

# ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA DE DADOS HIDROQUÍMICOS DO AQUÍFERO CABEÇAS - SUDESTE DA BACIA SEDIMENTAR DO PARNAÍBA - PI

Adson Brito Monteiro<sup>1</sup>; Francisco Lages Correia Filho<sup>2</sup>; Paula Kristhina Cordeiro Freire<sup>3</sup>; Ney Gonzaga de Sousa<sup>4</sup> & Antônio Reinaldo Soares Filho<sup>5</sup>

**Resumo** – Os métodos estatísticos multivariados, análise das componentes principais e de agrupamentos foram aplicados em 33 análises físico-químicas de águas do aquífero Cabeças na região sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba. A finalidade desse estudo é a inserção desses métodos como alternativa no tratamento de dados, bem como mostrar sua aplicação e resultados na identificação de águas com características hidroquímicas semelhantes. Como resultado verificou-se a presença de três grupos: Grupo 1 – Águas cloretadas sódicas e cloretadas sódico-magnesianas, com condutividade elétrica média de 103  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ácidas, brandas, de boa qualidade para agricultura. Ocorrem próximas ao contato do aquífero Cabeças com as Coberturas Detrito-Lateríticas ou na zona de confinamento pela formação Longá; Grupo 2 – Águas sulfatadas magnesiano-sódicas e cálcico-sódicas, além das sulfatadas sódicas, condutividade elétrica média, medindo 879  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , neutras, duras a muito duras e com limite ao cultivo de espécies, com baixa tolerância à salinidade. Estão presentes nas proximidades do contato do aquífero Cabeças com o aquífero Pimenteiras; Grupo 3 - Águas bicarbonatadas, predominantemente cálcico-magnesianas, condutividade elétrica média de 348  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , geralmente alcalinas, duras a muito duras, boas para agricultura, respeitando os riscos de salinidade e sódio. A ocorrência deste grupo não está relacionada à presença nas proximidades de outras formações geológicas.

**Abstract** – The multivariate methods, principal and clustering component analysis, were applied to 33 physical-chemical water analysis from Cabeças aquifer in southwest Parnaíba Sedimentary Basin. The purpose of this study is the insertion of these methods as an alternative in data treatment and shows its application and results in water identification with similar hydrochemical features. The results presented three groups: Group 1 - chlorinated water with sodium and chlorinated water with sodium and magnesium, presenting an average electrical conductivity of 103  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , acidic, soft, with good quality for agriculture. Occurs near the contact of Cabeças aquifer with Detritus-

<sup>1</sup> Geólogo/Mestre em Geociências – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Rua Goiás, 312 – Ilhotas – Teresina – PI. Fone: (86)3222-4153. E-mail: amonteiro@te.cprm.gov.br. <sup>2</sup> Geólogo/Especialista em Recursos Hídricos – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Rua Goiás, 312 – Ilhotas – Teresina – PI. Fone: (86)3222-4153. E-mail: lages@te.cprm.gov.br. <sup>3</sup> Engenheira Civil/Mestre em Recursos Hídricos. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Av. Brasil, 1731 – Funcionários – Belo Horizonte - MG. Fone: (31)3878-0376. E-mail: pfreire@bh.cprm.gov.br. <sup>4</sup> Técnico em Geociências – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Rua Goiás, 312 – Ilhotas – Teresina – PI. Fone: (86)3222-4153. E-mail: ney@te.cprm.gov.br. <sup>5</sup> Geólogo – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Rua Goiás, 312 – Ilhotas – Teresina – PI. Fone: (86)3222-4153. E-mail: reinaldo@te.cprm.gov.br.

lateritic Covers or in the containment area by Longá formation; Group 2 – Sulphated water with magnesium and sodium and sulphated water with calcium and sodium, and sulphated water with sodium, presenting an average electrical conductivity of 879  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , neutral, hard to very hard and restricted cultivation by low salinity tolerance species. Occurs near the contact among Cabeças aquifer and Pimenteiras aquitard; Group 3 – Bicarbonated water, with predominant calcium and magnesium, presenting an average electrical conductivity of 348  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , usually alkaline, hard to very hard, good for agriculture, regarding the salinity and sodium tolerance. The occurrence this group isn't related to presence in the proximities of others geological formations.

**Palavras-Chave** – Estatística Multivariada; Componentes Principais; Análise de Agrupamentos.

## **1 - INTRODUÇÃO**

Com base nos resultados obtidos no Projeto Borda Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba (Correia Filho & Monteiro, 2009) foi possível se fazer uma análise dos dados hidroquímicos de 33 amostras de poços que captam o aquífero Cabeças, utilizando-se de métodos estatísticos multivariados, enfocando-se no processo analítico as componentes principais e os agrupamentos, como suporte no tratamento e otimização na química de águas de aquíferos.

## **2 – LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO**

A área de estudo situa-se na região sudeste do Estado do Piauí e ocupa uma superfície de 6.099  $\text{km}^2$  (figura 01). A cidade de Canto do Buriti está situada em sua porção noroeste e é um dos principais centros populacionais da microrregião. O acesso, a partir de Teresina, se faz pelas rodovias BR-316/BR-343 até a cidade de Floriano. Daí, pela rodovia estadual PI-140, pavimentada, até Canto do Buriti, num percurso de aproximadamente 400 km, já dentro da área de estudo. Outro acesso, com pavimentação asfáltica, a partir da BR-343, em Regeneração, é através da rodovia PI-236, até Oeiras, seguindo adiante pela rodovia PI-143, até a cidade de Simplício Mendes, alcançando São João do Piauí, no sudeste da área, através da BR-020, num trecho de 485 km, com início na capital.

## **3 - OBJETIVOS**

A aplicação de métodos estatísticos multivariados, em análises das componentes principais e de agrupamentos, como alternativa no tratamento de dados hidroquímicos.

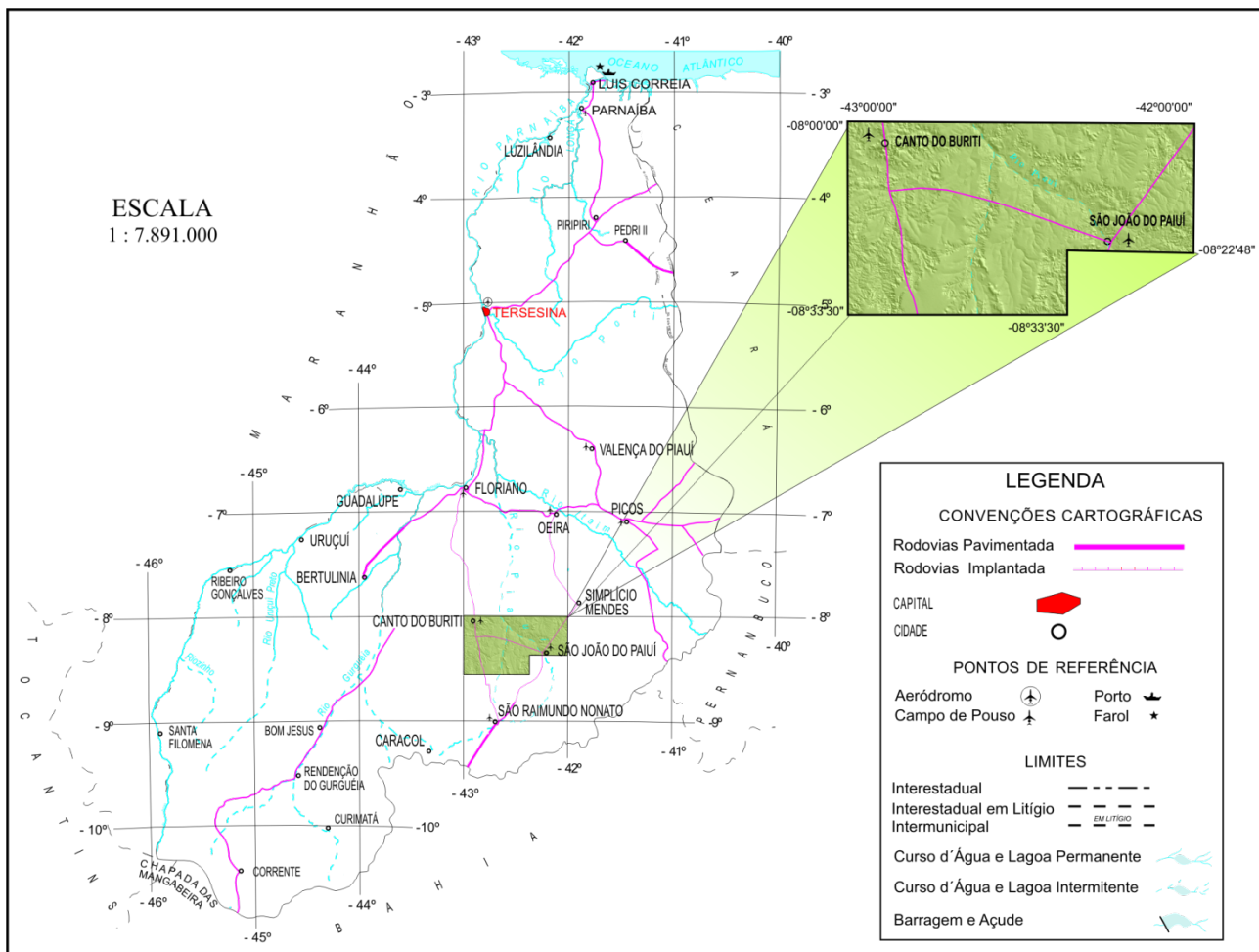


Figura 01 – Localização da Área dentro do Estado do Piauí.

