

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA PARA CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICA DO AQUIFERO CÁRSTICO SALITRE, NA REGIÃO DE IRECÊ, BAHIA

Tereza Cristina Bittencourt Villanueva¹; Luiz Rogério Bastos Leal²; Maria do Rosário Zucchi³; José Garcia Vivas Miranda⁴ & Antônio Exedito Gomes de Azevedo⁵

RESUMO Nessa pesquisa foi efetuada uma avaliação hidrogeológica do aquífero cárstico Salitre na região de Irecê, através da aplicação de técnicas de estatística multivariada, como Correlação de Pearson, Análise de Redes e Análise dos Componentes Principais (PCA) ou Análise Fatorial em dados hidroquímicos e isotópicos. No PCA foram obtidos 3 fatores que representam a variabilidade dos dados obtidos, bem como sua similaridade e correlação. O Fator 1 é representado por uma associação linear positiva entre as variáveis: cálcio, magnésio, sódio, dureza total, bicarbonato, sólidos totais dissolvidos (STD), condutividade elétrica, cloreto, brometo, sulfato e carbono inorgânico dissolvido. O Fator 2 é definido sobretudo devido às variações de pH e, conseqüentemente, do bicarbonato presente nas águas subterrâneas da área. O Fator 3 é representado por uma relação direta entre as variáveis: sódio, potássio, condutividade elétrica, cloretos, deutério e oxigênio-18. As variáveis relacionadas ao oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e deutério (δD) demonstraram correlações elevadas entre si e com os demais parâmetros do Fator 3, em função da sua relação com os processos de salinização da área. Dessa forma, pode-se constatar que há um enriquecimento isotópico de Leste para Oeste, sobretudo no setor Norte-Noroeste, coincidente com a direção principal de fluxo na área.

Palavras-Chave: análise fatorial, análise isotópica, aquífero cárstico.

ABSTRACT This research was carried out an assessment of the hydrogeological karst aquifer Salitre in the region of Irecê, through the application of multivariate statistical techniques such as Pearson's Correlation, Network Analysis and Principal Component Analysis (PCA) or Factor Analysis on hydrochemical and isotopic data. In PCA were obtained three factors that represent the variability of the data, as well as its similarity and correlation. The Factor 1 is represented by a positive linear association between the variables: calcium, magnesium, sodium, total hardness, bicarbonate, total dissolved solids (TDS), electrical conductivity, chloride, bromide, sulfate and dissolved inorganic carbon. The Factor 2 is defined primarily due to pH changes, and consequently, the bicarbonate in the groundwater area. The Factor 3 is represented by a direct relationship between variables: sodium, potassium, electrical conductivity, chloride, deuterium and oxygen-18. Variables related to oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) and deuterium (δD) showed high correlations among themselves and with the other parameters of Factor 3 listed, depending on their relationship with the processes of salinization area. Thus, it can be seen that there is an isotopic enrichment from East to West, especially in the area North Northwest, coincident with the main direction of flow in the area.

¹ Serviço Geológico do Brasil - CPRM. SGAN, Quadra 603, Conj. J., 1º andar, Asa Norte. Brasília-DF. (tereza.villanueva@cprm.gov.br)

² Universidade Federal da Bahia - UFBA. Instituto de Geociências, Campus de Ondina. Salvador-Ba. (Irogerio@ufba.br)

³ Universidade Federal da Bahia - UFBA. Laboratório de Física Nuclear, Campus de Ondina. Salvador-Ba. (mrzucchi@ufba.br)

⁴ Universidade Federal da Bahia - UFBA. Instituto de Física, Campus de Ondina. Salvador-Ba. (vivasm@gmail.com)

⁵ Universidade Federal da Bahia - UFBA. Laboratório de Física Nuclear, Campus de Ondina. Salvador-Ba. (exedito@ufba.br)

1. INTRODUÇÃO

A Análise Fatorial ou Análise dos Componentes Principais (PCA) é frequentemente empregada como ferramenta estatística em estudos hidrogeológicos, pois reduz o número de variáveis e permite a estruturação na relação entre as variáveis, apontando agrupamentos preferenciais do grupo amostral. Nesta técnica, um conjunto de variáveis correlacionáveis é transformado em fatores não correlacionáveis, os quais podem ser interpretados como fatores independentes que delineiam um fenômeno (Davis, 1986).

O método PCA foi desenvolvido inicialmente por Spearman (1904), é uma das técnicas mais usuais do que se convencionou chamar de análise multivariada. Este tipo de correlação linear é utilizado para determinar a análise do comportamento de uma variável ou grupos de variáveis em covariação com outras. As técnicas de análise multivariada são úteis para indicar regularidades no comportamento de duas ou mais variáveis e para testar modelos alternativos de associação entre tais variáveis, incluindo a determinação de quando e como dois ou mais grupos diferem em seu perfil multivariado.

Em realidade, de acordo com Green (1976), a análise fatorial não se refere a uma única técnica estatística, mas a uma variedade de técnicas relacionadas para tornar os dados observados mais facilmente e diretamente interpretados. Assim, a análise fatorial busca definir o relacionamento entre as variáveis de modo simples, usando um número de fatores menor do que o número original de variáveis. Esse procedimento é efetuado analisando-se os inter-relacionamentos entre as variáveis de tal modo que estas possam ser descritas convenientemente por um grupo de categorias básicas, chamado de fatores.

O trabalho em questão objetiva realizar uma avaliação hidrogeológica do aquífero cárstico Salitre, localizado na região de Irecê, na porção centro norte do estado da Bahia, através da aplicação de técnicas de estatística multivariada como Correlação de Pearson, Análise de Redes e Análise dos Componentes Principais (PCA) ou Análise Fatorial; em dados hidroquímicos e isotópicos analisados nas amostras de água coletadas no aquífero, de acordo com Nossa (2011).

