

SIMILARIDADE DAS VARIÁVEIS HIDROQUÍMICAS COM O USO DA ANÁLISE MULTIVARIADA, NA BACIA DO SALGADO, CEARÁ¹

EVELINE VIANA SALGADO^{2*}, EUNICE MAIA DE ANDRADE³, SÁVIO DE BRITO FONTENELE², ANA CÉLIA MAIA MEIRELES³

RESUMO - O presente trabalho teve como objetivo identificar a similaridade das variáveis hidroquímicas na qualidade das águas subterrâneas na bacia hidrográfica do Salgado – Ceará, com o uso da análise estatística multivariada, bem como, efetuar a classificação das mesmas pelo emprego do Diagrama de Piper. O estudo foi desenvolvido a partir de dados secundários, fornecidos pela CPRM (Centro de Estudo Geológico do Brasil). Esta bacia apresenta na sua formação geológica, dois sistemas de aquíferos: o das rochas sedimentares (porosos, cársticos e aluviais) e o das rochas cristalinas (fissurais). A investigação foi realizada em 24 poços subterrâneos distribuídos por toda a área de drenagem da bacia hidrográfica, sendo estes dados investigados nos últimos 10 anos. Nas águas foram analisados os atributos hidroquímicos, sendo estes compostos pelos teores de: Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, CO₃, HCO₃⁻, SO₄²⁻ e CE. Dois grupos foram formados pelo emprego da análise de agrupamento, sendo estes independentes quanto às características hidrológicas, e semelhantes quanto à formação hidrogeológica. A qualidade das águas estudadas não apresentou interferência temporal. Duas componentes são responsáveis pela estrutura da qualidade das águas explicando 78,30% da variância total. Segundo o diagrama de Piper, as águas se classificaram em 55,6% como águas cloretadas mistas e 40% como águas bicarbonatadas mistas, nos grupos 1 e 2 respectivamente. A caracterização hidroquímica das águas em estudo não apresentou limitação ao consumo humano.

Palavras-chave: Qualidade das águas. Análise de agrupamento. Formação geológica.

SIMILARITY OF HYDROCHEMICAL VARIABLES OF THE SALGADO WATERSHED, CEARÁ, USING MULTIVARIABLE STATISTICS

ABSTRACT - This study aimed to identify the similarities among hydrochemical variables describing the groundwater qualities in the Salgado watershed river (Southern Ceará), with the use of multivariate statistical analysis. Also, the groundwater hydrochemistry was investigated and classified using the Piper diagram. The study was developed from secondary data provided by the CPRM (Centro de Estudo Geológico do Brasil, previously Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). The geological formation of the Salgado basin has two aquifer systems, one on sedimentary rock (porous, karst and alluvial) and another on (fractured) crystalline rock. The research was conducted in 24 groundwater wells spread out over the drainage area of the basin, with data having been collected for the last 10 years. The water samples were analyzed for their content of Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, CO₃, HCO₃⁻, SO₄²⁻ and CE. Two groups were formed by the use of cluster analysis, and both were independent with respect to their hydrological characteristics, and similar in hydro-geological formation. The water quality study showed no temporal interference. The two components explained 78.30% of the total variance of the water quality. According to the Piper diagram, the waters were classified as 55.6% mixed chlorided water and 40% mixed bicarbonate water, in groups 1 and 2 respectively. The hydrochemical characterization of the studied waters implied no limitation to their human consumption.

Keywords: Water quality. Cluster analysis. Geological formation.

*Autor para correspondência.

¹Recebido para publicação em 30/09/2010; aceito em 24/03/2011.

²Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, av. Mister Hull, s/n, Bloco 804, Campus do Pici, 60455-970, Fortaleza – CE; eveline_agronomia@hotmail.com; sbfontenele@yahoo.com.br

³Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, av. Mister Hull, s/n, Bloco 804, Campus do Pici, 60455-970, Fortaleza – CE; eandrade@pq.cnpq.br; ameiros2003@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

No Brasil, as reservas de água subterrânea são estimadas em 112.000 km³ e a contribuição multi-anual média à descarga dos rios é da ordem de 2.400 km³ ano⁻¹ (MMA, 2010). Contudo nem todas as formações geológicas possuem características hidrodinâmicas que possibilitem a extração econômica de água subterrânea para atendimento de médias e grandes vazões pontuais (BORGUETTI et al., 2004).

A qualidade e o armazenamento das águas subterrâneas dependem da formação geológica do local, geomorfologia, vegetação acima e do clima, sendo um maior ou menor armazenamento diretamente influenciado pela porosidade do aquífero (ANDRADE et al., 2010; ZIMBRES, 2010). A composição química da água subterrânea é uma junção de fatores externos e internos. A água quando percola no solo é influenciada diretamente pela litologia do local, sendo que o teor de substâncias dissolvidas nesta águas aumenta no decorrer do seu movimento no perfil do solo e assim se caracteriza a evolução química das mesmas (SILVA FILHO et al., 2000; PEDROSA; CAETANO, 2002; BORGUETTI et al., 2004; PEREIRA et al., 2006).