## 4. GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DO AQUÍFERO CABEÇAS

### 4.1 – Geologia

Ocupa cerca de 85% da área estudada e é, predominantemente, constituído por arenitos rosados, cremes, esbranquiçados, amarronzados e marrons-avermelhados, acamadados, granulação fina a média, indo até grosseira, grãos subarredondados a arredondados, foscos, alguns pouco brilhosos, bem selecionados, bem estratificados, exibindo, frequentemente, estratificação cruzada planar e ondulada, tanto de pequeno como de grande porte. Geralmente são micromicáceos, porosos, de boa permeabilidade e friáveis, exibindo-se em grandes afloramentos, comumente com intenso fraturamento ou sob a forma de “casco de tartaruga”, típico dessa formação. Níveis de siltitos e folhelhos arroxeados e rosados são comuns na base e porção mediana do pacote. Sua espessura varia de pouco menos de uma dezena de metros na parte sudeste até alcançar cerca de 150 metros nas porções central e norte da área investigada. A figura 02 mostra o mapa geológico da área de estudo.

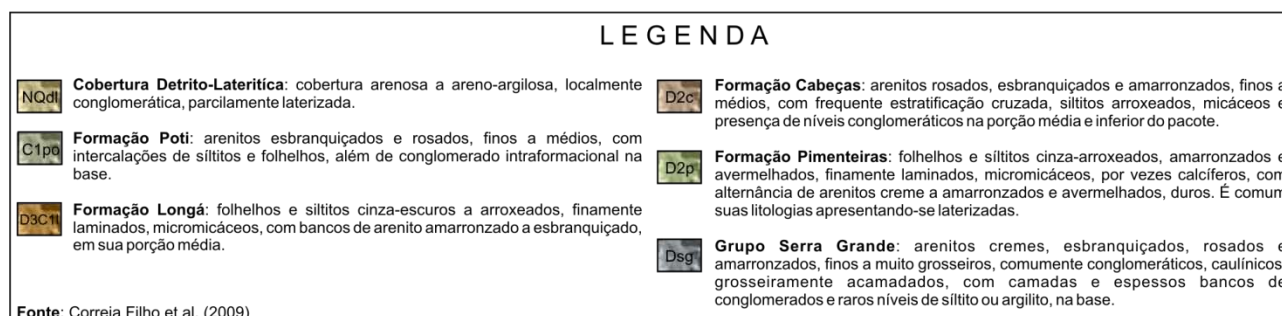
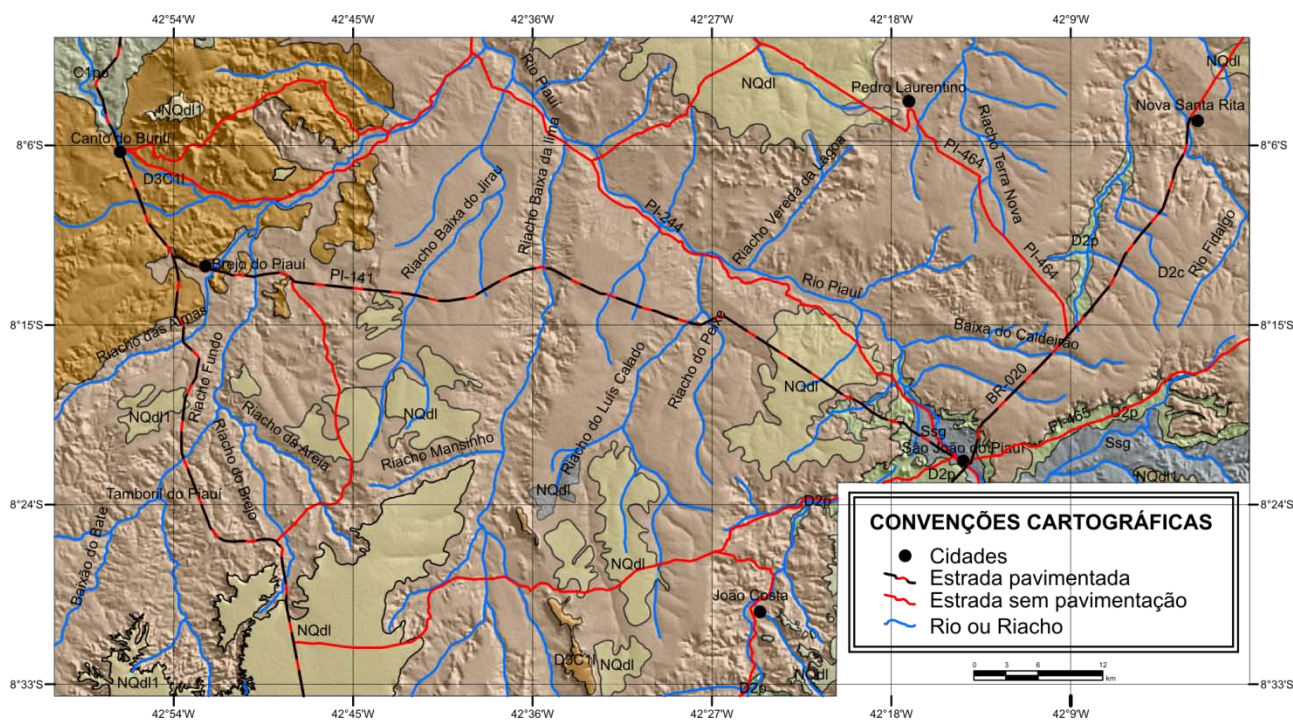


Figura 02 – Mapa Geológico da Área de Estudo

## 4.2 – Hidrogeologia

Aflora amplamente por toda área de estudo com comportamento hidrodinâmico predominante de aquífero livre. Sua área de recarga caracteriza-se por extensos chapadões arenosos, escalonados, entrecortados por uma rede de drenagem incipiente e pouco densa. A alimentação se dá por infiltração direta das chuvas e, por filtração vertical ascendente, a partir do aquífero Serra Grande e descendente, oriunda do sistema Poti/Piauú, nos locais onde as diferenças de cargas hidráulicas sejam favoráveis. Em condições de confinamento ocorre regionalmente entre o aquitardo Pimenteiras, na base, e o aquitardo Longá, no topo, onde ocupa na região de Canto do Buriti, parte noroeste da área, reduzida superfície, já que é um aquífero predominantemente livre. A direção de seu fluxo subterrâneo se dá de sul para norte, com inflexão para noroeste na região do vale do rio Piauú. É um aquífero poroso, contínuo, de extensão regional, livre, espessura média de 120 metros, porosidade primária alta, permeabilidade alta, potencialidade hidrogeológica média e capacidade específica média de 1,77 m<sup>3</sup>/h/m. Os parâmetros hidrodinâmicos médios do aquífero, na condição

de livre, são: transmissividade -  $6,39 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s e condutividade hidráulica -  $5,32 \times 10^{-5}$  m/s . As águas são de boa qualidade para consumo humano, com valores médios de sólidos totais dissolvidos (STD) de 161,8 mg/l.

## **5 – METODOLOGIA**

### **5.1 – Análises Físico-Químicas**

Foram utilizadas 33 análises físico-químicas do aquífero Cabeças, oriundas do Projeto Borda Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba (Correia Filho & Monteiro, A.B., 2009) que apresentaram coeficiente de erro inferior a 10%, estimado através do balanço iônico. A tabela 01 mostra as análises físico- químicas utilizadas neste trabalho.

### **5.2 – Medidas de Dispersão e Padronização (modo z)**

A partir das amostras selecionadas foi realizada a determinação das medidas de dispersão, desvio padrão e coeficiente de variação, objetivando-se definir se os dados são homogêneos ou heterogêneos, com a finalidade de verificar se há necessidade de se fazer a padronização (modo z), segundo as médias e desvios padrão. A padronização faz com que as variáveis transformadas passem a ter média, zero e variância unitária, o que é conseguido pela a transformação “z”. A equação (1) define essa padronização.

$$\text{Modo } z = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (1)$$

onde  $x_i$  é o valor que se deseja padronizar,  $\bar{x}$  a média aritmética da distribuição e  $\sigma$  o desvio padrão.

### **5.3 – Análise Multivariada**

#### **5.3.1 - Conceito**

Segundo Elizabeth Reis (1997), consiste num conjunto de métodos estatísticos que permite a análise simultânea de medidas múltiplas para cada indivíduo ou objeto, em análise. Os métodos mais utilizados em geociências são análise das componentes principais, análise de agrupamentos e análise discriminante. Neste trabalho utilizou-se somente os dois primeiros métodos.