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área de pesquisa é formada por um polígono que compreende parte dos municípios de Irecê e Lapão, no estado da Bahia, com uma área de aproximadamente 250km² (Figura 1).

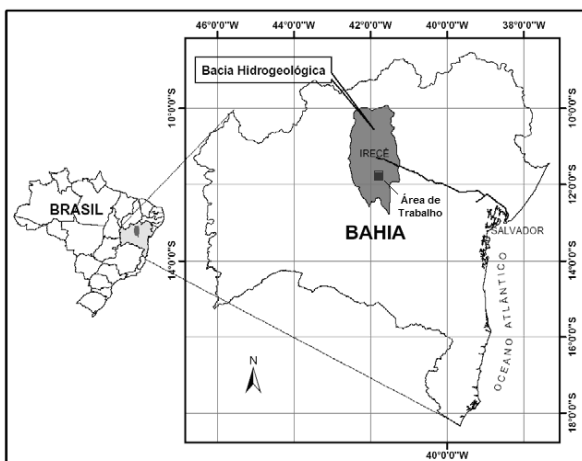


Figura 1: Mapa de localização da área.

A litologia é caracterizada por rochas essencialmente carbonáticas (calcilutitos, calcissiltitos, calcarenitos, dolomitos, lamitos algais e margas) da Formação Salitre de idade Neoproterozóica, caracterizada por Pedreira et al., (1987), como paleoambiente deposicional continental e marinho de águas rasas.

O aquífero cárstico Salitre é considerado livre e anisotrópico, com feições cársticas bem desenvolvidas, constituindo reservatórios de grande expressividade do ponto de vista de recepção, armazenamento e circulação das águas subterrâneas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Análise dos Componentes Principais (PCA) ou Análise Fatorial foi realizada para caracterizar as águas do aquífero Salitre, em função das similaridades obtidas entre os parâmetros avaliados, através da utilização do software SPSS.15 (Norusis, 1993), coletadas e analisadas por NOSSA (2011).

O diagnóstico da qualidade das águas foi efetuado através da correlação ou covariância entre um conjunto de parâmetros químicos e isotópicos selecionados (Tabelas 1 e 2), coletados nas águas subterrâneas de 36 poços tubulares na área, nos períodos de 2009 e 2010.

As análises químicas foram realizadas pelo Laboratório de Águas Minerais da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (LAMIN/CPRM), de acordo com metodologia constante em Clesceri et al., (1998), com padrões de potabilidade de água para consumo humano definidos por Brasil (2004, 2008).

As análises isotópicas para oxigênio-18 ($\delta^{18}\text{O}$), deutério (δD) e carbono inorgânico dissolvido ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$) foram realizadas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Federal da

Bahia (LFNA/UFBA), de acordo com as metodologias preconizadas por IAEA (2002), Brand et al., (2000), Epstein e Mayeda (1953) e Craig (1957).

4. RESULTADOS

4.1. Análise isotópica

A análise da Figura 2 permite verificar que, no período de coleta de 2009 o coeficiente angular da curva obtida em relação à LMG (Linha Meteórica Global) foi de 6,3; enquanto que, no período de coleta de 2010, o coeficiente angular foi de 6,6. Os valores obtidos indicam que as águas sofreram evaporação durante o processo de infiltração para os dois períodos de coleta, com maior efeito de fracionamento cinético no período seco. A similaridade dos resultados obtidos nas duas campanhas pode ter ocorrido em função da pequena variação dos índices pluviométricos nos períodos de amostragem considerados.

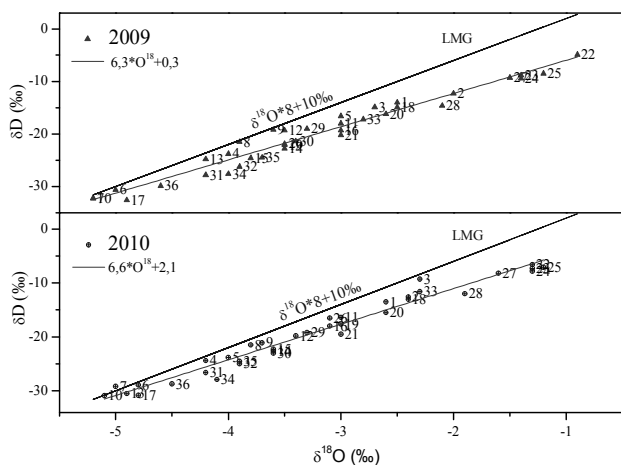


Figura 2: Gráfico ($\delta^{18}\text{O}$ x δD) das amostras de água de precipitação coletadas em várias partes do mundo - LMG (Linha Meteórica Global) (Rozanski et al., 1993). Aliado à representação das curvas obtidas na área para as campanhas de 2009 e 2010.

Os intervalos de $\delta^{18}\text{O}$ variam de (-5,2‰ a -0,9‰) a (-5,1‰ a -1,2‰). Como estes valores representam as chuvas que alimentam o aquífero nesta região, os valores isotópicos médios obtidos de $\delta^{18}\text{O}$ na área são de -3,1‰, similares aos valores isotópicos médios de $\delta^{18}\text{O}$ de precipitação da região de -3,2‰, bem como os intervalos de variação que são compatíveis com os valores obtidos através das análises de poços na área (Figura 3).

