma falta de conexão entre esses poços ou uma contaminação por água rica em sais oriunda de uma fissura do embasamento cristalino a montante de P68 e a jusante de P60 explicaria essa elevação significativa da condutividade elétrica de P60 (CE = 736 $\mu\text{S}/\text{cm}$) para o P68 (CE = 1242 $\mu\text{S}/\text{cm}$) em poucos metros de distancia.

Os poços P38 e P51, apesar de próximos, também apresentaram grande dissimilaridade. Pequenos vazamentos no reservatório Lagoa Cercada, que está localizado entre os dois poços, podem ser a causa da diluição e diminuição na concentração dos sais de P38 (CE = 1170 $\mu\text{S}/\text{cm}$) para o P51 (CE = 928 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Pela classificação proposta pela United States Salinity Laboratory – USSL, águas com condutividades elétricas entre 250 e 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ são águas de médio risco de salinidade, podendo ser usada sempre que houver um moderado grau de drenagem. Já águas de 750 a 2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ são classificadas como de alto risco, não sendo recomendadas para solos com deficiência de drenagem, e podendo ser usadas somente para irrigação de plantas com boa tolerância aos sais. Quanto ao risco de sódio, todas as amostras estão classificadas em baixo risco, no entanto algumas se aproximam de médio risco, como as dos poços da classe C2II.

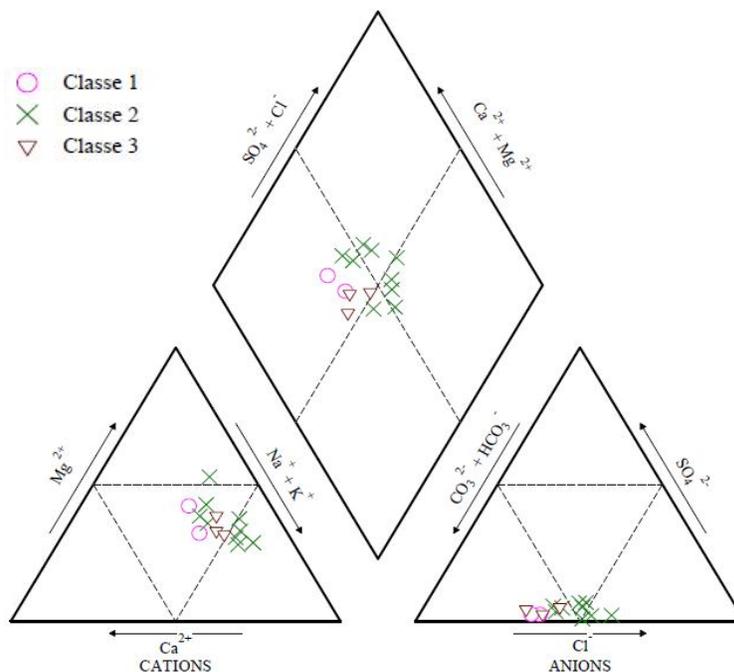


Figura 4. Diagramas de Piper das amostras dos poços do aquífero aluvial

No aquífero aluvial, as águas são em maioria bicarbonatadas mistas, assim como as águas dos açudes. Porém existem algumas amostras com predominância do tipo cloretada-sódica e cloretada-magnesiânica, semelhante às águas encontradas no aquífero fissural da região. Em relação aos cátions, 54% são de águas mistas, 38% sódicas e 8% magnesianas. Já em relação aos ânions, 54% das águas são bicarbonatadas, 23% cloretadas e 23% mistas (figura 4).

Segundo vários autores a tolerância à salinidade e/ou sodicidade varia de cultura para cultura e, dentro de uma mesma espécie (Gervásio *et al.*, 2000). Por isso é necessário um estudo específico para a utilização das águas do aquífero aluvial para a irrigação, verificando as culturas e espécies com mais tolerância às águas salobras, visto que altos teores de sais nas águas de irrigação as tornam tóxicas para as plantações, afetando diretamente o seu crescimento. Além disso, é necessário um cuidado especial no manejo das águas de irrigação, a fim de evitar uma concentração dos sais da água no solo, por evaporação da água acumulada devido a um sistema de irrigação e drenagem não muito eficientes. Distribuições espaciais da condutividade elétrica e do RAS nas águas aluviais estão apresentadas na figura 5.