#### **5.3.2 - Análise das Componentes Principais**

É um dos métodos estatísticos mais usados quando se pretende analisar dados multivariados, além de ser o mais antigo método de ordenação e mais aplicado nas geociências. Este método transforma um conjunto de variáveis originais, intercorrelacionadas, em um novo conjunto de combinações lineares, não correlacionadas, gerando novos eixos, as componentes principais. As componentes principais são projetadas na direção de maior variância dos dados. A primeira

componente principal segue na direção da variação, máxima possível, existente no conjunto de dados, enquanto à segunda componente deve ser ortogonal a primeira, segue a segunda maior variância e assim, por diante, até que toda variação do conjunto seja explicada. De um modo geral, a análise das componentes principais nada mais é do que o cálculo dos autovalores e correspondentes autovetores, de uma matriz de variâncias-covariâncias ou de uma matriz de coeficientes de correlação, entre variáveis.

As etapas, em uma análise de componentes principais, são as seguintes:

- Determinação de parâmetros estatísticos descritivos (média, desvio-padrão e coeficiente de variação) para se determinar a homogeneidade dos dados ou não.
- Caso os dados apresentem uma grande dispersão entre si torna-se necessário a padronização, de modo que as variáveis passem a ter, média e variância unitária.
- Cálculo da matriz de covariâncias. Esta será idêntica a matriz de correlação, caso tenha sido necessária a padronização.
- Determinação dos autovalores  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$  e os correspondentes autovetores  $e_1, e_2, \dots, e_p$ . Os coeficientes do  $i$ -ésimo componente principal são, então, os elementos de  $e_i$ , enquanto que  $\lambda_i$  é sua variância.
- O primeiro autovalor a ser determinado corresponderá a maior porcentagem da variabilidade total presente, e, assim, sucessivamente. Considera-se apenas os autovalores maiores que 1, seguindo o critério proposto por Kaiser (1960). Geralmente os dois primeiros explicam de 80 a 90% da variância total.
- Os autovetores correspondem às componentes principais e é o resultado do carregamento das variáveis originais, em cada um deles.
- A multiplicação da matriz de carregamento de cada variável nas componentes principais, pela matriz original dos dados, fornecerá a matriz de contagens (scores) de cada caso em relação às componentes principais.
- Plotagem dos valores da matriz de contagens (scores) em um diagrama de dispersão, em que os eixos são as duas componentes principais que explicam a maior porcentagem da variabilidade total.
- Identificação dos grupos observados no diagrama de dispersão.
- Interpretação dos resultados.

### 5.3.3 - Análise de Agrupamentos

Análise de agrupamentos (cluster analysis) é utilizada quando se deseja explorar as similaridades entre indivíduos (modo Q) ou entre as variáveis (modo R), definindo-se grupos que

consideram simultaneamente, no primeiro caso, todas as variáveis observadas em cada indivíduo e, no segundo, todos os indivíduos nos quais foram feitas as mesmas medidas (Landim, 2000). O objetivo é agrupar objetos de acordo com suas semelhanças, ou seja, o agrupamento de objetos consiste no reconhecimento de um grau de similaridade, entre eles, o bastante para reuni-los num mesmo conjunto. Segundo Davis (1986), a análise de agrupamentos pode ser enquadrada em quatro tipos: métodos de partição, métodos com origem arbitrária, métodos por similaridade mútua e métodos por agrupamentos hierárquicos.

A metodologia para agrupamentos hierárquicos é a mais aplicada em geociências. Partindo de uma matriz inicial de dados, onde “n” linhas representam casos ou amostras, e “p” colunas as variáveis obtém-se uma matriz simétrica de similaridades e inicia-se a detecção de pares com a mais alta similaridade ou a mais baixa distância, seja de casos, se a comparação for entre linhas (modo Q), seja de variáveis, se a comparação for entre as colunas (modo R).

Entre as diversas propostas para o cálculo do coeficiente de similaridade, as mais usuais são: coeficientes de distância e coeficientes de correlação. No sentido geológico, o coeficiente de distância agrupa melhor as amostras, enquanto o coeficiente de correlação é recomendado para o agrupamento entre variáveis. A medida de similaridade utilizada para avaliar as águas do aquífero Cabeças foi a distância euclidiana.

A Distância Euclidiana (DE), num espaço bidimensional, entre os pontos  $P = (p_x, p_y)$  e  $Q = (q_x, q_y)$ , é definida como a raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças de valores para cada par de coordenadas cartesianas, ou seja:

$$DE = \sqrt{(p_x - p_y)^2 + (q_x - q_y)^2} \quad (2)$$

Quanto maior for a distância, maior o grau de similaridades e vice-versa.

As técnicas aglomerativas mais utilizadas são: ligação simples (single linkage method), ligação completa (complete linkage method), agrupamento pareado proporcionalmente (weighted pair-group method, WPGM); agrupamento pareado igualmente ponderado (unweighted pair-group method, UPGM) e da variância mínima (minimum variance clustering ou ward's method of sum-of-squares method).

Segundo Landim (2000), com a existência de tantas técnicas para a análise de agrupamentos e não havendo testes estatísticos válidos, para os resultados obtidos, geralmente ocorre a dúvida na hora de escolher. Dessa maneira, a consideração de ordem pragmática a ser adotada, é que o melhor método é aquele que fornece os resultados mais coerentes com a realidade geológica, em estudo. O método de Ward foi o que forneceu os melhores resultados. Baseia-se na análise da variância, agrupando os objetos aos grupos nos quais eles promovem a menor variância, intra grupo. Este

método é altamente eficiente na formação de grupos. De acordo com Orlóci (1978), o algoritmo de Ward pode ser resumido nas seguintes etapas:

1. determina-se a matriz de distâncias e localizam-se os dois agrupamentos para os quais  $d_{ij}$  é mínimo;
2. reúnem-se estes agrupamentos, formando um novo agrupamento e verifica se o número de agrupamentos (G) já foi alcançado, se não, segue-se a próxima etapa, caso contrário, termina-se a análise;
3. calcula-se o valor do aumento a ser obtido na soma dos quadrados pela reunião de qualquer dos agrupamentos:

$$I = (1/2) * d_{pq} \quad (3)$$

onde  $d_{pq}^2 = (X_p - X_q)^2$  é a distância entre as médias dos elementos de  $G_p$  e  $G_q$ .  $G_p$  e  $G_q$  são respectivamente, os grupos p e q.

4. Determinam-se os dois agrupamentos que apresentam um menor incremento na matriz D, isto é,  $\text{Min}(I_{ij})$  e volta-se à etapa 2.

Este método tem como função de agrupamentos a distância euclidiana e o critério de agrupamento é dado pelo valor do incremento que se obtém na soma de quadrados do erros. A forma gráfica, usada para representar o resultado final dos agrupamentos, é o dendrograma que se caracteriza pelo estabelecimento de uma hierarquia ou estrutura, em forma de árvores.

De uma forma geral, as etapas da análise de agrupamentos foram as seguintes:

- Coleta de dados e seleção das variáveis - Amostras (análises físico-químicas) e Variáveis (pH,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ , AT, DT e CE).
- Construção da matriz Amostra x Variáveis.
- Escolha do programa estatístico – STATISTICA Trial Version 9 (Statsoft, Inc. 1984-2009).
- Padronização dos dados, segundo as médias e desvios padrão.
- Definição do tipo de agrupamento - Foi realizada a similaridade entre as análises químicas (modo Q) do aquífero Cabeças.
- Escolha do coeficiente de similaridade – Distância Euclidiana.
- Escolha do método e da técnica de agrupamentos – Métodos por Agrupamentos Hierárquicos e da Variância Mínima (método de Ward).
- Representação em dendrograma.
- Espacialização dos grupos.
- Interpretação dos resultados.



Tabela 01 – Síntese dos Dados das Análises Físico-Químicas do Poços Seleccionados no Aquífero Cabeças.