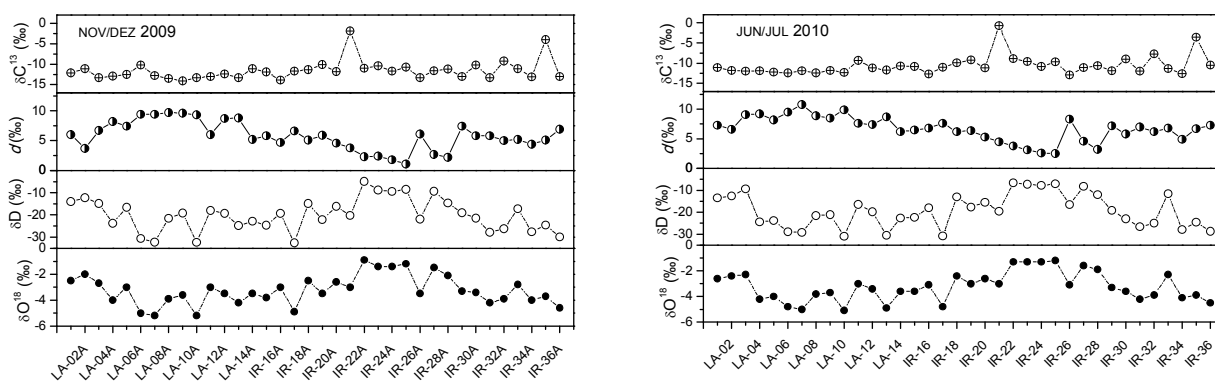


Figura 3: Representação gráfica de ($\delta^{18}\text{O}$; δD ; d ; $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$), referentes à campanha de (a) 2009 e (b) 2010.

Todos os valores obtidos para análise de ($\delta^{18}\text{O}$; δD ; $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$) são negativos, demonstrando que são águas empobrecidas em relação aos padrões VSMOW e PDB.

O excesso de deutério “ d ” varia de (1,1‰ a 9,7‰), com média de 5,8‰ na campanha de 2009 e de 6,7‰ na campanha de 2010. O aumento do excesso de deutério em 2010 em 83,3% das amostras analisadas indica contribuição da recarga proveniente das águas das chuvas neste período.

A predominância de valores isotópicos negativos para as águas da Formação Salitre é sugestiva de processo de progressiva depleção dos isótopos pesados pelo efeito continental, conforme citado por Gat (1971), sugerindo que a origem dessas águas pode ser explicada pela evaporação das águas superficiais do Oceano Atlântico Subtropical, cujos vapores são carregados pelos ventos predominantes de Leste para Oeste. Na medida em que adentra pelo continente, o vapor sobe para maiores altitudes quando transpõe serras com picos de até 1200m, como a serra da Babilônia, localizada 50km a Oeste de Irecê.

Na bacia do rio Salitre foi constatado por Santos (2008), que o $\delta^{18}\text{O}$ variou no aquífero cárstico de (-5,0‰ a -1,6‰), ou seja, as variações obtidas em toda a Bacia são muito similares às variações da área de estudo, que compreende um polígono de apenas 250km². Essa situação pode ser justificada ao se analisar as médias anuais das composições isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ para as precipitações na região obtidas na estação mais próxima, a estação de Lençóis, localizada a 52km da área, que registra precipitações bem distribuídas, no intervalo de (-0,9‰ a -7,4‰), como constatado por Azevedo et al., (1991).

Na região de Irecê foram obtidos valores médios nas análises de isótopos de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) de -5,4‰ por Siqueira (1978), de -4,9‰ para a bacia de Irecê por Bastos Leal e Silva (2004), de -4,9‰ por Beraldo (2005) e de -4,0‰ para a bacia do rio Salitre por Santos (2008). Esses valores são considerados muito próximos entre si, indicando uma similaridade isotópica entre as águas subterrâneas da região.

4.2. Correlação de Pearson

A correlação de linear de Pearson (Pearson, 1900) foi utilizada para caracterizar as correlações existentes entre os parâmetros químicos e isotópicos investigados nas águas do aquífero Salitre (Tabela 1).

Tabela 1: Matriz de Correlação de Pearson dos parâmetros químicos e isotópicos analisados nas águas do aquífero Salitre.

