

# **Implicações hidroquímicas da interação rocha-água: interpretações através da representação gráfica de análises químicas de águas subterrâneas**

**Gastmans, D.<sup>1,2,3</sup>; Alberto, M.C.<sup>1,2,4</sup>; Bufon, A.G.M.<sup>1,5</sup>; Moraes, F.T.<sup>1,6</sup>; Santos, M.M.<sup>1,2,7</sup>; Silva, J.R.M.<sup>1,8</sup>; Chang, H.K.<sup>1,2,9</sup>**

**RESUMO:** Neste trabalho foram analisadas graficamente 462 amostras provenientes de poços profundos, distribuídos pelo Estado de Minas Gerais, em 10 Sistemas Aquíferos distintos. Estas análises consistiram na elaboração de Diagrama de Piper, bem como tratamento estatístico básico, para cada um dos Sistemas Aquíferos, avaliando-se a relação entre a composição hidroquímica das águas e a constituição mineralógica das unidades litológicas que compreendem estes sistemas aquíferos. Os resultados mostraram que a composição hidroquímica das águas subterrâneas indicam, de maneira geral, a associação mineralógica das rochas que constituem o Sistema Aquífero no qual as águas estão reservadas, principalmente naqueles que possuem composição relativamente uniforme. Com isso, foi possível descrever o panorama hidroquímico das águas subterrâneas do Estado de Minas Gerais, verificando-se boa correlação com as respectivas unidades litológicas dos sistemas aquíferos.

**PALAVRAS CHAVES:** hidroquímica, águas subterrâneas, composição mineralógica.

**ABSTRACT:** In this paper graphical analysis of 462 groundwater samples from ten aquifer system located in Minas Gerais State were executed. The analysis involved Piper Diagram representations, as well as descriptive statistical analysis, for each individual aquifer system, evaluating relationship between groundwater hydrochemical composition and mineralogical/ lithological composition of these aquifer systems. Results showed that chemical composition for groundwater is related, in general, to the mineralogical association of the groundwater reservoir aquifer system, particularly in those with uniform mineralogy. In conclusion, groundwater composition is controlled by the lithology of the aquifer system.

**KEYWORDS:** hydrochemistry, groundwater, mineralogical composition.

---

1 – Programa de Pós Graduação em Geociências e Meio Ambiente do IGCE – UNESP –Av. 24<sup>A</sup> 1515, CEP:13506-900 Rio Claro (SP) Fone: (19) 3524-9562; 2 – Laboratório de Estudo de Bacias (LEBAC) Av. 24<sup>A</sup> 1515, CEP:13506-900 Rio Claro (SP) Fone: (19) 3532-5119; 3 – [gastmans@rc.unesp.br](mailto:gastmans@rc.unesp.br); 4 – [malberto@rc.unesp.br](mailto:malberto@rc.unesp.br); 5 – [abufon@bol.com.br](mailto:abufon@bol.com.br) ; 6 – [fernanda\\_tmoraes@yahoo.com.br](mailto:fernanda_tmoraes@yahoo.com.br); 7 – [mauricio\\_geografia@ig.com.br](mailto:mauricio_geografia@ig.com.br); 8 – [jrmorando@uol.com.br](mailto:jrmorando@uol.com.br); 9 – [chang@rc.unesp.br](mailto:chang@rc.unesp.br).  
XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços  
II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste

## 1. INTRODUÇÃO

A determinação da relação entre as propriedades físicas e o quimismo das águas subterrâneas, com os tipos litológicos de uma determinada área, tem sido solucionada com a utilização da hidroquímica, sendo possível estabelecer, a partir do conhecimento dos litotipos constituintes de determinado aquífero, quais seriam as propriedades físico-químicas e os constituintes previstos para estas águas subterrâneas.

Essas relações, por vezes, podem não parecer muito claras, já que diversos constituintes encontrados nas águas subterrâneas não provêm diretamente da alteração de minerais formadores das rochas, citando-se como exemplo a presença de bicarbonato, derivado em grande parte do dióxido de carbono presente na atmosfera e liberado nas zonas de recarga dos aquíferos através da atividade bioquímica [1].

Entretanto, é esperada alguma correlação entre a composição química da água subterrânea e das rochas através das quais ela percola. Para aquíferos com recarga direta, e onde não ocorram misturas de águas provenientes de outros aquíferos, esta relação pode ser simples, porém, se existirem relações de fluxo entre aquíferos com distintas litologias, estas relações passam a apresentar um certo grau de complexidade.