Cód.	Município	Lat.	Long.	pH	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Ca <sup>+2</sup> (mg/L)	Mg <sup>+2</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	AT (mg/L)	DT (mg/L)	STD (mg/L)	CE (µS/cm)
CE026	P. Laurentino	08°07'32"	42°13'24"	7,66	4,00	5,00	41,60	10,60	172,50	4,00	23,00	141,40	148,00	261,20	322,00
CE028	S. J. do Piauí	08°15'09"	42°10'22"	7,69	24,00	12,00	26,40	13,00	138,00	37,70	1,30	117,20	120,00	258,90	363,00
CE033	Brejo do Piauí	08°28'06"	42°40'49"	5,57	4,00	1,00	0,50	2,10	7,40	6,00	2,00	6,10	10,00	23,10	31,40
CE035	João Costa	08°28'17"	42°34'18"	4,24	8,40	4,60	4,00	5,70	8,39	28,00	2,37	4,00	34,00	86,00	166,00
CE103	Brejo do Piauí	08°10'43"	42°45'12"	6,16	5,80	2,90	4,80	2,80	11,02	12,00	3,67	9,00	24,00	45,00	86,00
CE223	Brejo do Piauí	08°04'34"	42°41'41"	8,02	10,00	6,60	16,80	7,60	67,61	9,00	19,79	56,00	74,00	99,00	191,00
CE245	Nova S. Rita	08°10'31"	42°00'42"	8,01	8,00	13,00	25,60	22,10	219,30	17,90	6,80	179,80	156,00	313,10	381,00
CE247	Nova S. Rita	08°12'36"	42°02'21"	7,79	3,70	20,50	14,40	8,60	78,83	11,00	5,51	65,00	72,00	108,00	206,00
CE279	Nova S. Rita	08°08'11"	42°06'36"	7,10	49,00	42,00	37,40	55,30	25,00	148,90	297,40	20,20	324,00	663,60	989,00
CE280	Nova S. Rita	08°06'53"	42°06'43"	7,30	88,00	40,00	18,70	28,20	59,10	93,30	227,10	48,50	164,00	560,70	816,00
CE306	P. Laurentino	08°07'45"	42°23'06"	6,66	3,40	11,80	1,60	2,40	13,43	16,00	0,98	11,00	14,00	45,00	86,00
CE331	P. Laurentino	08°03'05"	42°18'37"	7,41	9,00	10,00	9,60	5,80	29,60	33,70	1,10	24,20	48,00	102,90	185,20
CE340	João Costa	08°31'56"	42°25'01"	7,17	27,00	58,00	72,80	17,80	19,70	47,60	348,50	16,20	256,00	592,10	832,00
CE342	João Costa	08°29'15"	42°25'09"	8,12	2,70	13,80	30,40	6,70	101,18	6,00	19,66	84,00	104,00	126,00	243,00
CE407	Nova S. Rita	08°03'08"	42°06'13"	7,48	18,00	16,00	19,20	6,70	93,60	31,80	10,70	76,80	76,00	210,80	291,00
CE436	Nova S. Rita	08°04'43"	42°03'40"	8,31	19,50	22,20	40,80	23,00	154,35	57,00	29,12	129,00	198,00	296,00	570,00
CE445	Nova S. Rita	08°08'13"	42°03'38"	8,30	38,00	21,00	33,60	26,90	220,60	53,60	1,10	203,00	196,00	412,80	594,00
CE655	S. J. do Piauí	08°15'32"	42°18'58"	7,18	9,00	13,00	37,60	9,60	150,30	33,70	20,50	123,20	134,00	274,60	391,00
GU036	Pajeú do Piauí	08°04'56"	42°47'48"	4,11	3,00	1,70	2,40	2,80	8,40	8,00	4,45	3,00	18,00	34,00	66,00
GU052	Pajeú do Piauí	08°04'08"	42°50'21"	4,88	5,00	2,00	0,30	1,70	7,40	11,90	0,80	6,10	8,00	29,50	56,50
GU176	C. do Buriti	08°09'06"	42°53'48"	7,76	7,30	8,20	22,40	10,50	104,36	10,00	4,68	86,00	100,00	125,00	241,00
GU220	Pajeú do Piauí	08°00'26"	42°53'14"	4,21	13,40	5,80	8,00	2,40	12,31	36,00	4,64	7,00	30,00	92,00	176,00
GU293	C. do Buriti	08°05'50"	42°56'54"	4,48	6,30	3,30	1,60	3,80	10,56	9,00	5,11	7,00	20,00	44,00	84,00
GU543	Rib. do Piauí	08°10'08"	42°29'10"	8,39	7,30	19,70	28,00	12,00	131,08	9,00	21,30	110,00	120,00	156,00	300,00
GU605	Tamboril do PI	08°25'11"	42°57'04"	5,32	9,00	6,00	4,00	2,40	22,20	21,80	1,10	18,20	20,00	67,00	112,80
GU616	Tamboril do PI	08°28'39"	42°59'53"	6,91	17,00	19,00	20,80	21,10	135,50	69,50	1,30	111,10	140,00	287,50	456,00
GU617	Tamboril do PI	08°23'02"	42°59'39"	6,10	15,00	12,00	16,80	8,20	103,50	23,80	2,30	84,80	76,00	183,60	261,00
GU618	Tamboril do PI	08°21'36"	42°53'29"	6,90	8,30	6,60	2,40	3,30	17,08	18,0	3,84	14,00	20,00	52,00	101,00
GU629	Tamboril do PI	08°18'38"	42°57'51"	7,53	15,00	28,00	38,40	16,30	283,40	11,90	2,10	232,30	164,00	395,10	457,00
GU633	Tamboril do PI	08°27'45"	42°54'01"	7,19	7,40	6,10	6,40	3,80	18,27	27,0	3,38	15,00	32,00	73,00	139,00
GU729	Rib. do Piauí	08°09'02"	42°31'15"	8,31	8,30	21,30	29,60	12,40	136,39	9,00	19,84	114,00	126,00	165,00	316,00
GU736	Rib. do Piauí	08°02'08"	42°37'04"	4,93	5,80	3,30	1,60	2,80	10,48	11,00	3,95	8,00	16,00	36,00	70,00
GU737	Rib. do Piauí	08°01'24"	42°39'06"	4,42	8,00	1,00	0,80	1,90	2,50	17,90	1,00	2,00	10,00	36,20	95,60

AT- Alcalinidade Total; DT – Dureza Total; STD – Sólidos Totais Dissolvidos.

## 6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 – Análise das Componentes Principais

Com os dados da tabela 01 foi montada a matriz N x P, onde N representa as amostras (análises físico-químicas) e P as variáveis escolhidas (tabela 02). Foram também determinados alguns parâmetros estatísticos descritivos (máximo, mínimo, média, desvio padrão e coeficiente de variação) – tabela 03.

Tabela 02 – Matriz Amostras x Variáveis.

	Variáveis (P)											
	pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	AT	DT	STD	CE
CE026	7,66	4,00	5,00	41,60	10,60	172,50	4,00	23,00	141,4	148,0	261,2	322,0
CE028	7,69	24,0	12,00	26,40	13,00	138,00	37,70	1,30	117,2	120,0	258,9	363,0
CE033	5,57	4,00	1,00	0,50	2,10	7,40	6,00	2,00	6,10	10,00	23,10	31,40
CE035	4,24	8,40	4,60	4,00	5,70	8,39	28,00	2,37	4,00	34,00	86,00	166,0
CE103	6,16	5,80	2,90	4,80	2,80	11,02	12,00	3,67	9,00	24,00	45,00	86,00
CE223	8,02	10,0	6,60	16,80	7,60	67,61	9,00	19,79	56,00	74,00	99,00	191,0
CE245	8,01	8,00	13,00	25,60	22,10	219,30	17,90	6,80	179,8	156,0	313,1	381,0
CE247	7,79	3,70	20,50	14,40	8,60	78,83	11,00	5,51	65,00	72,00	108,0	206,0
CE279	7,10	49,0	42,00	37,40	55,30	25,00	148,9	297,4	20,20	324,0	663,6	989,0
CE280	7,30	88,0	40,00	18,70	28,20	59,10	93,30	227,1	48,50	164,0	560,7	816,0
CE306	6,66	3,40	11,80	1,60	2,40	13,43	16,00	0,98	11,00	14,00	45,00	86,00
CE331	7,41	9,00	10,00	9,60	5,80	29,60	33,70	1,10	24,20	48,00	102,9	185,2
CE340	7,17	27,0	58,00	72,80	17,80	19,70	47,60	348,5	16,20	256,0	592,1	832,0
CE342	8,12	2,70	13,80	30,40	6,70	101,18	6,00	19,66	84,00	104,0	126,0	243,0
CE407	7,48	18,0	16,00	19,20	6,70	93,60	31,80	10,70	76,80	76,00	210,8	291,0
CE436	8,31	19,5	22,20	40,80	23,00	154,35	57,00	29,12	129,0	198,0	296,0	570,0
CE445	8,30	38,0	21,00	33,60	26,90	220,60	53,60	1,10	203,0	196,0	412,8	594,0
CE655	7,18	9,00	13,00	37,60	9,60	150,30	33,70	20,50	123,2	134,0	274,6	391,0
GU036	4,11	3,00	1,70	2,40	2,80	8,40	8,00	4,45	3,00	18,00	34,00	66,00
GU052	4,88	5,00	2,00	0,30	1,70	7,40	11,90	0,80	6,10	8,00	29,50	56,50
GU176	7,76	7,30	8,20	22,40	10,50	104,36	10,00	4,68	86,00	100,0	125,0	241,0
GU220	4,21	13,4	5,80	8,00	2,40	12,31	36,00	4,64	7,00	30,00	92,00	176,0
GU293	4,48	6,30	3,30	1,60	3,80	10,56	9,00	5,11	7,00	20,00	44,00	84,00
GU543	8,39	7,30	19,70	28,00	12,00	131,08	9,00	21,30	110,0	120,0	156,0	300,0
GU605	5,32	9,00	6,00	4,00	2,40	22,20	21,80	1,10	18,20	20,00	67,00	112,8
GU616	6,91	17,0	19,00	20,80	21,10	135,50	69,50	1,30	111,1	140,0	287,5	456,0
GU617	6,10	15,0	12,00	16,80	8,20	103,50	23,80	2,30	84,80	76,00	183,6	261,0
GU618	6,90	8,30	6,60	2,40	3,30	17,08	18,0	3,84	14,00	20,00	52,00	101,0
GU629	7,53	15,0	28,00	38,40	16,30	283,40	11,90	2,10	232,3	164,0	395,1	457,0
GU633	7,19	7,40	6,10	6,40	3,80	18,27	27,0	3,38	15,00	32,00	73,00	139,0
GU729	8,31	8,30	21,30	29,60	12,40	136,39	9,00	19,84	114,0	126,0	165,0	316,0
GU736	4,93	5,80	3,30	1,60	2,80	10,48	11,00	3,95	8,00	16,00	36,00	70,00
GU737	4,42	8,00	1,00	0,80	1,90	2,50	17,90	1,00	2,00	10,00	36,20	95,60

AT- Alcalinidade Total; DT – Dureza Total; STD – Sólidos Totais Dissolvidos; CE – Condutividade Hidráulica.