	Ba mg/L	B mg/L	Ca mg/L	Cu mg/L	Cr mg/L	Sr mg/L	Fe mg/L	Li mg/L	Mg mg/L	Si mg/L	Zn mg/L	Na mg/L	K mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	Dureza Total mg/L de (mScm)	Condutividade STD mg/L	pH	F ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₂ ⁻ (mg/L)	Br ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	dD	d18O	d13C
Ba mg/L	1	-0,195	0,301	-0,044	-0,132	-0,358*	-0,382**	-0,156	-0,114	-0,037	0,112	0,287	-0,292	0,261	0,159	-0,122	-0,398*	-0,260	-0,201	-0,392**	5,19**	-4,86**	0,228	0,187	-0,399*	
B mg/L	-0,195	1	0,085	0,195	0,117	0,508**	0,090	0,280	0,202	0,388**	-0,143	0,654**	0,343*	0,142	0,181	0,431**	0,083	0,405*	0,075	0,595**	-0,010	-0,039	0,307	0,274	0,307	0,257
Ca mg/L	0,301	0,085	1	0,219	0,108	0,169	0,155	0,388**	0,642**	-0,122	0,230	0,521**	0,446**	-0,169	0,886**	0,862**	-0,232	0,295	0,831**	0,323	0,760**	-0,171	0,738**	0,063	0,109	0,024
Cu mg/L	-0,044	0,195	0,219	1	0,346**	0,054	0,118	-0,022	0,138	0,103	-0,010	0,193	-0,002	-0,080	0,200	0,216	0,216	-0,005	0,416*	0,300	0,197	0,332	0,059	0,284	0,158	0,151
Cr mg/L	-0,132	0,117	0,108	0,346**	1	0,241	0,172	0,029	0,204	-0,161	-0,154	0,070	-0,020	-0,301	0,149	0,178	-0,039	0,260	0,010	-0,205	0,260	-0,106	0,151	-0,099	-0,080	0,128
Sr mg/L	-0,358*	0,085	0,169	0,054	0,241	1	0,138	0,365**	0,357**	-0,111	0,055	0,346**	0,106	-0,170	0,402**	0,402**	-0,055	0,166	0,049	0,167	0,114	-0,365**	0,537**	-0,109	-0,064	0,100
Fe mg/L	-0,382**	0,090	0,155	0,118	0,172	0,138	1	0,549**	0,266	0,087	0,191	-0,064	-0,101	0,135	0,091	0,074	0,074	0,317	0,189	-0,130	0,297	-0,269	0,635**	-0,170	-0,154	0,419*
Li mg/L	-0,351*	0,280	0,388**	-0,022	0,029	0,365**	0,549**	1	0,716**	0,066	-0,016	0,254	0,248	0,264	0,344*	0,458**	-0,321	0,452*	0,246	0,002	0,259	-0,350	0,464**	-0,300	-0,289	0,435**
Mg mg/L	-0,156	0,202	0,642**	0,138	0,204	0,357**	0,266	0,716**	1	-0,122	-0,021	0,385**	0,491**	0,016	0,803**	0,760**	-0,245	0,331	0,599**	-0,124	0,652**	-0,425**	0,490**	-0,320	-0,290	0,152
Si mg/L	-0,114	0,366**	-0,122	0,103	-0,161	-0,111	0,087	0,086	-0,122	1	-0,173	0,288	0,017	0,611**	-0,177	-0,029	-0,107	0,492**	-0,115	0,709**	-0,219	0,018	0,052	0,440**	0,481**	0,136
Zn mg/L	-0,037	-0,143	0,230	-0,010	-0,154	0,055	0,191	-0,016	-0,021	-0,173	1	0,069	-0,143	-0,213	0,259	0,166	0,166	0,467**	-0,017	0,372	-0,026	0,287	-0,255	0,408*	0,007	-0,014
Na mg/L	0,112	0,654**	0,521**	0,193	0,070	0,346**	-0,064	0,254	0,395**	0,268	0,069	1	0,638**	0,146	0,514**	0,792**	-0,010	0,348	0,472**	0,505**	0,250	-0,154	0,515**	0,540**	0,584**	0,189
K mg/L	0,287	0,343**	0,446**	-0,002	-0,020	0,106	-0,101	0,248	0,481**	0,017	-0,143	0,638**	1	-0,094	0,575**	0,667**	0,032	0,142	-0,095	0,378	-0,290	-0,145	0,022	0,328	0,304	0,018
HCO ₃ ⁻ mg/L	-0,292	0,142	-0,169	-0,080	-0,301	-0,170	0,135	0,264	0,016	0,611**	-0,213	0,146	-0,094	1	-0,233	-0,136	-0,136	-0,082	0,108	-0,009	0,524**	-0,167	-0,395**	0,100	0,053	0,143
Dureza Total mg/L	0,261	0,181	0,886**	0,200	0,149	0,279	0,091	0,434**	0,803**	-0,177	0,259	0,514**	0,575**	-0,233	1	0,915**	0,915**	-0,075	0,249	0,767**	0,093	0,822**	-0,238	0,678**	-0,081	-0,058
Condutividade (mScm)	0,159	0,431**	0,862**	0,216	0,178	0,402**	0,074	0,458**	0,760**	-0,029	0,166	0,792**	0,667**	-0,136	0,915**	1	1,000**	-0,138	0,455**	0,853**	0,315	0,744**	-0,247	0,807**	0,167	0,200
STD mg/L	0,159	0,430**	0,862**	0,216	0,178	0,402**	0,074	0,458**	0,760**	-0,029	0,166	0,792**	0,667**	-0,136	0,915**	1,000**	1	-0,138	0,455**	0,853**	0,315	0,744**	-0,246	0,807**	0,167	0,200
pH	-0,122	-0,083	-0,232	-0,005	-0,039	-0,055	-0,179	-0,321	-0,245	-0,107	0,467**	-0,010	0,032	-0,082	-0,075	-0,138	-0,138	1	-0,273	0,000	0,099	-0,034	-0,217	-0,007	0,138	0,124
F ⁻ (mg/L)	-0,398**	0,405*	0,295	0,161	0,280	0,166	0,317	0,452**	0,331	0,492**	-0,017	0,348	0,142	0,108	0,249	0,455**	0,455**	-0,273	1	0,237	0,566**	0,254	0,039	0,482**	0,247	0,233
Cl ⁻ (mg/L)	-0,260	0,075	0,831**	0,300	0,010	0,049	0,189	0,246	0,556**	-0,115	0,372	0,472**	-0,095	-0,009	0,767**	0,853**	0,853**	0,000	0,237	1	0,051	0,825**	-0,208	0,627**	0,034	0,067
NO ₂ ⁻ (mg/L)	-0,201	0,595**	0,323	0,197	-0,205	0,167	-0,130	0,002	-0,124	-0,709**	-0,026	0,505**	0,378	0,524**	0,083	0,315	0,315	0,099	0,566**	0,051	1	-0,106	0,102	0,425	0,473	
Br ⁻ (mg/L)	-0,392**	-0,010	0,760**	0,332	0,260	0,114	0,297	0,259	0,652**	-0,219	0,287	0,250	-0,290	-0,167	0,822**	0,744**	0,744**	-0,034	0,254	0,254	0,106	1	-0,174	0,530**	-0,183	
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0,191**	-0,039	-0,171	0,059	-0,106	-0,365**	-0,269	-0,350	-0,425**	0,018	-0,255	-0,154	-0,145	-0,395**	-0,238	-0,247	-0,246	-0,217	0,039	-0,208	0,038	-0,174	1	-0,239	0,286	
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	-0,486**	0,307	0,738**	0,264	0,151	0,537**	0,635**	0,464**	0,490**	0,032	0,408**	0,515**	0,022	0,100	0,678**	0,807**	0,807**	-0,007	0,482**	0,627**	0,102	0,530**	-0,239	1	0,214	
dD	0,228	0,274	0,063	0,158	-0,099	-0,109	-0,170	-0,300	-0,320	0,440**	0,007	0,540**	0,328	0,053	-0,081	0,167	0,167	0,138	0,247	0,034	0,425	-0,183	0,286	0,214	1	
d18O	0,187	0,307	0,109	0,151	-0,098	-0,064	-0,154	-0,269	-0,290	0,481**	0,007	0,584**	0,304	0,143	-0,058	0,200	0,200	0,124	0,233	0,067	0,473	-0,155	0,194	0,250	0,984**	
d13C	-0,399**	0,257	0,024	0,194	0,128	0,100	0,191	0,435**	0,152	0,136	-0,014	0,180	0,018	0,353**	-0,084	0,075	0,075	0,112	0,250	0,179	0,121	0,183	-0,209	0,420**	0,091	