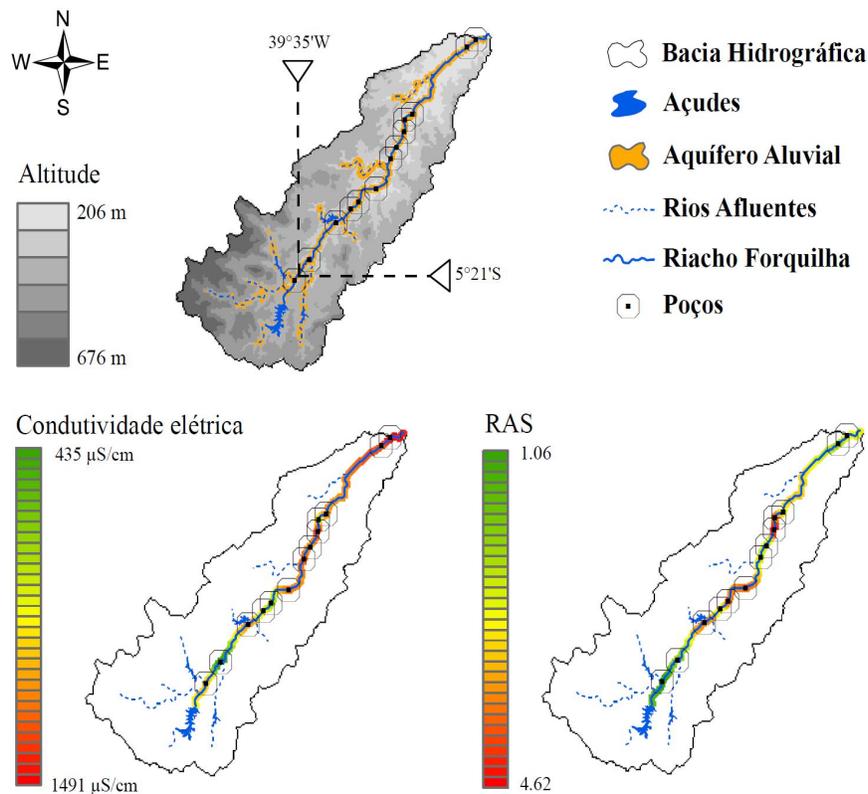


Figura 5. Distribuição espacial da condutividade elétrica e da razão adsorção sódio – RAS no aquífero aluvial do riacho Forquilha.

As simulações obtidas pelo aplicativo PHREEQC apresentam as transferências molares para o processo de evolução na concentração dos sais, onde valores positivos descrevem dissoluções, enquanto valores negativos, precipitações. Os resultados estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Transferências molares das fases reativas (mmol/L)

Fase	Fórmula química	P10	P27	P38	P51	P60	P68	P86	P92	P104	P111	P114	P133	P136
CaX ₂	CaX ₂	-5.1	-0.9	-5.1	-4.4	-2.9	-3.1	-4.1	-3.6	-4.0	-3.3	-5.4	-4.3	-4.2
MgX ₂	MgX ₂	2.2	0.4	1.1	1.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.9	0.0	0.0
NaX	NaX	5.9	1.0	4.4	3.0	3.9	3.5	5.3	7.2	4.5	3.7	3.2	8.5	8.3
KX	KX	0.0	0.0	3.5	3.1	0.0	2.6	2.9	0.0	3.5	2.5	3.8	0.0	0.0
CH _{4(g)}	CH _{4(g)}	-0.2	0.0	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	-0.3	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2	0.0	-0.1
CO _{2(g)}	CO _{2(g)}	6.8	0.9	8.5	7.9	3.4	5.8	5.6	6.3	7.8	5.4	8.2	5.7	7.2
Sulfur	S	0.3	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.4	0.3	0.4	0.2	0.3	0.0	0.1
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	-3.4	-0.6	0.0	0.0	-2.0	0.0	0.0	-2.6	0.0	0.0	0.0	-3.0	-3.0
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	5.4	1.0	5.4	4.9	3.1	4.0	4.5	4.1	5.2	3.7	6.0	4.5	4.5
K-feldspato	KAlSi ₃ O ₈	3.4	0.6	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	2.6	0.0	0.0	0.0	3.0	3.0
K-mica	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	-3.6	-0.6	-3.6	-3.3	-2.0	-2.7	-3.0	-2.7	-3.5	-2.5	-4.0	-3.0	-3.0