Tabela 03 – Resultado da Análise Estatística Descritiva da Matriz dos Dados.

	pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	AT	DT	STD	CE
<b>Mín.</b>	4,1	2,7	1,0	0,3	1,7	2,50	4,0	0,8	2,00	8,0	23,1	31,4
<b>Máx.</b>	8,4	88,0	58,0	72,8	55,3	283,4	148,9	348,5	232,30	324,0	663,6	989,0
<b>Média</b>	6,7	14,2	13,9	18,8	10,9	78,0	28,5	33,3	64,6	92,5	189,6	293,2
<b>Des. Pad.</b>	1,4	16,7	13,0	16,9	11,1	75,9	29,7	84,5	64,3	78,9	173,0	240,2
<b>CV</b>	20,9	117,9	93,6	90,0	101,3	97,4	104,3	253,5	99,5	85,3	91,3	81,9

AT- Alcalinidade Total; DT – Dureza Total; STD – Sólidos Totais Dissolvidos; CE – Condutividade Hidráulica.

A análise da tabela 03 mostra que existe uma variação significativa dos valores encontrados das medidas de desvio padrão e coeficiente de variação, indicando uma grande dispersão em torno da média. Dessa maneira, os dados das análises físico-químicas (tabela 02) foram padronizados, segundo as médias e desvios padrão (tabela 04) de modo que as variáveis transformadas passem a ter médias zero e variâncias unitária, o que é conseguido pela transformação “z”. A padronização dos teores das variáveis assegura que tenham o mesmo peso na análise.

Tabela 04 – Dados Padronizados das Análises Físico-Químicas.

	<b>pH</b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>+2</sup></b>	<b>Mg<sup>+2</sup></b>	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>	<b>AT</b>	<b>DT</b>	<b>STD</b>	<b>CE</b>
CE026	0,67	-0,61	-0,68	1,35	-0,03	1,24	-0,82	-0,12	1,19	0,70	0,41	0,12
CE028	0,70	0,59	-0,14	0,45	0,19	0,79	0,31	-0,38	0,82	0,35	0,40	0,29
CE033	-0,82	-0,61	-0,99	-1,08	-0,80	-0,93	-0,76	-0,37	-0,91	-1,05	-0,96	-1,09
CE035	-1,77	-0,35	-0,71	-0,87	-0,47	-0,92	-0,02	-0,37	-0,94	-0,74	-0,60	-0,53
CE103	-0,40	-0,50	-0,84	-0,83	-0,73	-0,88	-0,56	-0,35	-0,87	-0,87	-0,84	-0,86
CE223	0,93	-0,25	-0,56	-0,12	-0,30	-0,14	-0,66	-0,16	-0,13	-0,23	-0,52	-0,43
CE245	0,92	-0,37	-0,07	0,40	1,01	1,86	-0,36	-0,31	1,79	0,80	0,71	0,37
CE247	0,77	-0,63	0,51	-0,26	-0,21	0,01	-0,59	-0,33	0,01	-0,26	-0,47	-0,36
CE279	0,27	2,08	2,17	1,10	4,01	-0,70	4,05	3,12	-0,69	2,93	2,74	2,90
CE280	0,42	4,42	2,01	0,00	1,56	-0,25	2,18	2,29	-0,25	0,91	2,15	2,18
CE306	-0,04	-0,64	-0,16	-1,02	-0,77	-0,85	-0,42	-0,38	-0,83	-0,99	-0,84	-0,86
CE331	0,50	-0,31	-0,30	-0,54	-0,46	-0,64	0,17	-0,38	-0,63	-0,56	-0,50	-0,45
CE340	0,32	0,77	3,40	3,20	0,62	-0,77	0,64	3,73	-0,75	2,07	2,33	2,24
CE342	1,00	-0,69	0,00	0,69	-0,38	0,31	-0,76	-0,16	0,30	0,15	-0,37	-0,21
CE407	0,55	0,23	0,16	0,03	-0,38	0,21	0,11	-0,27	0,19	-0,21	0,12	-0,01
CE436	1,14	0,32	0,64	1,30	1,09	1,01	0,96	-0,05	1,00	1,34	0,62	1,15
CE445	1,13	1,43	0,55	0,88	1,44	1,88	0,84	-0,38	2,15	1,31	1,29	1,25
CE655	0,33	-0,31	-0,07	1,12	-0,12	0,95	0,17	-0,15	0,91	0,53	0,49	0,41
GU036	-1,86	-0,67	-0,94	-0,97	-0,73	-0,92	-0,69	-0,34	-0,96	-0,94	-0,90	-0,95
GU052	-1,31	-0,55	-0,91	-1,09	-0,83	-0,93	-0,56	-0,39	-0,91	-1,07	-0,92	-0,99
GU176	0,75	-0,41	-0,44	0,22	-0,04	0,35	-0,62	-0,34	0,33	0,10	-0,37	-0,22
GU220	-1,79	-0,05	-0,62	-0,64	-0,77	-0,86	0,25	-0,34	-0,90	-0,79	-0,56	-0,49
GU293	-1,60	-0,47	-0,81	-1,02	-0,64	-0,89	-0,66	-0,33	-0,90	-0,92	-0,84	-0,87
GU543	1,20	-0,41	0,45	0,55	0,10	0,70	-0,66	-0,14	0,71	0,35	-0,19	0,03
GU605	-1,00	-0,31	-0,61	-0,87	-0,77	-0,73	-0,23	-0,38	-0,72	-0,92	-0,71	-0,75
GU616	0,14	0,17	0,40	0,12	0,92	0,76	1,38	-0,38	0,72	0,60	0,57	0,68
GU617	-0,44	0,05	-0,14	-0,12	-0,25	0,34	-0,16	-0,37	0,31	-0,21	-0,03	-0,13
GU618	0,13	-0,35	-0,56	-0,97	-0,69	-0,80	-0,35	-0,35	-0,79	-0,92	-0,79	-0,80
GU629	0,58	0,05	1,09	1,16	0,49	2,70	-0,56	-0,37	2,61	0,91	1,19	0,68
GU633	0,34	-0,41	-0,60	-0,73	-0,64	-0,79	-0,05	-0,35	-0,77	-0,77	-0,67	-0,64
GU729	1,14	-0,35	0,57	0,64	0,13	0,77	-0,66	-0,16	0,77	0,42	-0,14	0,09
GU736	-1,28	-0,50	-0,81	-1,02	-0,73	-0,89	-0,59	-0,35	-0,88	-0,97	-0,89	-0,93
GU737	-1,64	-0,37	-0,99	-1,06	-0,82	-0,99	-0,36	-0,38	-0,97	-1,05	-0,89	-0,82

AT- Alcalinidade Total; DT – Dureza Total; STD – Sólidos Totais Dissolvidos; CE – Condutividade Hidráulica.

A matriz de covariâncias para variáveis padronizadas é idêntica a matriz de correlação (Tabela 05).

Tabela 05 – Matriz de Correlação Entre as Variáveis.

	pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	AT	DT	STD	CE
pH	1,000	0,222	0,482	0,642	0,461	0,669	0,154	0,153	0,677	0,612	0,471	0,393
Na <sup>+</sup>	0,222	1,000	0,674	0,324	0,711	0,104	0,798	0,675	0,118	0,588	0,772	0,400
K <sup>+</sup>	0,482	0,674	1,000	0,767	0,736	0,266	0,644	0,842	0,269	0,839	0,888	0,494
Ca <sup>+2</sup>	0,642	0,324	0,767	1,000	0,600	0,595	0,340	0,570	0,594	0,884	0,790	0,786
Mg <sup>+2</sup>	0,461	0,711	0,736	0,600	1,000	0,391	0,848	0,652	0,399	0,904	0,885	0,787
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,669	0,104	0,266	0,595	0,391	1,000	-0,002	-0,158	0,998	0,546	0,442	0,793
Cl <sup>-</sup>	0,154	0,798	0,644	0,340	0,848	-0,002	1,000	0,688	0,007	0,676	0,762	0,808
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	0,153	0,675	0,842	0,570	0,652	-0,158	0,688	1,000	-0,156	0,685	0,777	0,904
A. T	0,677	0,118	0,269	0,594	0,399	0,998	0,007	-0,156	1,000	0,550	0,447	0,910
D. T.	0,612	0,588	0,839	0,884	0,904	0,546	0,676	0,685	0,550	1,000	0,938	0,951
STD	0,471	0,772	0,888	0,790	0,885	0,442	0,762	0,777	0,447	0,938	1,000	0,983
CE	0,494	0,786	0,904	0,787	0,910	0,393	0,808	0,793	0,400	0,951	0,983	1,000

AT- Alcalinidade Total; DT – Dureza Total; STD – Sólidos Totais Dissolvidos; CE – Condutividade Hidráulica.