* Correlação de significância com (P<0,05).

** Correlação de significância com (P<0,01).

A análise da Tabela 1 permite constatar que 70 combinações entre os elementos analisados apresentam nível de significância ($P < 0,01$) sendo, portanto, igual ou superior a 99,99%. Dessa forma, esses elementos apresentam uma correlação ótima nas águas do aquífero Salitre, sendo frequentes em aquíferos de natureza calcária.

Vale ressaltar, que foram considerados para esta análise os parâmetros que apresentaram correlações entre si e com os Coeficientes de Correlação de Pearson (r) maiores do que ($r > 0,70$), limite mínimo adotado nesta metodologia como correlação ótima a ser considerada.

Observam-se correlações em que ($r > 0,70$), para os seguintes parâmetros: cálcio com cloreto ($r = 0,733$), cálcio com dureza total ($r = 0,753$), cálcio com sólidos totais dissolvidos ($r = 0,862$), sódio com sólidos totais dissolvidos ($r = 0,791$), magnésio com sólidos totais dissolvidos ($r = 0,760$), cloreto com sólidos totais dissolvidos ($r = 0,807$) e dureza total com sólidos totais dissolvidos ($r = 0,788$). Essas correlações corroboram o quimismo do aquífero cárstico na área (Tabela 1).

4.3. Análise dos Componentes Principais (PCA) ou Análise Fatorial

A análise fatorial foi aplicada nos resultados das análises químicas e isotópicas das águas subterrâneas coletadas no aquífero Salitre na área, onde foi obtido um total de 03 fatores, considerados de acordo com as correlações diagnósticas (Tabela 2).

Fator 1 - Relacionado a rochas calcárias

O Fator 1 é representado por uma associação linear positiva entre as variáveis: cálcio, magnésio, sódio, dureza total, bicarbonato, sólidos totais dissolvidos (STD), condutividade elétrica, cloreto, brometo, sulfato e carbono inorgânico dissolvido presentes nas águas subterrâneas da região de Irecê (Tabela 2), demonstrando uma influência das rochas calcárias que constituem o aquífero cárstico Salitre, com ocorrência em toda a área.

O cálcio e o magnésio são constituintes básicos das rochas calcárias que são os principais elementos responsáveis pela dureza das águas, e são os componentes majoritários que definem o Fator 1. O cálcio apresenta valores médios que variam de 186,90mg/l a 197,15mg/l e desvio padrão variando de 54,22mg/l a 54,81mg/l. O magnésio apresenta uma variação de 54,12mg/l a 60,52mg/l, com desvio padrão variável de 19,70mg/l a 20,99mg/l. Esses parâmetros possuem valores elevados com concentrações superiores ao VMP estabelecido pelas normas internacionais da Organização Mundial de Saúde (WHO, 2003), em função da ocorrência e dissolução de minerais calcários como calcitas e dolomitas, muito frequentes na área.

Tabela 2: Matriz de Parâmetros do Método Análise dos Componentes Principais (PCA) - 2009/2010

PARÂMETROS	2009			2010		
	FATOR 1	FATOR 2	FATOR 3	FATOR 1	FATOR 2	FATOR 3
Ba ⁺² (mg/L)	0.130	0.487	-0.291	-0.561	0.168	0.445
B ⁺³ (mg/L)	0.424	0.365	-0.067	0.329	0.587	-0.187
Ca ⁺² (mg/L)	0.825	0.560	0.326	0.801	0.520	0.521
Cr ⁺² (mg/L)	0.303	0.494	-0.342	0.064	-0.284	-0.057
Sr ⁺² (mg/L)	0.413	-0.216	0.161	0.386	0.092	-0.389
Fe ⁺² (mg/L)	0.012	-0.177	0.524	0.602	-0.111	0.356
Li ⁺ (mg/L)	0.483	0.248	-0.314	0.497	-0.114	-0.602
Mg ⁺² (mg/L)	0.865	-0.225	0.249	0.722	-0.428	0.274
Si ⁺⁴ (mg/L)	0.159	0.521	0.284	0.203	0.468	0.668
Na ⁺ (mg/L)	0.601	0.204	0.567	0.571	0.372	0.772
K ⁺ (mg/L)	0.382	0.222	0.513	0.100	0.441	0.541
Dureza Total (% CaCO ₃)	0.897	0.538	-0.224	0.611	0.584	-0.444
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	0.559	0.631	0.566	0.621	0.803	0.567
Condutividade (mS/cm)	0.952	0.106	0.899	0.929	0.583	0.714
STD (mg/L)	0.371	0.180	0.458	0.929	0.083	0.514
pH	0.439	0.758	0.447	0.416	0.670	0.556
F ⁻ (mg/L)	0.281	-0.007	0.128	0.512	0.260	-0.088
Cl ⁻ (mg/L)	0.503	-0.169	0.705	0.749	-0.208	0.593
Br ⁻ (mg/L)	0.614	-0.292	-0.263	0.699	-0.487	0.401
NO ₃ ⁻ (mg/L)	-0.064	0.281	-0.142	-0.416	0.539	0.432
SO ₄ ⁼ (mg/L)	0.870	-0.225	0.202	0.884	0.041	0.055
δD (‰)	-0.162	0.363	0.869	-0.001	0.433	0.815
δ ¹⁸ O (‰)	-0.032	0.402	0.876	0.068	0.380	0.844
δ ¹³ C _{CID} (‰)	0.632	-0.277	0.357	0.465	0.291	-0.596

Método de Extração: Análise dos Componentes Principais, com 03 componentes extraídos (PCA).