O poço P27 apresentou as menores taxas de trocas de fases reativas. O processo de dissolução e precipitação de minerais acontece em valores muito baixos, mostrando que o processo de recarga nesse ponto do aquífero acontece rapidamente, com pequeno tempo de contato água-rocha no caminho de fluxo. Os resultados das análises estatísticas de agrupamento hierárquico e de componentes principais mostraram resultados semelhantes, onde as águas do poço P27 possuíam características semelhantes às águas dos açudes, sem mudanças significativas das características hidroquímicas entre elas.

Outro processo considerado na simulação hidrogeoquímica, além daqueles de dissolução e precipitação descritos na metodologia, é o processo de troca iônica entre íons metálicos adsorvidos em argilas devidos principalmente à presença de arenitos argilosos no terreno aluvial. Desta forma, admitiu-se trocas entre os íons Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺, tendo como substrato a argila, representada pelo "elemento químico" X nas equações 3, 4 e 5.



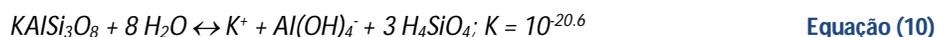
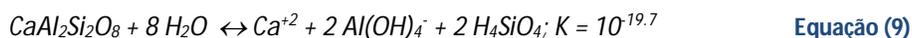
As áreas dos poços P10, P38, P51, P60 e P114 foram as que mais evidenciaram essas trocas catiônicas, tendo em geral a precipitação de cálcio, com formação de material argiloso, e dissolução de magnésio e sódio, enriquecendo as águas com esses cátions.

Exceto nos pontos P27 e P133, pequenas liberações de gás metano acontecem ao longo do aquífero, e isso decorre da decomposição anaeróbia de substâncias orgânicas inseridas no solo e lixiviadas para o aquífero aluvial, enquanto uma pequena parcela de enxofre, que é fixada pelas plantas, também é lixiviada para o aquífero, provocando um incremento desse elemento nas águas aluviais.

A elevada presença do ânion bicarbonato nas águas aluviais se deve à presença e dissolução do CO_2 do solo, como visto na tabela 2, que proporciona a ocorrência de três importantes reações: i) dissolução do gás carbônico na água (equação 6), ii) interação do gás dissolvido com a água produzindo ácido carbônico (equação 7) e iii) dissociação do ácido carbônico em água, originando carbonatos e bicarbonatos (equação 8). O H^+ transfere-se então para a fase sólida do solo e libera um cátion trocável, que é lixiviado com o bicarbonato (HCO_3^-).



As demais reações das fases reativas verificadas ao longo do caminho do fluxo da bacia pelo aplicativo PHREEQC foram a dissolução da anortita e do K-feldspato (equações 9 e 10) e precipitação da albita e K-mica (equações 11 e 12).



Conclusões

As águas do aquífero aluvial possuem características de águas salobras, com exceção do poço P27 que teve a classificação de água “doce”. A condutividade elétrica está acima do valor máximo permitido para água potável em 75% das amostras dos poços ao longo do aquífero aluvial, o que resulta em águas impróprias para o consumo humano.