Os autovalores e autovetores correspondentes para a matriz de correlação com 12 variáveis medidas, em 33 análises físico-químicas, são mostradas respectivamente, nas tabelas 06 e 07. Considerando, apenas os autovalores maiores que 1 (um), seguindo critério proposto por Kaiser (1960), observa-se que as duas primeiras componentes principais explicam cerca de 85,92 % da variabilidade total. Os componentes principais são dados por:

$$Y_i = e_i X_i = e_{1i} X_{1i} + e_{2i} X_{2i} + e_{3i} X_{3i} + e_{4i} X_{4i} + e_{5i} X_{5i} + e_{6i} X_{6i} + e_{7i} X_{7i} + e_{8i} X_{8i} + e_{9i} X_{9i} + e_{10i} X_{10i} + e_{11i} X_{11i} + e_{12i} X_{12i} \quad (4)$$

onde  $Y_i$  = componente principal;  $i = 1, 2, 3, 4, \dots, 12$ ;  $e_i$  = autovetores e  $X_i$  = variáveis.

Substituindo os valores de  $e_i$  e as variáveis  $X_i$  na equação (4) encontram-se os escores para as componentes principais, apresentados na tabela 08. A figura 03 mostra o gráfico de dispersão das componentes  $Y_1$  e  $Y_2$ .

Tabela 06 – Autovalores da Matriz de Correlação.

	Autovalores	% Total Variância	Autovalor Acumulado	% Acumulado
$\lambda_1$	7,7122360	64,268634	7,712236	64,268634
$\lambda_2$	2,5977297	21,647747	10,309966	85,916381
$\lambda_3$	0,7617145	6,347621	11,071680	92,264002
$\lambda_4$	0,3966033	3,305028	11,468284	95,569029
$\lambda_5$	0,3187206	2,656005	11,787004	98,225035
$\lambda_6$	0,0982653	0,818878	11,885270	99,043913
$\lambda_7$	0,0852210	0,710175	11,970491	99,754088
$\lambda_8$	0,0244199	0,203499	11,994910	99,957587
$\lambda_9$	0,0030138	0,025115	11,997924	99,982701
$\lambda_{10}$	0,0014299	0,011916	11,999354	99,994617
$\lambda_{11}$	0,0006445	0,005371	11,999999	99,999988
$\lambda_{12}$	0,0000015	0,000012	12,000000	100,000000

Tabela 07 – Autovetores da Matriz de Correlação.

Var.	Autovetores (coeficientes para componentes principais)											
	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e <sub>4</sub>	e <sub>5</sub>	e <sub>6</sub>	e <sub>7</sub>	e <sub>8</sub>	e <sub>9</sub>	e <sub>10</sub>	e <sub>11</sub>	e <sub>12</sub>
<b>pH</b>	-0,594080	-0,570566	0,124362	-0,543672	-0,094268	0,031726	0,004443	0,023712	-0,000993	0,001522	-0,000077	-0,0000004
<b>Na<sup>+</sup></b>	-0,740571	0,398726	-0,356429	-0,157391	0,359027	0,093724	0,027096	-0,047814	-0,001802	-0,006575	-0,002671	-0,0000004
<b>K<sup>+</sup></b>	-0,900335	0,165591	0,270328	-0,056288	0,145011	-0,237670	-0,086112	-0,027717	-0,003416	-0,004299	-0,001670	0,0000005
<b>Ca<sup>+2</sup></b>	-0,825038	-0,307340	0,416003	0,147381	-0,017286	0,147138	-0,080618	-0,039359	-0,003096	-0,007848	-0,002655	0,0005090
<b>Mg<sup>+2</sup></b>	-0,911246	0,103106	-0,256722	0,020864	-0,254700	-0,074336	0,144278	-0,037223	-0,006912	-0,002056	-0,002522	0,0005588
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	-0,490278	-0,836251	-0,184444	0,124087	0,088939	-0,035101	0,008237	0,023268	0,031567	0,002224	-0,011954	0,0000038
<b>Cl<sup>-</sup></b>	-0,749875	0,491970	-0,344860	-0,021304	-0,210014	0,019182	-0,174309	0,033620	0,013970	-0,008984	0,002600	-0,0000024
<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>	-0,743169	0,561146	0,331971	0,012085	0,051814	0,019138	0,127212	0,048747	0,027623	-0,006085	0,007344	-0,0000018
<b>A. T</b>	-0,496648	-0,832810	-0,195284	0,110176	0,090628	-0,027469	0,005994	0,006217	-0,006709	-0,008427	0,018312	-0,0000056
<b>D. T.</b>	-0,972390	-0,104098	0,072651	0,090932	-0,158686	0,034843	0,041494	-0,043481	-0,005505	-0,005170	-0,003024	-0,0009524
<b>STD</b>	-0,980771	0,076794	-0,018848	0,112791	0,080653	0,016189	0,012896	0,106078	-0,029715	0,003260	-0,005912	-0,0000033
<b>CE</b>	-0,990001	0,118964	-0,015594	0,042434	0,011597	0,024803	-0,034321	-0,025274	0,005253	0,032695	0,006176	0,0000044

Var. - Variável

Tabela 08 – Escores para as Componentes Principais.

Amostras	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	Y <sub>7</sub>	Y <sub>8</sub>	Y <sub>9</sub>	Y <sub>10</sub>	Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>
CE026	-0,7660	-2,2929	0,5828	0,6097	-0,1563	0,8528	0,3704	0,1591	-0,0073	-0,0025	-0,0276	0,001249
CE028	-1,0902	-1,0418	-0,6264	-0,2003	0,1935	0,4407	-0,2019	0,0188	-0,0539	-0,0719	-0,0453	0,000822
CE033	2,9664	0,7260	0,0553	-0,0532	-0,0232	0,0307	0,3111	0,0612	-0,0235	-0,0413	0,0035	0,001394
CE035	2,2090	1,4137	-0,3773	0,8541	-0,0791	-0,0330	-0,1041	-0,1097	-0,0565	0,0883	-0,0308	-0,000410
CE103	2,4396	0,6058	0,1350	-0,3208	-0,1094	0,1476	0,1397	0,04522	-0,0475	0,0088	-0,0105	-0,001954
CE223	0,8685	-0,6032	0,3507	-0,9166	-0,1503	0,3508	0,3491	-0,0204	0,0266	0,0076	0,0022	-0,001957
CE245	-1,6623	-2,5380	-0,5697	0,3830	-0,3066	-0,2673	0,6557	0,2975	0,0194	0,0834	0,0126	0,001542
CE247	0,6136	-0,6739	0,5610	-0,7487	-0,1029	-0,7091	-0,0359	-0,0841	-0,0477	0,0200	-0,0267	0,000566
CE279	-7,6722	3,8852	-0,7707	0,2134	-1,8212	-0,1528	0,3430	0,0752	0,0104	-0,0567	-0,0109	-0,000381
CE280	-5,3960	3,1792	-1,4723	-1,0547	1,9694	0,1702	0,2486	-0,0280	0,0778	0,0334	-0,0089	0,000414
CE306	2,2526	0,5538	0,2878	-0,7118	-0,0694	-0,4737	-0,1468	0,1383	-0,0313	-0,0031	0,00897	0,001298
CE331	1,2004	0,3464	0,0154	-0,9168	-0,3542	0,0279	-0,3628	0,1579	-0,0440	0,0131	-0,0184	0,002267
CE340	-5,7798	2,2783	3,7064	0,6272	0,5870	-0,0155	-0,1656	0,0539	-0,0634	0,0221	0,0177	0,000118
CE342	0,1836	-1,3251	0,9919	-0,4688	-0,1887	0,1776	-0,0002	-0,1317	0,0426	-0,0375	0,0015	0,000456
CE407	-0,1092	-0,3942	-0,0916	-0,4940	0,3413	0,0345	-0,4108	0,1892	-0,0391	-0,0032	-0,0340	-0,001479
CE436	-2,9812	-1,1729	-0,2248	-0,0579	-0,6610	0,2037	-0,4266	-0,3883	0,0356	0,0704	-0,0143	0,000091
CE445	-3,7392	-1,9585	-1,5547	0,0864	0,3143	0,1345	-0,0181	-0,1915	-0,2034	-0,0190	0,0666	-0,000347
CE655	-1,0996	-1,3659	0,2140	0,5835	-0,1014	0,4742	-0,4472	0,1938	0,0847	0,0083	0,0354	-0,001003
GU036	3,0050	1,1242	-0,0202	0,9135	0,0502	-0,0612	0,2460	-0,1169	-0,0057	0,0012	-0,0261	-0,001032
GU052	2,9550	0,9898	-0,0991	0,3494	0,0731	-0,0380	0,1328	0,0195	0,0197	-0,0237	0,0345	-0,000276
GU176	0,3540	-1,1540	0,2419	-0,3797	-0,2635	0,2406	0,2871	-0,1482	0,0213	0,0243	-0,0123	-0,000601
GU220	2,0246	1,4891	-0,3964	0,8466	0,2039	0,1738	-0,4739	-0,1028	0,0487	-0,0377	-0,0107	0,000756
GU293	2,7570	1,0797	-0,1049	0,6515	0,1293	-0,1070	0,2725	-0,1323	-0,0387	0,0133	-0,0209	0,000568
GU543	-0,5846	-1,5837	0,6419	-0,5405	-0,0770	-0,2676	0,1463	-0,2203	0,0704	-0,0274	0,0247	0,001888
GU605	2,2659	0,8541	-0,1805	0,1808	0,1471	-0,0516	-0,1446	0,04518	0,0322	-0,0462	0,0264	0,000744
GU616	-1,7272	-0,3700	-1,1249	0,3167	-0,6194	-0,3345	-0,5987	0,0764	0,0499	0,0257	0,00901	-0,000338
GU617	0,4013	-0,3510	-0,3430	0,4185	0,3622	-0,0501	-0,1139	0,0017	0,0091	-0,0161	-0,0122	0,002029
GU618	2,1197	0,5055	0,0371	-0,8450	-0,0738	-0,0497	0,0105	0,1446	0,0006	0,0022	0,0153	-0,001477
GU629	-2,6700	-3,2737	-0,2259	1,0667	0,9069	-0,6941	0,0149	0,1859	0,0330	-0,0383	-0,0245	-0,001760
GU633	1,7787	0,4546	0,0550	-0,9002	-0,3105	0,1356	-0,1970	0,2098	-0,0025	0,0256	0,0190	-0,001044
GU729	-0,7559	-1,6237	0,6508	-0,4447	-0,0101	-0,3110	0,1073	-0,2907	0,0464	-0,0311	-0,0010	-0,001266
GU736	2,7636	0,9578	-0,0575	0,3590	0,0799	-0,0726	0,1817	-0,0500	0,0001	-0,0284	0,0076	-0,001629
GU737	2,8748	1,2792	-0,2869	0,5935	0,1197	0,0935	0,0316	-0,0584	0,0360	0,0362	0,0501	0,00075