O objetivo deste trabalho é verificar a existência dessas relações, visando estabelecer um paralelismo entre os tipos litológicos dos aquíferos e o padrão hidroquímico observado nas suas águas subterrâneas, através da utilização de diferentes representações gráficas de análises químicas.

A análise destas relações foi efetuada através de um estudo de caso, fruto de exercício realizado na disciplina “Avaliação Hidrogeoquímica de Recursos Hídricos”, ministrado pelo Prof. Dr. Chang Hung Kiang no curso de pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente, do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP – Campus de Rio Claro, utilizando-se a base de dados disponibilizada para a COPASA - MG, em 1995, em estudo realizado pela empresa Hidrosistemas denominado “Disponibilidades Hídricas Subterrâneas no Estado de Minas Gerais” [2].

A escolha desta base de dados deveu-se aos seguintes fatores: i) qualidade e quantidade das informações disponibilizadas, como por exemplo, os perfis geológicos, os laudos analíticos e as informações geográficas dos poços profundos e; ii) variabilidade de tipos litológicos existentes no Estado de Minas Gerais que, em princípio, possibilitam a existência de uma gama variada de tipos hidroquímicos para as águas subterrâneas.

## 2. MÉTODOS DE ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE DADOS HIDROQUÍMICOS

A análise e avaliação de dados hidroquímicos pode ser realizada por meio de diferentes técnicas, cuja aplicação é função do tipo de estudo e dos resultados que se espera atingir.

O uso dos íons maiores como traçadores tornou-se bastante comum em estudos hidrogeológicos, com o objetivo de se delinear a condição do fluxo dentro dos aquíferos [3]. Esta abordagem é baseada no agrupamento por similaridade hidroquímica das amostras analisadas em determinado grupo de poços ou área a ser avaliada.

Os principais métodos de avaliação hidroquímica (Tabela 01) podem ser divididos em dois grandes grupos:

- **métodos estatísticos**, que podem ser univariados ou multivariados;
- **métodos gráficos**, também denominados de diagramas de concentrações de íons.

**Tabela 01 – Principais Métodos Empregados para a Análise de Dados Hidroquímicos**

<b>Métodos interpretativos</b>	
<b>Métodos Estatísticos</b>	<b>Métodos Gráficos</b>
Estatística Descritiva (Univariada). Análise de Agrupamentos (“Cluster Analysis”). Análise das Componentes Principais.	Diagrama de Barras [4]. Diagramas de Pizza Diagrama de Stiff [5]. Diagrama de Schoeller [6]. Diagrama de Piper [7].

### 2.1 – Métodos Estatísticos

#### 2.1.1. Análise Exploratória e Descritiva Univariada

Para a compreensão da hidroquímica de determinado grupo de amostras, uma primeira aproximação a ser efetuada é o estudo das relações estatísticas existentes entre os constituintes dissolvidos nas águas e os diversos parâmetros ambientais envolvidos.

Estas relações podem ser avaliadas isoladamente por meio de métodos estatísticos descritivos, onde são analisados o comportamento e a distribuição de determinada variável dentro de um conjunto de amostras.

### 2.1.2. Análise Multivariada

Os métodos estatísticos multivariados são bastante eficientes para a divisão de um conjunto de amostras em grupos com características hidroquímicas distintas [3, 8, 9, 10], entretanto, esta subdivisão pode, em muitos casos, não fornecer informações a respeito do padrão hidroquímico dos grupos formados.

A análise de agrupamentos (*cluster analysis*) utiliza a similaridade entre indivíduos para classificá-los hierarquicamente em grupos, considerando o conjunto de variáveis utilizadas para cada indivíduo [11].

Como maneira de se reduzir a quantidade de variáveis analisadas, a análise das componentes principais (PCA) tem sido bastante empregada, definindo novas variáveis que podem ser representadas em um diagrama com dois ou três eixos

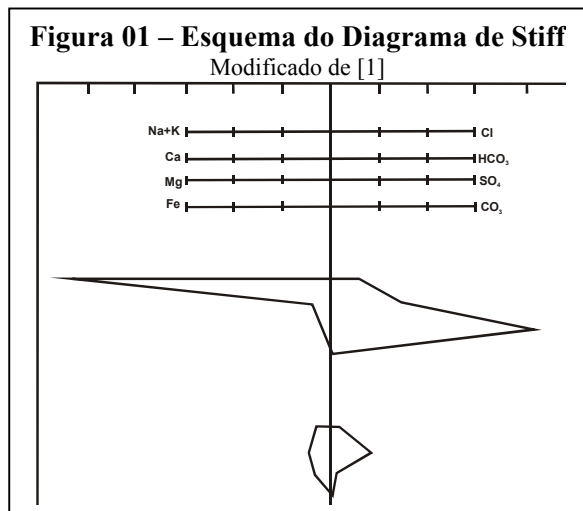
Esta técnica não é considerada *sensu strictu* uma técnica estatística multivariada, e sim uma simples manipulação matemática que promove uma certa significância dentro de uma determinada matriz de dados [11].