A região semiárida do Brasil apresenta um sistema pluviométrico irregular com grande variabilidade espacial e temporal, com um curto período de chuva (Jan/Abril) seguido de um longo período seco (Maio/Dez.). No Nordeste brasileiro existem milhares de poços subterrâneos, onde a água é utilizada para irrigação e abastecimento humano, no entanto sua qualidade varia no tempo e no espaço (BUFON; LANDIM, 2007; GOMES et al., 2007; ANDRADE et al., 2009; SOUSA et al., 2009; BUARTE et al., 2011).

Para determinação da qualidade da água são requeridas medidas de diversas variáveis, com variação temporal e espacial identificando a sua característica multivariada. A análise multivariada permite efetuar uma visão global do fenômeno, utilizando simultaneamente todas as variáveis na interpretação teórica do conjunto de dados obtidos (EVERITT; DUNN, 1991). Entre as técnicas de estatística multivariada que vem sendo empregada em estudos de qualidade das águas (VIDAL; KIANG, 2002; BRITO et al., 2006; BUFON; LANDIM, 2007; CLOUTIER et al., 2008; FECHINE; GALVÍNCIO, 2008; LOPES et al., 2009; PALÁCIO et al., 2009) pode-se citar análise de agrupamento na busca de identificar grupos de água similares quer para um caráter quantitativo ou qualitativo.

O presente trabalho teve por objetivo identificar a similaridade das variáveis determinantes da qualidade das águas subterrâneas na bacia hidrográfica do Salgado – Ceará, bem como realizar a classificação das mesmas pelo emprego do Diagrama de Piper.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido a partir de dados de águas subterrâneas na bacia hidrográfica do Salgado, a qual se posiciona na porção meridional do estado do Ceará. Limita-se a oeste com a sub-bacia do Alto Jaguaribe, ao sul com o estado de Pernambuco, ao leste com o estado da Paraíba e a nordeste com a sub-bacia do Médio Jaguaribe. Tem como principal afluente o rio Salgado, drena uma área de 12.623,89 km² e possui uma extensão de 308 km, equivalendo a 9% do território cearense (CEARÁ, 2009).

A base geológica é constituída de rochas do embasamento cristalino pré-cambriano (58,96%), representado por rochas do Arqueano ao Proteozóico superior. Sobre este substrato têm-se depósitos sedimentares como os da bacia sedimentar do Araripe que possui uma grande diversidade litológica (CEARÁ, 2009). A área em estudo apresenta uma média anual pluviométrica de 967,6 mm, o clima é do tipo semiárido quente (BSh') com e temperatura média mensal sempre superior a 18 °C.

O relevo pode ser dividido entre dois macro-compartimentos: o da superfície de Cimeira da Chapada do Araripe (800-900 m) e o da Depressão Sertaneja (350-450 m). Devido às grandes variações geológicas existe uma grande variedade de solos, sendo os predominantes: Neossolos Flúvicos, Litossolos, Luvisolos, Argissolos, Planossolos, Neossolos Litólicos e Vertissolos (CEARÁ, 2009). De acordo ainda com esta referência a bacia apresenta dois sistemas de aquíferos: o das rochas sedimentares (porosos, cársticos e aluviais) e o das rochas cristalinas (fissurais).

A base de dados utilizados neste estudo foi de origem secundária fornecida pelo Centro de Estudo Geológico do Brasil - CPRM (CPRM, 2010). A mesma é composta por 24 poços subterrâneos distribuídos por toda a área de drenagem da bacia hidrográfica do Salgado (Figura 1). Os dados empregados foram investigados nos últimos 10 anos (Tabela 1).

Os atributos considerados nesta investigação foram: sódio (Na⁺), potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), cloreto (Cl⁻), carbonato (CO₃²⁻), bicarbonato (HCO₃⁻), sulfato (SO₄²⁻) e condutividade elétrica (CE), utilizados para caracterizar hidroquimicamente as águas. Para se classificar as águas da bacia hidrográfica do Salgado em grupos similares quanto aos atributos investigados utilizou-se a análise estatística multivariada/análise de agrupamento pelo método aglomerativo via processamento no Programa *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS), versão 16.0.

Para se minimizar os erros com relação às escalas e as unidades das variáveis selecionadas, foi feita a normalização dos dados (média igual a zero e desvio padrão igual a 1) e a similaridade estimou-se por meio da distância Euclidiana ao quadrado. O algoritmo de agrupamento empregado na definição dos agregados foi o do método de Ward. A caracterização das águas da bacia hidrográfica do Salgado foi definida de acordo a similaridade entre os poços es-

Tabela 1. Identificação dos poços georreferenciados (UTM, SAD 69, ZONA 24) e formação geológica.