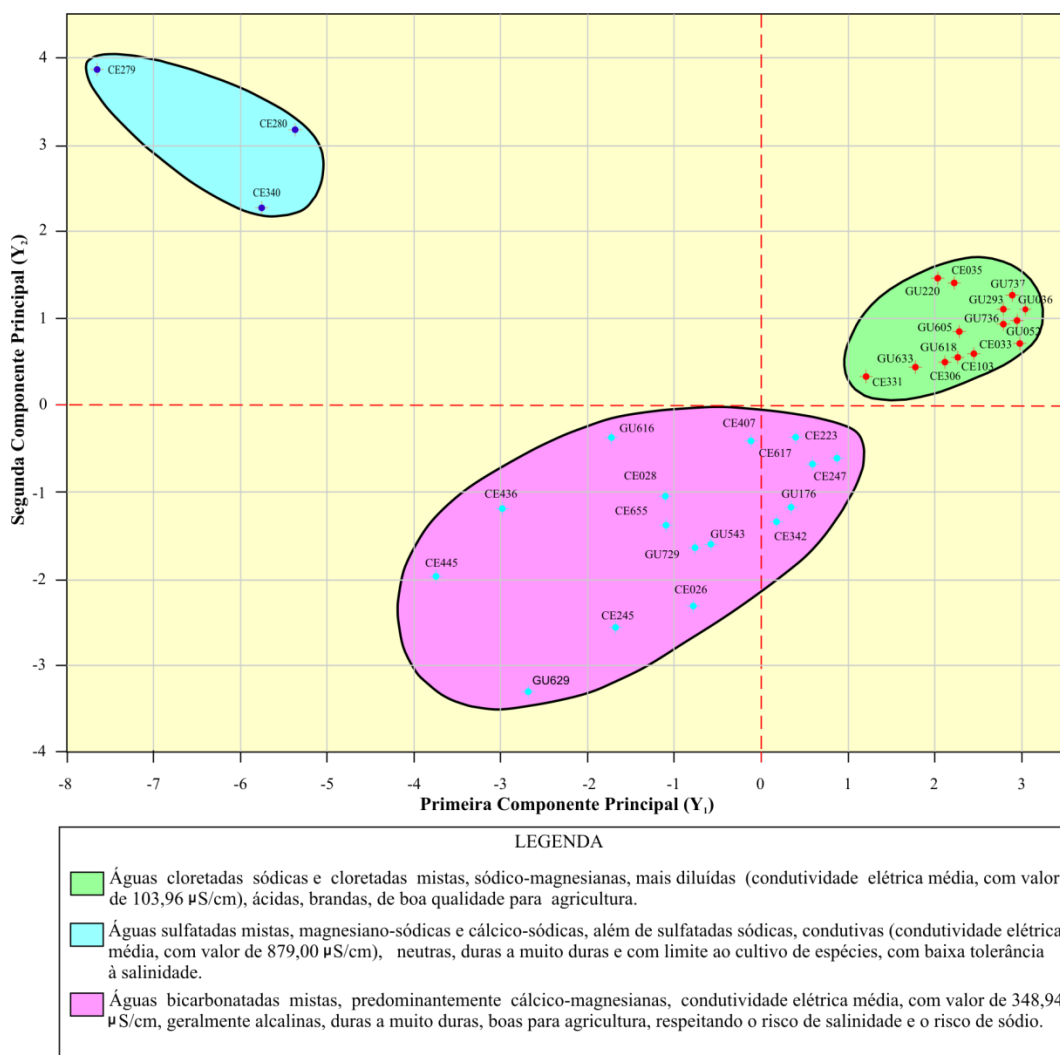


Figura 03 – Gráfico de Dispersão das Componentes Principais  $Y_1$  e  $Y_2$ .

A análise das componentes principais  $Y_1$  e  $Y_2$  (figura 03) permite identificar 3 grupos de águas:

- **Grupo 1** - Amostras com valores positivos, onde primeira componente principal ( $Y_1$ ) está entre 1,0 e 3,1 e segunda componente principal ( $Y_2$ ), entre 0,30 e 1,50. Engloba águas mais diluídas, com condutividade elétrica média de 103,96  $\mu\text{S/cm}$ , ácidas, com pH médio de 5,46, brandas (dureza total entre 8 e 48 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ), cloretadas sódicas e cloretadas mistas (sódico-magnesianas), ocorrendo, localmente a mista mista (cloretado-bicarbonatadas magnesiano-sódicas). Quanto ao seu uso na agricultura possuem muito baixa salinidade e baixa sodicidade ( $\text{C}_0\text{S}_1$ ), baixa salinidade e baixa sodicidade ( $\text{C}_1\text{S}_1$ ), sendo de boa qualidade, podendo ser usadas na maioria das culturas, sem restrição. Foi observado que, de um modo geral esta tipologia de água está presente próximo do contato do aquífero Cabeças com as Coberturas Detrito-Lateríticas ou quando este aquífero está confinado, pela formação Longá. Ocorrem nas localidades de Angical e Morros, município de Brejo do Piauí, na sede do município de Canto do Buriti, Recanto da Serra, município de João Costa, Baixa Grande e Canto do Angico, município de Pajeú do Piauí, Maciel e

Marcos, município de Pedro Laurentino, Santa Virgem, Várzea Grande e Arvoredo, município de Ribeira do Piauí e Caraíbas, Ponto D'Água e Lagoa Encantada, município de Tamboril do Piauí;

- **Grupo 2** - Amostras com valores da primeira componente principal ( $Y_1$ ), muito baixos, negativos, entre -8 e -5 e da segunda componente principal ( $Y_2$ ), superiores a 2. São águas condutivas (condutividade elétrica média de 879,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), pH neutro, duras a muito duras (dureza total entre 160 e 325 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ), ricas em sulfatos, ocorrendo as sulfatadas mistas (magnesiano-sódicas e cálcico-sódicas) e a sulfatada sódica. Quanto ao seu uso na agricultura possui alta salinidade e sodicidade baixa ( $\text{C}_3\text{S}_1$ ) o que limita o cultivo de espécies com baixa tolerância à salinidade. Os resultados mostraram que, geralmente esta tipologia de água está presente nas proximidades do contato do aquífero Cabeças com o aquífero Pimenteiras. Ocorrem nas localidades Umbuzeiro e Sobradinho, município de Nova Santa Rita e na localidade Felipe, município de João Costa;

- **Grupo 3** – Apresenta amostras com valores da primeira componente principal ( $Y_1$ ) entre -4 e 0,9 e da segunda componente principal ( $Y_2$ ), entre -3,3 e -0,4. A condutividade elétrica média é de 348,94  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , pH, geralmente alcalino, média de 7,72, embora em alguns locais se apresente levemente ácido, entre 6,0 e 7, com dureza total, variando entre dura (50 - 100 mg/L de  $\text{CaCO}_2$ ) e muito dura (100 - 200 mg/L de  $\text{CaCO}_2$ ). São águas bicarbonatadas, predominantemente mistas, embora ocorram de forma localizada e restrita, as bicarbonatadas cálcicas. As bicarbonatadas mistas são, na maioria cálcico-magnesianas, ocorrendo em menor escala as outras tipologias catiônicas (magnesiano-sódicas, magnesiano-cálcicas, sódico-cálcicas, cálcico-sódicas e sódico-magnesianas). Quanto ao seu uso na agricultura, nas áreas onde estão presentes as bicarbonatadas cálcico-magnesianas e bicarbonatadas cálcicas, possuem baixa salinidade e são fracamente sódicas ( $\text{C}_1\text{S}_1$ ), média salinidade e fracamente sódicas ( $\text{C}_2\text{S}_1$ ). As outras classificações iônicas de águas, pertinentes ao grupo 3, possuem média salinidade e são fracamente sódicas ( $\text{C}_2\text{S}_1$ ). De um modo geral, tanto as bicarbonatadas mistas como as bicarbonatadas cálcicas são boas para agricultura, respeitando os riscos de salinidade e sódio, de acordo com a classificação da USSL. Foi observado que, geralmente, esta tipologia de água não está relacionada à presença de formações geológicas subjacentes ou sobrejacentes nas proximidades. Ocorrem nas localidades Cansação, município de Brejo do Piauí, Várzea Grande, município de Canto do Buriti, Tanque Novo, Benguê, Saquarema, Comprida e Baixa da Esquerda, município de Nova Santa Rita, Patos e Caiçaras, município de Ribeira do Piauí, Estação e Estreito I, município de São João do Piauí, Mandacaru, Corrente e Serra do Alecrim, município de Tamboril do Piauí.