O cálcio e o magnésio também demonstram fortes correlações com o bicarbonato que possui valores médios de 383,31mg/l a 440,05mg/l, relacionado a elevados valores de pH, com valores médios de 7,27 a 7,79, bem como sólidos totais dissolvidos (STD), com valores médios de 783,05mg/l a 877,37mg/l e condutividade elétrica com valores médios de 1441,56mg/l a 1559,74mg/l. Esses valores elevados evidenciam a grande quantidade de partículas em suspensão e a natureza salobra dessas águas. O carbono inorgânico dissolvido ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$) também apresenta valores elevados, indicando uma maior interação água-rocha, com valores médios de -11,5‰ a -10,6‰, o que também corrobora a importância da correlação efetuada entre o Fator 1 e as rochas calcárias.

Fator 2 - Relacionado a variações de bicarbonato e pH

O Fator 2 é definido, sobretudo, em função das variações de pH e, conseqüentemente, do bicarbonato nas águas subterrâneas da área, devido às influências diretas que os valores elevados de pH exercem sobre a elevação dos teores de bicarbonato.

Os valores de pH nas águas subterrâneas da área variam na campanha de 2009 de 6,93 a 8,27, com valor médio de 7,27 e desvio padrão de 0,28 e na campanha de 2010 apresenta valores entre 7,41 e 8,38, com valor médio de 7,79 e desvio padrão de 0,16. Os reduzidos valores de desvio padrão do pH refletem as pequenas variações obtidas entre os valores extremos para este elemento, em função da natureza alcalina dessas águas que caracteriza todo o aquífero.

Foram constatados teores elevados de bicarbonato nas águas subterrâneas da área obtidos nos resultados da campanha de 2009, com valores entre 326,63mg/l e 618,13mg/l, com valor médio de 440,05mg/l e desvio padrão de 64,11mg/l. Na campanha de 2010 foi obtido um intervalo de variação de 263,09mg/l a 506,37mg/l, com valor médio de 383,31mg/l e desvio padrão de 53,91mg/l.

Fator 3 - Relacionado à salinidade das águas e à evaporação

O Fator 3 é representado por uma relação direta, principalmente entre as variáveis: sódio, potássio, condutividade elétrica, cloretos e isótopos de deutério (δD) e oxigênio-18 ($\delta^{18}O$) presentes nas águas subterrâneas da área.

O sódio apresentou na campanha de 2009 valores entre 10,65mg/l e 163,00mg/l com valor médio de 71,05mg/l e desvio padrão de 39,10mg/l. Na campanha de 2010, as variações ocorreram no intervalo de 7,54mg/l a 159,50mg/l, com valor médio de 65,43mg/l e desvio padrão de 33,91mg/l.

As variações de potássio na campanha de 2009 foram de 1,33mg/l a 17,06mg/l, com valor médio de 4,81mg/l e desvio padrão de 3,95mg/l. Na campanha de 2010 os valores variaram de 0,92mg/l a 24,89mg/l, com valor médio de 4,46mg/l e desvio padrão de 4,81mg/l.

Os parâmetros condutividade elétrica e cloretos também obtiveram valores de correlação elevados. A condutividade elétrica variou de 811mS/cm a 2980mS/cm com valor médio de 1569,74mS/cm e desvio padrão de 473,14mS/cm na campanha de 2009. Na campanha de 2010, foram obtidos valores entre 674mS/cm e 3364mS/cm, com valor médio de 1441,56mS/cm e desvio padrão de 531,30mS/cm. Os cloretos variaram na campanha de 2009 de 28,86mg/l a 458,86mg/l, com valor médio de 179,85mg/l e desvio padrão de 97,32mg/l. Na campanha de 2010 houve uma variação de 45,02mg/l a 314,59mg/l, com valor médio de 174,91mg/l e desvio padrão de 72,68mg/l.

Sendo possível constatar uma forte correlação entre as variáveis: condutividade elétrica, cloretos e sódio.

Isótopos de oxigênio-18 ($\delta^{18}\text{O}$) obtidos na campanha de 2009, apresentaram variações entre (-5,2‰ e -0,9‰) e na campanha de 2010, variaram entre (-5,1‰ e -1,2‰), com valor médio de -3,2‰, nas duas campanhas.

O deutério (δD) apresentou na primeira campanha, variações entre (-32,6‰ e -4,9‰), com valor médio de -19,8‰. Na segunda campanha, ocorreram variações entre (-0,9‰ e -6,6‰), com valor médio de -19,3‰.

Os isótopos de oxigênio-18 ($\delta^{18}\text{O}$) e deutério (δD) também demonstraram correlações elevadas entre si e com os demais parâmetros do Fator 3 elencados, em função da sua relação com os processos de salinização da área. Dessa forma, pode-se constatar que há um enriquecimento isotópico de Leste para Oeste, sobretudo no setor norte-noroeste, coincidente com a direção principal de fluxo no aquífero Salitre na área.