Município	ID	Coordenadas geográficas		Geologia
Baixio	P1	523117	9257114	Ortognaisses tonalito-granodioríticos, rochas metaultramáficas, metabásicas, calcissilicáticas, metacalcários e formações ferríferas.
Ipaumirim	P2	532581	9248908	Ortognaisses graníticos a granodioríticos.
Lavras da Mangabeira	P3	508288	9253332	Micaxistos, quartzitos, metacarbonatos, rochas calcissilicáticas, metabasaltos e/ou metagabros, metaultramáficas
Lavras da Mangabeira	P4	484929	9249860	Micaxistos, quartzitos, metacarbonatos, rochas calcissilicáticas, metabasaltos e/ou metagabros, metaultramáficas
Aurora	P5	502670	9240988	Argilas, areias argilosas, quartzosas e Quartzofeldspáticas, cascalhos argilas orgânicas.
Aurora	P6	512243	9231590	Transição entre Ortognaisses graníticos a granodioríticos.
Caririacu	P7	477417	9230358	Ortognaisses graníticos a granodioríticos, associados a migmatitos de paragnaisses.
Caririacu	P8	481461	9214482	Granitos e granodioritos de granulação grossa e porfíricos.
Juazeiro do Norte	P9	472725	9209801	Filitos, micaxistos, metassiltitos, metarenitos, metarcóseos.
Barro	P10	524204	9207466	Folhelhos e siltitos de cores variadas e com intercalações de arenitos finos.
Barro	P11	524758	9207240	Arenitos de granulometria variável e conglomerados.
Barbalha	P12	470264	9195892	Arenitos finos a médios, argilosos, amarelados e cinzentos, siltitos e folhelhos cinzentos, bem estratificados.
Porteiras	P13	483932	9165758	Arenitos finos a médios, argilosos, amarelados e cinzentos, siltitos e folhelhos cinzentos, bem estratificados.
Brejo santo	P14	502972	9175754	Arenitos brancos e amarelos, grossos, mal selecionados, friáveis e contendo madeira fóssil.
Brejo santo	P15	504119	9176086	Folhelhos e siltitos de cores variadas e com intercalações de arenitos finos.
Mauriti	P16	525572	9184664	Arenitos de granulometria variável e conglomerados.
Mauriti	P17	525023	9184030	Arenitos de granulometria variável e conglomerados.
Mauriti	P18	525269	9183116	Arenitos de granulometria variável e conglomerados.
Abaiara	P19	494500	9187173	Argilas, areias argilosas e cascalhos
Cedro	P20	500040	9280652	Ortognaisses migmatizados, paragnaisses e anfíbolitos
Jati	P21	498808	9146119	Arenitos de granulometria variável e conglomerados.
Jati	P22	498929	9146200	Arenitos de granulometria variável e conglomerados.
Milagres	P23	505362	9191391	Arenitos de granulometria variável e conglomerados.
Umari	P24	533427	9265743	Arenitos grossos, amarelados, conglomeráticos; conglomerados quartzosos; arenitos finos a médios.

Fonte: CPRM (2010).

tudados pelo emprego da técnica da análise multivariada, de agrupamento. O número de cluster definido no estudo de agrupamento depende da homogeneidade dos dados analisados.

A identificação do número de classes foi feita através de uma análise do dendrograma adotando-se

como linha de corte o intervalo da maior distância Euclidiana reescalada. O número de agrupamentos similares foi definido tomando como base uma técnica empírica descrita por Hair Júnior et al. (2005), que consiste em analisar a diferença entre os níveis de fusão no dendrograma e conciliar a existência de grupos similares. Esta técnica já vem sendo empre-

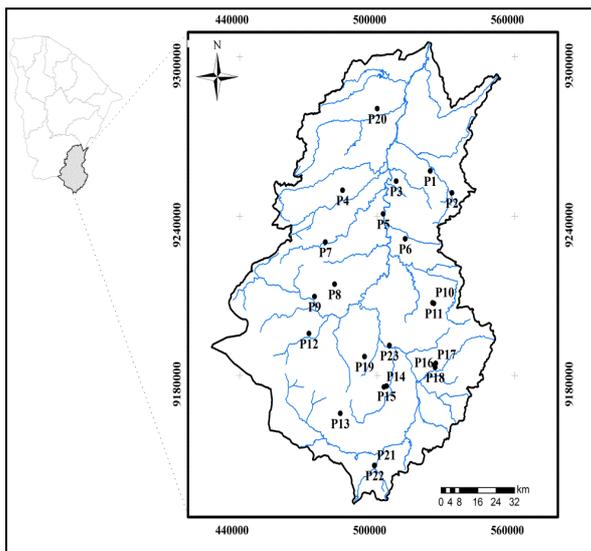


Figura 1. Bacia hidrográfica do Salgado com os pontos de estudo.

gada por diferentes pesquisadores (ANDRADE et al., 2010; FECHINE; GALVÍNCIO, 2008; PALACIO et al., 2009).

Para classificar as águas de acordo com sua composição iônica, utilizou-se o Software QUALIGRAF (FUNCEME, 2004), sendo esta classificação em função das suas concentrações de cálcio, magnésio, da soma de sódio e potássio, e, ainda, pelos ânions cloretos, sulfatos e a soma dos carbonatos e bicarbonatos. Esta representação consiste em dois triângulos, para cátions e ânions, respectivamente, e um losango que se encaixa nos dois triângulos, utilizando o mesmo eixo e escala. O conjunto dos dois triângulos e do losango compõe o “Triângulo de Piper” o qual explicita a dominância do (s) íon(s), sendo os mesmos projetados no losango e identificado o tipo ou classificação de água predominante (FUNCEME, 2004).

Técnicas de estatística descritiva e inferencial foram empregadas a fim de identificar os atributos determinantes dos grupos similares. Especificamente foram calculadas a média e o desvio padrão dos dados. A comparação entre os grupos foi realizada por meio do teste t de Student para dados não pareados, adotando-se o nível de significância de 1 e 5%. As análises foram realizadas pelo SPSS – Statistical Package for the Social Sciences, 16.0 for Windows.