Para a irrigação, apenas dois pontos do aquífero aluvial foram classificados como sendo de risco médio de salinização. Na maior parte do aquífero existe um alto risco de salinização do solo o que acarreta restrições quanto à escolha das culturas a serem cultivadas na área. O risco de sódio trocável foi classificado como sendo baixo em todo o aquífero, no entanto alguns pontos estão muito próximos do nível de médio risco de sodicidade. Um pequeno aumento do RAS das águas do aquífero afetaria o crescimento e o desenvolvimento das principais culturas da região, milho e feijão, que são sensíveis aos altos teores de sódio.

A maioria das simulações apresentou trocas catiônicas de CaX_2 , MgX_2 , NaX e KX , além de precipitações de K-mica e albita e dissoluções de anortita e K-feldspato, evidenciando a ação intempérica das águas sobre as rochas. Em todas as simulações, ocorreu dissolução de CO_2 , o que explica os altos valores de bicarbonato nas águas aluviais, dando a essas águas a classificação de águas bicarbonatadas.

As análises estatísticas multivariadas mostraram-se ferramentas poderosas na classificação das águas e na investigação de pontos de possíveis contaminações de águas oriundas de fendas do cristalino, bem como na identificação de pontos de maior taxa de recarga a partir das liberações de águas dos açudes. Já a modelagem geoquímica inversa, obtida com o *software* PHREEQC, mostrou-se uma importante ferramenta no estudo da dissolução e precipitação de sais das rochas nas áreas estudadas, sendo a ferramenta mais efetiva no estudo da evolução hidroquímica das águas subterrâneas.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes, pelo apoio financeiro, e à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, pelo apoio logístico nas diversas visitas à área de estudo.

Referências bibliográficas

- Arslan, H. (2013) Application of multivariate statistical techniques in the assessment of groundwater quality in seawater intrusion area in Bafra Plain, Turkey, *Environ Monit Assess*, **185**, 2439-2452.
- Boyacioglu, H., Gündogdu, V., Boyacioglu, H. (2013) Investigation of priorities in water quality management based on correlations and variations, *Marine Pollution Bulletin*, **69**, 48-54.
- Brown, J.G., Bassett, R.L., Glynn, P.D. (1998) Analysis and simulation of reactive transport of metal contaminants in ground water in Pinal Creek Basin, Arizona, *Journal of Hydrology*, **209**(1-4), 225-250.
- Burte, J.D.P. (2008) Os pequenos aquíferos aluviais nas áreas cristalinas semi-áridas: funcionamento e estratégias de gestão. Estudo de caso no Nordeste brasileiro. Tese Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 287 pp.
- Duque, J.G. (2001) *Solo e Água no Polígono das Secas*, Fundação Guimarães Duque, Natal, 272 pp.
- Ferreira, D.F. (1996) *Análise Multivariada*. Lavras, Minas Gerais, 394 pp.