As águas desse aquífero, de um modo geral, se encontram dentro dos limites de potabilidade para consumo humano, recomendados pela Portaria nº 518/MS, de 25 de março de 2004. Excetuam-



se amostras provenientes das localidades Umbuzeiro, município de Nova Santa Rita e Felipe, município de João Costa, pertencentes ao Grupo 2, onde o teor de sulfato está fora dos padrões de tolerância.

## 6.2 – Análise de Agrupamentos/Modo Q

Foi utilizada a análise de agrupamento/modo Q com o intuito de confirmar os 3 grupos de águas, diagnosticados pela análise das componentes principais. Dessa maneira, para os valores padronizados, considerando como medida de similaridade o coeficiente de distância euclidiana, aplicado como técnica de agrupamento, o Método de Ward, foi observado que, de forma semelhante, a formação dos 3 grupos, identificados pela análise das componentes principais. A figura 04 mostra o dendrograma resultante.

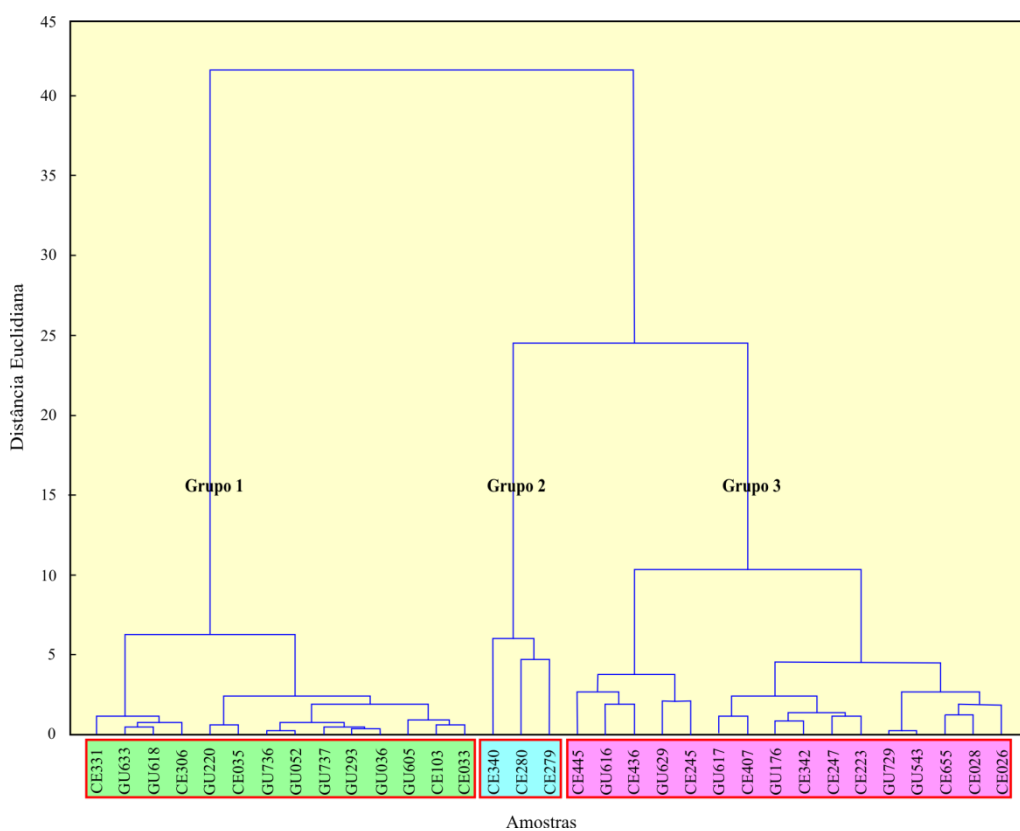


Figura 04 – Dendrograma, obtido pelo Método de Variância Mínima (Método de Ward), utilizando-se como medida de similaridade a Distância Euclidiana.

## 7 – CONCLUSÕES

- As técnicas estatísticas, multivariadas, de componentes principais e de agrupamentos constituem uma ferramenta importante que permite a identificação de grupos, com características hidroquímicas semelhantes.

- Os métodos multivariados não substituem os métodos tradicionais de hidroquímica e sua utilização e interpretação deve ser feita, sempre, levando-se em conta a natureza dos dados, seu significado hidroquímico regional e as relações do aquífero, com outras unidades hidrogeológicas.
- A análise de componentes principais permite transformar um conjunto de variáveis originais, intercorrelacionadas, num conjunto de variáveis não correlacionadas, as componentes principais. As duas primeiras componentes explicam uma proporção elevada das informações do conjunto original.
- A análise de agrupamentos é utilizada, com a finalidade de agrupar as amostras que tenham similaridade entre si e heterogeneidade em relação a outros agrupamentos, em termos de uma distância, no caso, a distância euclidiana. Os agrupamentos formados são analisados, através de um gráfico, conhecido como dendrograma.
- O gráfico de dispersão das duas primeiras componentes principais  $Y_1$  e  $Y_2$  permitiram, dentro da área de estudo, a identificação de três grupos de águas do aquífero Cabeças, com características físico-químicas distintas:
  - Grupo 1 - Engloba águas mais diluídas, com condutividade elétrica média de 103,96  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ácidas, brandas, cloretadas sódicas e cloretadas mistas (sódico-magnesianas), ocorrendo, localmente a mista mista (cloretado-bicarbonatada magnesiano-sódica). Quanto ao seu uso na agricultura são de boa qualidade, podendo ser usadas na maioria das culturas, sem restrição;
  - Grupo 2 - São águas condutivas (condutividade elétrica média de 879  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), neutras, duras a muito duras, ricas em sulfatos, ocorrendo as sulfatadas mistas (magnesiano-sódicas e cálcico-sódicas) e a sulfatada sódica. Quanto ao seu uso na agricultura possuem limite ao cultivo de espécies com baixa tolerância a salinidade;
  - Grupo 3 - É formado por águas com condutividade elétrica média de 348,94  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , geralmente alcalinas, embora em alguns locais se apresente levemente ácidas, duras a muito duras. São águas bicarbonatadas mistas, predominantemente cálcico-magnesianas, embora ocorram, de forma localizada e restrita, as bicarbonatadas cálcicas. De um modo geral, tanto as bicarbonatadas mistas como as bicarbonatadas cálcicas são boas para agricultura, respeitando o risco de salinidade e o risco de sódio, de acordo com a classificação da USSL.
- Observou-se que, geralmente, as águas do Grupo 1 estão presentes próximo do contato do aquífero Cabeças com as coberturas Detrito-Lateríticas ou quando esse aquífero está confinado pela formação Longá; as do Grupo 2 estão presentes nas proximidades do contato do aquífero Cabeças com o aquífero Pimenteiras e as do Grupo 3 não estão relacionadas a presença de formações geológicas, subjacentes ou sobrejacentes, nas proximidades.
- Vias de regra, as águas do aquífero Cabeças se encontram dentro dos limites de potabilidade para consumo humano.

- Os grupos definidos pela análise do dendrograma, resultantes da aplicação da análise de agrupamentos, modo Q, obtidos pelo método de Ward, com a utilização de distâncias euclidianas, como medida de similaridade, coincidem exatamente com aqueles identificados pela análise das componentes principais.
- O gráfico de dispersão e o dendrograma não apresentaram uma separação nítida na classificação iônica, com relação aos cátions.

## 8 – BIBLIOGRAFIA

BRASIL, MINISTÉRIO DA SAÚDE. PORTARIA N° 518/MS, 2004. *Norma de Qualidade de Água para Consumo Humano*. Brasília.

CORREIA FILHO, F. L. & MONTEIRO, A. B., 2009. *Projeto Borda Sudeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba: relatório final*. Teresina: CPRM, 153 p. (no prelo).

DAVIS, J. C., 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. 2nd ed., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore. John Wiley and Sons, Inc. 646. ISBN 0-471-080779-9.

LANDIM, Paulo, M. Barbosa, 2000. *Análise Estatística de Dados Geológicos Multivariados*. Departamento de Geologia Aplicada. Laboratório de Geomatémática. UNESP/Campus de Rio Claro. Texto Didático 03.

KAISER, H. F., 1960. *The Application of Electronic Computers to Factor Analysis*. Educational and Psychological Measurement. Thousand Oaks, vol. 20, p. 141-151.

ORLÓCI, L., 1978. *Multivariate Analysis in Vegetation Research*. 2nd ed. The Hague: Dr. W. Junk B. V. Publishers. 451 p.

REIS, E., 1997. *Estatística Multivariada Aplicada*. Lisboa, Edições Silabo, 2ª ed. ISBN 972-618-165-8. 342 p.