A influência dos parâmetros hidroquímicos avaliados neste estudo, foi definida mediante a análise fatorial pelo método das componentes principais. Onde cada uma das n variáveis forma uma combinação linear de m fatores comuns e de um fator específico, devendo o número de fatores comuns ser inferior ao número de variáveis. Para aplicação desta metodologia seguiu-se as seguintes etapas: preparação da matriz de correlação; extração dos fatores comuns com possível redução dos parâmetros que definem a qualidade das águas; rotação dos eixos relativos aos fatores comuns, visando uma solução de mais fácil

interpretação.

Para análise dos dados utilizou-se o programa SPSS a fim de se obter as componentes principais, contando inclusive com o tratamento prévio de padronização e escalonamento dos dados. A adequabilidade dos dados foi aferida pelo método Kaiser Meyer Olkim (KMO). Este método compara a magnitude dos coeficientes de correlação observados com os coeficientes de correlação parcial.

A extração dos fatores foi obtida de acordo com a amplitude da variância da combinação linear das variáveis observadas. O número de fatores extraídos foi definido pelo critério das raízes características, onde se consideram somente componentes com autovalor superior a um, ou seja, que o fator deve explicar uma variância superior àquela apresentada por uma simples variável (HAIR JÚNIOR et al., 2005). A correlação de cada variável com os fatores é expressa, em termos algébricos, por:

$$X_i = a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \dots + a_{in}F_n + e \quad (1)$$

Onde cada variável observada ($X_1, X_2 \dots X_3$) expressa a combinação linear dos fatores, mais um termo residual (e) que representa a parte não explicada pelos fatores. Os fatores são combinados com cargas fatoriais, representadas pelas constantes “ a ”. Para facilitar a interpretação dos fatores extraídos utilizou-se o método Varimax, ou rotação da matriz das cargas fatoriais, gerando uma nova matriz de cargas fatoriais que apresenta um melhor significado interpretativo dos fatores (MONTEIRO; PINHEIRO, 2004; ANDRADE et al., 2010; LOPES et al., 2009).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo para definir o número de grupos, tomou-se como base a primeira grande diferença entre os coeficientes de dois agrupamentos consecutivos (Tabela 2). Observa-se na referida tabela que a maior variação ocorreu entre os coeficientes (136,04 – 98,09), a qual correspondeu a um aumento de 73,96% no coeficiente.

Tabela 2. Variação do coeficiente de aglomeração para a análise hierárquica de agrupamentos.

Coefficientes	Variação coeficiente	D reescalada
17,87	5,22	2,1263
23,09	5,99	2,7477
29,08	7,03	3,4608
36,11	10,61	4,2973
46,72	12,45	5,5604
59,16	12,68	7,0425
71,84	26,25	8,5516
98,09	37,95	11,6767
136,04	73,96	16,1947
210,00	*	25,0000

A Figura 2 apresenta o dendrograma, que corresponde à formação de cada grupo de acordo com os coeficientes de aglomeração reescalados, em que o menor coeficiente corresponde a 1 e o maior 25. O ponto ótimo de corte da distância reescalada ficou entre as combinações de 11,68 e 16,19, quando ocorreu um maior distanciamento quanto à similaridade, para a formação de agrupamentos posteriores.

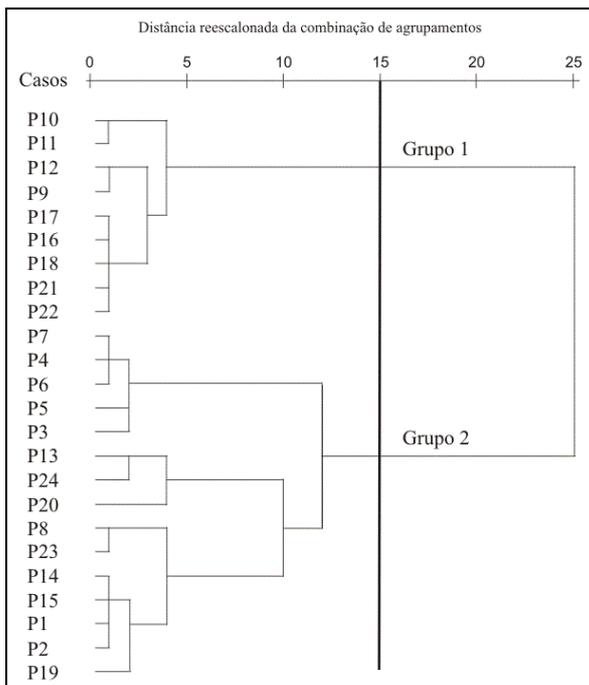


Figura 2. Dendrograma das amostras agrupadas de água subterrânea da bacia do Salgado

No dendrograma observa-se claramente que as águas subterrâneas da bacia hidrográfica do Salgado foram divididas em dois grupos distintos, onde a sazonalidade climática não foi o fator determinante na formação destes, diferenciando dos resultados obtidos por Bufon; Landim (2007) e Andrade et al. (2010). Para este estudo pode-se observar que a diferença entre os grupos ocorreu pela composição hidroquímica e a geologia dos aquíferos (Figura 3), semelhantes aos resultados obtidos por Brito et al. (2006) e Cloutier et al. (2008).