- Feldhausen, P.H., Ali, S.A. (1975) Sedimentary facies of barataria bay, Louisiana determined by multivariate statistical techniques, *Sedimentary Geology*, **14**(4), 259-274.
- Fernandes, M.A.B. (2007) Análise estatística R-modal e modelo geoquímico inverso no estudo da qualidade da água subterrânea na região metropolitana de Fortaleza – Ceará. Tese Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 115 pp.
- Freire, M.B.G.S., Miranda, M.F.A., Oliveira, E.E.M., Da Silva, L.E., Pessoa, L.G.M., De Almeida, B.G. (2014) Agrupamento de solos quanto à salinidade no Perímetro Irrigado de Custódia em função do tempo, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **18**(S), 86-91.
- Gauch, H.G. (1982) *Multivariate analysis in community ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, 298 pp.
- Gervásio, E.S., Carvalho, J.A., Santana, M.J. (2000) Efeito da salinidade da água de irrigação na produção da alface americana, *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental*, **4**(1), 125-128.
- Halim, M. A., Majumder, R.K., Nessa, S.A., Oda, K., Hiroshiro, Y., Jinno, K. (2010) Arsenic in shallow aquifer in the eastern region of Bangladesh: insights from principal componente analysis of groundwater compositions, *Environ Monit Assess*, **161**, 453-472.
- Härdler, W., Simar, L. (2007) *Applied multivariate statistical analysis*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 458 pp.
- Hu, S., Luo, T., Jing, C. (2013) Principal component analysis of fluoride geochemistry of groundwater in Shanxi and Inner Mongolia, China, *Journal of Geochemical Exploration*, **135**, 124-129.
- Hussain, M., Ahmedb, S.M., Abderrahman, W. (2008) Cluster analysis and quality assessment of logged water at an irrigation project, eastern Saudi Arabia, *Journal of Environmental Management*, **86**, 297-307.
- Jacob, C.A.A., Brandão, J.B. (2006) *Projeto Pingo D'Água, Quixeramobim – Ceará*. Centro de Estudos em Administração Pública e Governo GV pesquisa, São Paulo, 65 pp.
- Kamble, S.R., Vijay, R. (2011) Assessment of water quality using cluster analysis in coastal region of Mumbai, India, *Environ Monit Assess*, **178**, 321-332.
- Kolsi, S. H., Bouri, S., Hachicha, W., Dhia, H.B. (2013) Implementation and evaluation of multivariate analysis for groundwater hydrochemistry assessment in arid environments: a case study of Hajeb Elyoun–Jelma, Central Tunisia, *Environ Earth Sci*, **70**, 2215-2224.
- Landim, P.M.B. (2002) *Análise estatística de dados geológicos multivariados*. Fundação Editora da UNESP, São Paulo, 120 pp.
- Leal, A.S. (1969) *Considerações sobre circulação de águas em rochas cristalinas e salinização em regiões áridas – Área piloto de Juazeiro-Curaçá, Bahia*. Sudene, Recife, 28 pp.
- Lopes, M.F.O., Vasconcelos, S.M.S., Gomes, D.F. (2008) Avaliação da qualidade das águas subterrâneas no município de Ocara – Ceará, *Revista de Geologia*, **21**, 35-48.
- Machado, C.J.F., Santiago, M.M.F., Frischkorn, H., Mendonça, L.A.R., Mendes Filho, J. (2004) Hidrogeoquímica como indicador de interconexão entre aquíferos na Chapada do Araripe utilizando o aplicativo PHREEQC. *Revista Águas Subterrâneas*, **18**, 79-87.
- Mingoti, S.A. (2005) *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada*. Editora UFMG, Belo Horizonte, 295 pp.
- Page, R.M., Lischeid, G., Epting, J., Huggenberger, P. (2012) Principal component analysis of time series for identifying indicator variables for riverine groundwater extraction management, *Journal of Hydrology*, **432–433**, 137-144.
- Parkhurst, D. L., Appelo, C.A.J. (1999) *User's Guide to PHREEQC (Version 2) – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. Geological Survey, Water-Resources Investigations, Colorado, 312 pp.
- Rencher, A.C. (2002) *Methods of multivariate analysis*. John Wiley & Sons, New York, 738 pp.
- Sharif, M.U., Davis, R.K., Steele, K.F., Kim, B., Kresse, T.M., Fazio, J.A. (2008) Inverse geochemical modeling of groundwater evolution with emphasis on arsenic in the Mississippi River Valley alluvial aquifer, Arkansas, USA, *Journal of Hydrology*, **350**(1-2), 41-55.



- Silva Júnior, L.G.A., Gheyi, H.R., Medeiros, J. F. de. (1999) Composição química de águas do cristalino do Nordeste brasileiro, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **3**, 11-17.
- Uliana, M.M., Sharp Jr., J.M. (2001) Tracing regional flow paths to major springs in Trans-Pecos Texas using geochemical data and geochemical models, *Chemical Geology*, **179**(1), 53-72.
- Villegas, P., Paredes, V., Betancur, T., Ribeiro, L. (2013) Assessing the hydrochemistry of the Urabá Aquifer, Colombia by principal component analysis, *Journal of Geochem*, **134**, 120-129.