4.4. Análise de correlação em rede

O método de correlação em rede, proposto inicialmente por Chialvo et al., (2005), foi aplicado nos resultados das análises químicas e isotópicas das águas subterrâneas coletadas no aquífero Salitre na área. Esse método gera uma rede de nós que representam os elementos e as conexões entre eles (arestas), demonstrando as conexões existentes entre os elementos da rede que apresentam correlações entre pares de elementos com nível de significância igual ou superior a 99,99% ($P < 0,01$), (Figura 4 a e b).

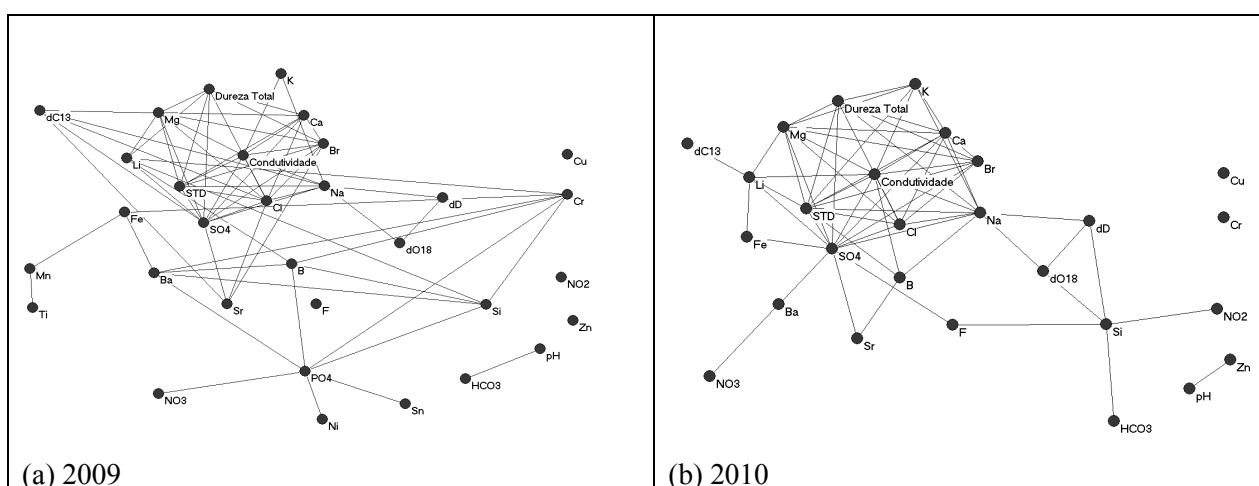


Figura 4: Rede de correlação demonstrando a relação existente entre os elementos químicos e isotópicos analisados com correlação de significância de pelo menos 99,99%. (a) 2009 e (b) 2010.

Foram consideradas amostras que apresentam um grau de correlação com nível de significância igual ou superior a 99,99%. Desta forma, a rede de correlação indica que a presença de um dos elementos considerados no ambiente implica em que o seu vizinho próximo, ou seja, o elemento diretamente relacionado tem uma probabilidade de pelo menos 99,99% de estar presente neste ambiente, com teores que variam de forma diretamente proporcional ao elemento considerado, ou seja, ao seu vizinho próximo.

Observa-se pela análise da Figura 4 (a) e (b), uma correlação linear com variabilidade espacial ($P < 0,01$), que demonstra uma estrutura anisotrópica complexa correlacionável por conexão de pontos. Os elementos principais (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , STD, Condutividade Elétrica, Dureza Total, além de Br^- e Li), formam uma teia de interdependência com os seus vizinhos próximos, indicando um elevado padrão de correlação e similaridades na variação espacial entre estes elementos presentes nas águas do aquífero Salitre.

5. CONCLUSÕES

O percentual de análises acima dos valores máximos permitidos (VMP), de acordo com as legislações aplicáveis, para os seguintes elementos: cálcio (100,00%), dureza total (75,06%), magnésio (69,00%), sólidos totais dissolvidos (22,24%), sulfato (5,56%) e fluoreto (5,56%), retratam as condições naturais do aquífero cárstico Salitre com ocorrência em toda a área.

O nitrato (83,4%) e o nitrito (2,78%) podem ter origem natural, oriundos do excesso de matéria orgânica no ambiente ou antropogênica, devido à contaminação ocasionada por saneamento básico inadequado, ou ainda, em função do uso intensivo de fertilizantes nitrogenados.

A detecção de cloreto (16,68%), pode estar associada à deficiência na circulação hídrica subterrânea ou à focos esparsos de contaminação.

A ocorrência de arsênio (8,33%), presente de forma pontual nas águas subterrâneas, pode estar relacionada à utilização inadequada de defensivos agrícolas nas culturas da área.

As águas subterrâneas analisadas se enquadram como águas de “Classe 3”, de acordo com Brasil (2008), em função da detecção de valores mais elevados que os valores máximos permitidos, sobretudo para nitrato, nitrito, cloreto, arsênio e sólidos totais dissolvidos.

O Método de Correlação em Rede aplicado mostrou-se bastante eficaz, revelando um agrupamento de elementos químicos e isotópicos fortemente correlacionáveis nas águas do aquífero Salitre.

A Análise dos Componentes Principais (PCA) ou Análise Fatorial, realizada a partir dos resultados das análises químicas e isotópicas obtidos nas amostras de águas subterrâneas coletadas na área, revelou que o Fator 1 demonstrou uma elevada correlação entre os principais parâmetros

responsáveis pela caracterização do teor de carbonatos que constituem o aquífero cárstico Salitre, com ocorrência em toda a área. O Fator 2 indicou uma associação entre o pH e o bicarbonato, sobretudo porque esse elemento é o principal responsável pela alcalinidade de águas naturais, podendo ocasionar uma série de prejuízos às plantas e aos sistemas de irrigação. O Fator 3, demonstrou a correlação existente entre os parâmetros: sódio, condutividade elétrica, cloretos e isótopos de oxigênio-18 e deutério presentes nas águas subterrâneas, bem como sua relação com os processos de salinização na área.

O oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e o deutério (δD) demonstraram correlações elevadas entre si e com os demais parâmetros do Fator 3 elencados, em função da sua relação com os processos de salinização da área. Dessa forma, pode-se constatar que há um enriquecimento isotópico de Leste para Oeste, sobretudo no setor Norte-Noroeste, coincidente com a direção principal de fluxo das águas subterrâneas na área.

6. REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, A. E. G., Cabral F. C. F., Ferreira C., 1991. Caracterização isotópica das precipitações do estado da Bahia e de águas subterrâneas da Bacia de Tucano. 2º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica. V. II. p.1023-1027.
- BASTOS LEAL, L. R., Silva H. P. da. (Org.). 2004. Modelização da dinâmica hidrológica e instrumentos para a gestão do sistema aquífero-rio das bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré - região semi-árida do estado da Bahia. Relatório técnico final do convênio de cooperação técnico-científica celebrado entre a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia e a Universidade Federal do Estado da Bahia. 435p.
- BARRETO, F. S. 2006. Avaliação da qualidade e análise de risco de contaminação da água subterrânea utilizada para fins de abastecimento humano na região de Irecê/BA. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahia, 117p.
- BERALDO, V. J. 2005. Estudo isotópico ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$) e hidroquímica na região de Irecê, Bahia: contribuição ao entendimento do ciclo hidrológico regional. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahia, 84p.
- BRAND, W. A., Avak H., Seedorf R., Hofmann D., Conradi T. 2000. New methods for fully automated isotope ratio determination from hydrogen at the natural abundance level. Geoph. Prosp. (28):967-976 p.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº518 de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para

consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Legislação. Diário Oficial da União, Brasília, v. 59, p. 266-270, 26 mar. 2004, Seção 1.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução 396, de 03 de Abril de 2008. Dispõe sobre a Classificação e Diretrizes Ambientais para o Enquadramento das Águas Subterrâneas e dá outras Providências. Diário Oficial da União, Brasília, v. 66, p. 66-68, 07 abril 2008.

CHIALVO, D. R., Eguíluz V. M., Cecchi G. A., Baliki M., Apkarian V. 2005. Scale-free brain functional networks. *Physical Review Letters*, 94p.

CLESCERI, L. S., Greenberg A. E., Eaton A. D. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th ed. American Public Health Association, Washington. 1325 p. ISBN 0875532357.

CRAIG, H. 1957. Isotope standards for carbon and oxygen and connection factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. (12):133-149 p.

DAVIS, J. C. 1986. Statistics and data analysis in geology. 2th ed. New York, J. Wiley e Sons.

EPSTEIN, S., MAYEDA T. 1953. Variations of ¹⁸O content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, (4):213-221 p.

GAT, J. R. 1971. Comments on stable isotope method in regional groundwater investigation. *Water Resource Research*, (7): 980-993 p.

GREEN, B. F. 1976. On the factor score controversy. *Psychometrika*. p. 263-266.

GUERRA, A. M. 1986. Processos de carstificação e hidrogeologia do Grupo Bambuí na região de Irecê Bahia. Doutorado em Geologia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 127p.

IAEA. 2002. Instrumentation and control systems important to safety in nuclear power plants: safety guide. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA).

NEGRÃO, F. I. 1987. Caracterização hidrogeoquímica e vulnerabilidade do sistema hidrogeológico cárstico da região de Irecê-Bahia. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 86p.

NORUSIS, M. J. 1993. SPSS for Windows. Base system user's guide. Release 6.0. Chicago. SPSS Inc.

NOSSA, T. C. B. 2011. Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre - Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP. Doutorado em Hidrogeologia. Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahia, 226p.

NOSSA, T. C. B., Bastos Leal, L. R., Zucchi, M. do R. 2011. Hidroquímica e índices de saturação dos minerais do sistema aquífero cárstico Salitre na região de Irecê-Lapão, Bahia, Brasil. In: II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. São Paulo.

- PEARSON, K. 1900. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. *Philosophical Magazine Series 5* 50. (302):157-175 p.
- PEDREIRA, A. J., Rocha A. J. D., Costa I. V. G. da, Moraes Filho, J. C. 1987. Projeto Bacia de Irecê-II: Relatório final. Salvador, Bahia, CPRM,
- ROZANSKI, K., Araguás-Araguás L., Gonfiantini R. 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Swart, P. K.; Lohmann, K. C.; MCKENZIE, J.; SAVIN, S. (Ed.) *Climate change in continental isotopic records*. Geophysical Monograph Series, 78, AGU, Washington, DC. p.1-36.
- SANTOS, C. P. L. dos. 2008. Análise dos processos de salinização das águas subterrâneas da bacia do rio Salitre por meio de traçadores ambientais. Doutorado em Geofísica. Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahia, 125p.
- SIQUEIRA, A. F. 1978. O uso dos dados isotópicos e químicos como indicadores de origem das águas e sais dissolvidos no aquífero calcário Bambuí, Irecê-Bahia. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahia, 86p.
- SPEARMAN, C. 1904. General intelligence: objectively determined and measured. *American Journal of Psychology*, 15, p. 201-293.
- VALLE, M. A. 2004. Hidrogeoquímica do Grupo Una (Bacias de Irecê e Salitre): um exemplo da ação de ácido sulfúrico no sistema cárstico. Doutorado em Geologia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 122p.
- W.H.O. 2003. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. Recommendations. Addendum Geneva, 3rd., v.1.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Laboratório de Águas Minerais da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (LAMIN/CPRM) pela realização das análises químicas e ao Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Federal da Bahia (LFNA/UFBA) pela realização das análises isotópicas das águas coletadas na região de Irecê-Ba.