Os poços que compõem o grupo 1 apresentaram uma maior similaridade (Figura 2) dos atributos investigado do que o grupo 2. Pela Figura 3 observa-se que os poços do grupo 1 estão em maior frequência localizados sobre rochas sedimentares que tem como características porosidade primária, elevada permeabilidade, com condições favoráveis ao armazenamento e fornecimento d'água.

Quanto às características hidroquímicas, pode-se identificar as menores concentrações dos elementos analisados (Tabela 3) com médias abaixo do limite recomendado para consumo humano, segundo a Portaria nº 518/2004, do Ministério da Saúde, exceto o potássio que apresentou a média 69% superior ao

limite aceitável (BRASIL, 2005). Este alto teor de potássio pode estar associado à formação litológica dos poços, pois os mesmos podem apresentar feldspato potássico, mica muscovita e biotita, como fontes de minerais, e estes elementos são resistentes aos intemperismos físicos e químicos. Em águas subterrâneas o seu teor médio desse íon é inferior a 10 mg L⁻¹, sendo seus valores mais frequentes entre 1 e 5 mg L⁻¹ (PEDROSA; CAETANO, 2002).

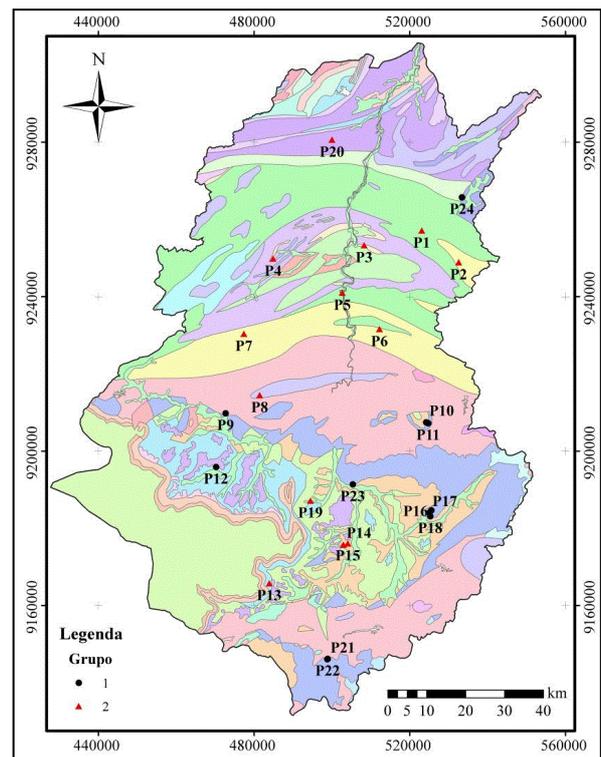


Figura 3. Mapa geológico da bacia hidrográfica do Salgado com os pontos em estudo.

O grupo 2 apresentou uma maior heterogeneidade quando comparado ao primeiro grupo. Este grupo apresenta como predomínio litológico o embasamento cristalino ou fissural, com zonas de fraturas onde armazena a água. A recarga pode ser dada através de rios e riachos que estão conectados, e isto ocorre somente no período chuvoso (CEARÁ, 2009). Estes poços apresentaram as menores profundidades, em média 89 m, sendo esta média maior do que os valores encontrados por Veríssimo e Feitosa (2002), que encontraram profundidade média de 60,4 m, concordando com a média de poços perfurados no cristalino. O embasamento rochoso ou simplesmente o tipo de solo é um fator determinante para explicar hidroquimicamente às formações dos grupos (ANDRADE et al., 2010).

Apesar do grupo 2 apresentar maiores médias nos parâmetros analisados em comparação ao grupo 1, de acordo com a determinação hidroquímica deste grupo, observa-se que as médias de todos os parâmetros foram inferiores aos limites (Tabela 3) recomendados para consumo humano, segundo a Portaria nº

Tabela 3. Características hidroquímicas dos poços em estudo.

Grupo	ID	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	CO ₃	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CE dS m ⁻¹
		mg L ⁻¹								
1	P10	22,7	35,1	3,9	9,9	54,8	0,0	18,9	3,0	366,0
	P11	22,7	36,1	3,9	10,8	57,8	0,0	19,9	3,0	369,0
	P12	12,9	0,5	4,4	5,3	19,9	0,0	34,2	5,2	147,0
	P9	23,0	0,9	1,3	1,4	45,6	0,0	8,7	3,6	324,2
	P17	12,7	17,0	7,9	13,5	34,9	0,0	42,0	2,0	253,0
	P18	15,4	12,7	8,7	20,5	32,9	0,0	73,1	6,0	302,0
	P16	8,8	15,5	5,3	14,9	46,9	0,0	55,7	2,0	210,0
	P21	9,0	16,6	23,2	13,4	58,0	0,0	65,0	4,3	380,0
	P22	19,5	17,4	28,0	23,0	66,0	0,0	92,0	7,8	517,0
2	P7	69,2	5,1	30,1	28,0	28,4	48,1	332,0	0,0	495,0
	P3	69,2	5,9	24,1	18,9	35,5	48,1	332,0	0,0	510,0
	P5	64,5	9,4	25,1	50,6	85,3	33,6	341,7	0,0	696,0
	P6	110,6	6,2	20,1	36,5	56,9	72,1	307,5	0,0	501,0
	P4	110,6	6,6	20,1	26,0	71,1	28,8	507,7	0,0	855,0
	P8	98,5	3,7	18,0	7,3	111,5	0,0	114,0	25,4	681,0
	P23	105,0	3,5	9,6	1,9	70,0	0,0	170,0	34,4	750,0
	P14	51,3	1,5	26,0	23,1	66,9	0,0	131,2	7,2	547,0
	P15	65,3	2,5	34,0	19,4	79,3	0,0	134,9	2,9	601,0
	P1	58,7	2,2	45,7	28,9	101,5	15,8	231,7	3,3	870,0
	P2	73,4	2,8	38,0	28,8	66,9	0,0	241,0	12,0	711,0
	P19	41,1	5,6	40,5	21,5	18,7	0,0	204,0	28,0	491,0
P13	54,0	2,7	48,0	37,7	178,4	0,0	118,9	41,7	858,0	
P24	125,0	10,0	54,4	36,9	164,0	26,0	188,0	32,4	1132,0	
P20	137,5	5,2	69,3	31,3	218,9	0,0	355,6	4,6	1467,8	

Fonte: CPRM (2010).

518/2004, do Ministério da Saúde (BRASIL, 2005).

Na Tabela 4 pode ser observada a análise estatística dos dados, com a concentração média dos elementos analisados em cada grupo definido pela análise de agrupamento. No grupo 1 os elementos que apresentam maior concentração média foram Cl⁻, HCO₃⁻ e CE. No que se refere ao ânion Cl⁻, águas com essas concentrações estão aptas ao consumo humano uma vez que a concentração média do íon cloro, 46,31 mg L⁻¹, está abaixo do valor máximo aceitável, que segundo a Portaria nº 518/2004, do Ministério da Saúde, é de 250 mg L⁻¹ (BRASIL, 2005).

No grupo 2 as maiores médias correspondem aos íons Na⁺, Cl⁻ e HCO₃⁻, destacando as concentrações de cloreto e sódio, o íon cloro está presente em teores inferiores a 100 mg L⁻¹. Estes teores formam compostos muito solúveis e tende a se elevar, junto com o sódio, a partir das zonas de recarga das águas subterrâneas. Teores anômalos são indicadores de

contaminação por água do mar e por aterros sanitários. As principais fontes de sódio (feldspatos plagioclásios) são pouco resistentes aos processos intempéricos, principalmente os químicos (PEDROSA; CAETANO, 2002). Como no referido grupo predomina a formação cristalina com alta heterogeneidade, Tabela 3, observa-se a presença destas fontes de sódio (feldspatos), em alguns poços (Tabela 1). Apesar dos elementos supra citados apresentarem as maiores médias, e diferirem estatisticamente a um nível de significância de 1% do grupo 1, estes valores não superam o limite aceitável de potabilidade destas águas.

O modelo de melhor ajuste na investigação das componentes determinantes da qualidade hidroquímica das águas, a Análise Fatorial/Análise da Componente Principal (AF/ACP) foi aquele composto por duas componentes (Tabela 5). A seleção do número de componentes, neste estudo, se baseou nos princípios descritos por Hair Júnior et al. (2005), onde

se considera somente aqueles que apresentam auto valor superior a um.

Os pesos fatoriais distribuídos a cada componente observados na Tabela 5, verifica-se que as duas componentes explicaram 49,91 e 28,48% da variância total dos dados, concentrando 78,39% das informações antes dissolvidas em 8 dimensões. Estes resultados foram inferiores aos obtidos por Andrade et al. (2010) que trabalhando com a qualidade das águas subterrâneas no Perímetro Irrigado do Baixo Acaraú, encontraram valores de 93,06% na variância total dos dados.

Os valores elevados dos pesos fatoriais sugerem quais são as variáveis mais significativas de cada

componente. Na componente 1 observa-se um predomínio de sais solúveis, sendo esta representante dos poços que estão localizados no cristalino, especificamente o grupo 2, correspondendo 62,5% dos poços estudados. Na componente 2 ocorreu uma predominância de carbonatos e bicarbonatos, sendo estes elementos usualmente encontrados em rochas sedimentares e calcáreas, características dos poços pertencentes ao grupo 1.

De acordo com a classificação hidroquímica dos grupos definidos como similares pela análise de agrupamento empregou-se o “diagrama de Piper”. Determinou-se com esta técnica 44,4% dos poços são classificadas como águas mistas quanto aos cá-

Tabela 4. Análise estatística descritiva dos dados.

Variável	Grupo	Concentração média	Desvio padrão	Teste t	Sig
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	1	16,30	5,83	-8,35	0,000**
K ⁺ (mg L ⁻¹)	2	82,26	29,64	2,85	0,020*
	1	16,87	12,47		
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	2	4,86	2,53	-4,08	0,001**
	1	9,62	9,40		
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	2	33,52	15,92	-3,14	0,005**
	1	12,52	6,77		
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	2	26,46	12,15	-2,25	0,035*
	1	46,31	14,73		
CO ₃ (mg L ⁻¹)	2	90,22	56,95	-2,30	0,032*
	1	0,00	0,00		
HCO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	2	18,16	23,53	-6,60	0,000**
	1	45,49	27,99		
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	2	247,34	112,89	-1,71	0,102ns
	1	4,10	1,95		
CE (dS m ⁻¹)	2	12,79	15,08	-5,42	0,000**
	1	318,69	108,26		
	2	744,38	270,19		

**significativo a 1% e *significativo a 5%, pelo teste t.

tions e 77,8% águas cloretadas em relação aos ânions, contudo podendo o grupo ser classificado em 55,6% como águas cloretadas mistas (Figura 4). Observou-se uma similaridade quanto a classificação do diagrama de Piper e a análise estatística descritiva e inferencial dos dados, a maior concentração do íon Cl⁻, determinou a classificação das águas do grupo 1. Gomes et al. (2007), analisando a hidroquímica de águas subterrâneas e superficiais na bacia do Baixo Jaguaribe, Ceará, pelo diagrama de Piper, observaram que as águas do aquífero aluvial são iguais às superficiais.

A classificação hidroquímica das águas que compõem o grupo 2, estão na Figura 5. Observa-se que 60% das águas dos poços estudados são águas mistas quanto aos cátions e 66,7% bicarbonatadas com relação aos ânions, sendo este grupo classificado em 40% como águas bicarbonatadas mistas.

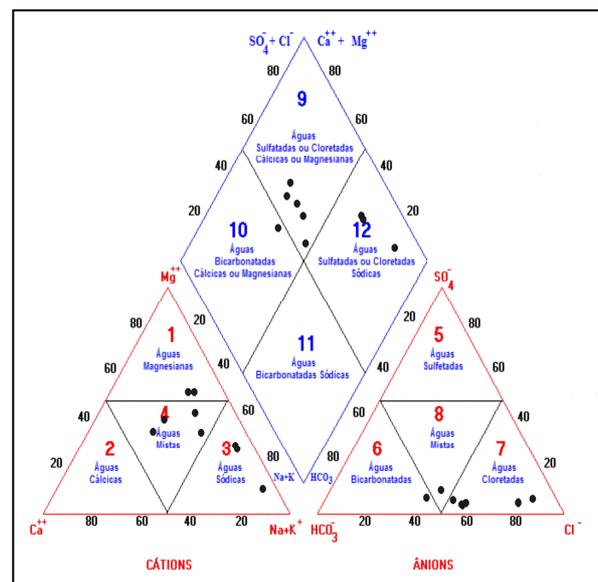
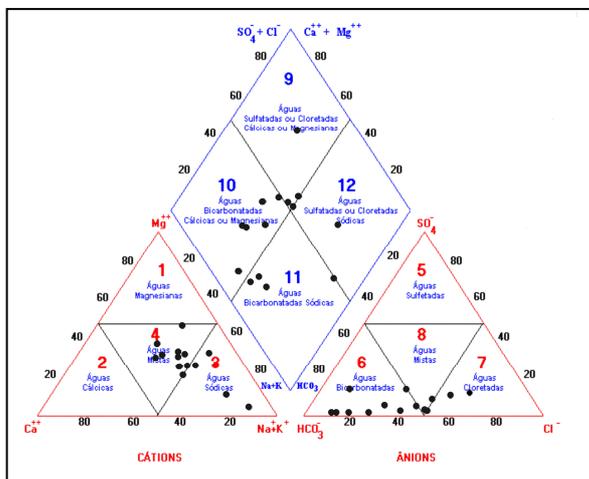


Figura 4. Diagrama de Piper para o grupo 1.

Tabela 5. Matriz de cargas fatoriais das variáveis nas duas componentes principais.

N ^o	Variáveis	Componentes ou fatores	
		CP1	CP2
1	Cl ⁻	0,951	0,038
2	CE	0,913	0,283
3	Ca ²⁺	0,876	0,217
4	SO ₄ ²⁻	0,743	-0,345
5	Na ⁺	0,690	0,552
6	Mg ²⁺	0,632	0,420
7	CO ₃	-0,047	0,896
8	HCO ₃ ⁻	0,240	0,864
Autovalor (raiz característica)		4,48	1,79
Variância explicada (%)		49,91	28,48
Variância acumulada (%)		49,91	78,39

**Figura 5.** Diagrama de Piper para o grupo 2.

Neste estudo observou-se que não existe uma similaridade espacial contínua entre os poços, contudo identificou-se uma classificação distinta em cada grupo. Em estudos das águas subterrâneas do Estado do Ceará, Fernandes et al. (2010) identificou um predomínio de águas cloretadas independentes da sazonalidade climática.

CONCLUSÕES

A utilização da estatística multivariada definiu os grupos heterogêneos, agrupando-os na forma de dendrograma, conforme a composição química de diferentes qualidades de água;

Os grupos formados pela análise de agrupamento são determinados a partir da formação hidrogeológica dos poços estudados;

Os íons Cl, Ca CO₃ e HCO₃ são os elementos hidroquímicos determinantes da qualidade das águas;

As águas do grupo 1 são classificadas em 55,6% como cloretadas mistas; e no grupo 2, 40% como águas bicarbonatas mistas;

Apesar das características hidroquímicas dos

dois grupos diferirem estatisticamente a um nível de significância de 1% estes valores não superaram o limite aceitável de potabilidade destas águas.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Estudo Geológico do Brasil (CPRM) pela concessão dos dados analisados neste estudo.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. M. et al. Land use and groundwater quality: The case of Baixo Acaraú Irrigated Perimeter, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 2, p. 208-215, 2010.
- ANDRADE, E. M. et al. Impacto da lixiviação de nitrato e cloreto no lençol freático sob condições de cultivo irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 88-95, 2009.
- BORGUETTI, N. R. B.; BORGUETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aqüífero guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba: Maxigráfica, 2004. 214 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n^o 357 de 17 de março de 2005**. Brasília, 2005. 23 p. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 20 de maio 2010.
- BUFON, A. G.; LANDIM, P. M. B. Análise da qualidade da água por metodologia estatística multivariada na represa velha (CEPTA/IBAMA/Pirassununga/SP). **Holos Environment**, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 42-59, 2007.
- BRITO, L. T. L. et al. Uso de análise multivariada na

classificação das fontes hídricas subterrâneas na bacia hidrográfica do Salitre. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 36-44, 2006.

CEARÁ. Assembléia Legislativa. **Caderno regional da sub-bacia do salgado/Conselho de altos estudos estratégicos**. Fortaleza: INESP, 2009. v. 11. 131 p.

CPRM – Centro de Estudo Geológico do Brasil. **SI-AGAS- Sistema de estudo de águas subterrâneas**. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em: 20 de jun. 2010.

CLOUTIER, V. et al. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. **Journal of Hydrology**, [S.l.], v. 353, p. 294-313, 2008.

EVERITT, B. S.; DUNN, G. **Applied multivariate analysis**. London: Edward Arnold, 1991. 400 p.

FECHINE, J. A. L.; GALVINCIO, J. D. Agrupamento da precipitação mensal da bacia hidrográfica do rio Brigida-PE, através da multivariada. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 1, n. 1, p. 39-46, 2008.

FERNANDES, F. B. P. et al. Análise de agrupamento como suporte à gestão qualitativa da água subterrânea no semiárido cearense. **Revista Agro@mbiente On-line**, Roraima, v. 4, n. 2, p. 86-95, 2010

FUNCEME. **Atualização do monitoramento dos espelhos d'água dos açudes do Estado do Ceará**. Recursos Hídricos. Fortaleza, 2004. (1 CD).

GOMES, D. F. et al. Medidas de $\delta^{18}\text{O}$ e hidroquímica de águas superficiais e subterrâneas no estudo da interação rio-aquífero, na região de Limoeiro do Norte – Baixo Jaguaribe – Ce. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 93-109, 2007.

HAIR JÚNIOR, F. et al. **Análise multivariada de dados**. Trad. SANTANNA, A. S.; CHAVES NETO, A. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593 p.

BUARTE, J. D. P., COUDRAIN, A., MARLET, S. Use of water from small aluvial aquifers for irrigation in semiarid regions. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 3, p. 635-643, 2011.

LOPES, F. B. et al. Indicadores de sustentabilidade do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, Ceará, empregando a análise multivariada. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n.1, p. 17-26, 2009.

MONTEIRO, V. P.; PINHEIRO, J. C. V. Critérios

para implantação de tecnologias e suprimentos de água potável em municípios cearenses afetados pelo alto teor de sal. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 42, n. 2, p. 365-387, 2004.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). Plano Nacional de Recursos Hídricos. Documento base de referência – minuta. Revisão. Secretaria Nacional dos Recursos Hídricos e Agência Nacional das Águas. Brasília, DF, 2003. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/pnrh/DOCUMENTOS/5Textos/20Plano%20Nacional4_04_03.pdf> Acesso em: 26 de maio 2010.

PALÁCIO, H. A. Q. et al. Similaridade da qualidade das águas superficiais da bacia do Curu, Ceará. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2494-2500, 2009.

PEDROSA, C. A.; CAETANO, F. A. **Águas subterrâneas**. Brasília: Agência Nacional de Águas, Superintendência de Informações Hidrogeológicas, 2002. 85 p. Disponível em: www.ana.gov.br/gestaoRecHidricos/InfoHidrologicas/aguasSubterr/EstudoAguasSubterrane. Acesso em: 02 de jun. 10.

PEREIRA, L. A salinidade das águas superficiais e subterrâneas na bacia da Gameleira, município de Aiuabá, Ceará. **Águas subterrâneas**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 9-18, 2006.

SILVA FILHO, S. B. et al. Monitoramento da qualidade e acúmulo de sais no solo pela irrigação. **Irri-ga**, Botucatu, v. 5, n. 2, p. 112-125, 2000.

SOUSA, R. B. C. et al. Variação sazonal das águas subterrâneas utilizadas para irrigação na microrregião de Tibau, RN. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 4, p. 206-213, 2009.

VERÍSSIMO, L. S.; FEITOSA, F. A. C. **As águas subterrâneas no nordeste do Brasil**. Região de Irauçuba-Estado do Ceará, Brasil. Fortaleza: CPRM, 2002. 8 p.

VIDAL, A. C.; KIANG, C. H. Caracterização hidroquímica dos aquíferos da bacia de Taubaté. **Revista Brasileira de Geociências**, Curitiba, v. 32, n. 2, p. 267-276, 2002.

ZIMBRES, E. **Guia avançado sobre águas subterrâneas**, 2000. Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.meioambiente.pro.br/agua/guia/aguasubterranea.htm>>. Acesso em: 19 de maio 2010.