A PCA nada mais é que o cálculo dos autovalores (*eigenvalues*) e correspondentes autovetores (*eigenvectors*) de uma matriz de variâncias-covariâncias ou de uma matriz de coeficientes de correlação entre variáveis. Quando as variáveis, devido a escalas diferentes de mensurações empregadas, não podem ser diretamente comparadas, torna-se necessário preliminarmente a padronização, de modo que as variáveis transformadas passem a ter média zero e variância unitária, o que é conseguido pela transformação “z”. Nesses casos, com variáveis padronizadas, a matriz de variâncias-covariâncias e a de coeficientes de correlação tornam-se idênticas. Geralmente os dois ou três primeiros autovetores encontrados explicarão a maior parte da variabilidade presente. Quando o primeiro autovetor já explica 90 a 95% da variabilidade isso deve ser encarado com cuidado e verificado se não estão presentes variáveis com valores de magnitudes muito maior que as demais [12].

## 2.2 – Diagramas Hidroquímicos

A despeito de limitações dos diagramas, principalmente o diagrama de Stiff, que só possibilita a análise de uma amostra por vez, os métodos gráficos são ferramentas importantes para o entendimento do padrão hidroquímico das águas, sua relação com a litologia existente no aquífero e os processos hidroquímicos envolvidos na sua formação.

O diagrama de Stiff apresenta, de maneira distintiva, as principais características hidroquímicas de uma amostra. Para a sua elaboração são utilizados quatro eixos horizontais paralelos, que se estendem nas duas direções a partir de um eixo central vertical [5].



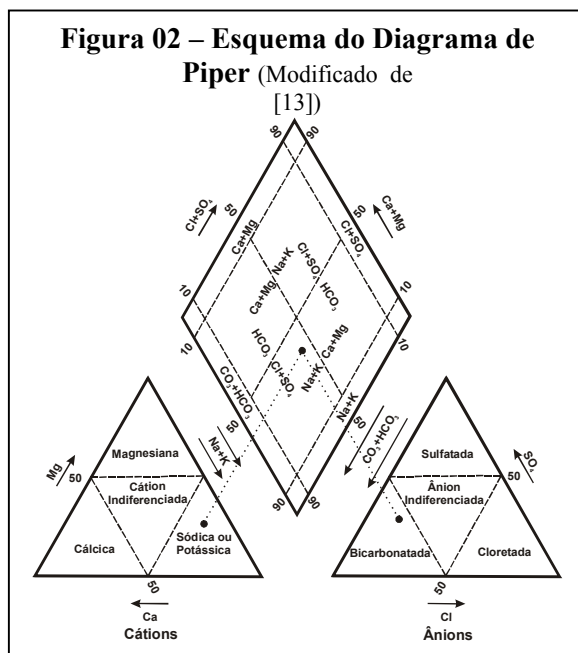
Concentrações em miliequivalentes (meq) de cátions são plotadas à esquerda do eixo central vertical, e as concentrações de ânions, também em miliequivalentes são plotadas à direita deste eixo [1, 13]. Os pontos são então conectados, resultando em um polígono irregular cujo aspecto é apresentado na **Figura 01**.

Diagramas trilineares, como o diagrama de Piper apresentam graficamente as concentrações em porcentagem para cada íon analisado, em

diagramas triangulares, constituindo-se numa das mais utilizadas representações gráficas para a classificação de um conjunto de dados hidroquímicos [14].

A **Figura 02** apresenta o esquema de representação do diagrama de Piper, onde cada vértice dos triângulos inferiores representa 100% da concentração de determinado cátion ou ânion. A intersecção do prolongamento das retas paralelas às faces dos triângulos inferiores (Mg e SO<sub>4</sub>), no losango superior, fornece a classificação hidroquímica de determinada amostra [13].

O diagrama de Piper representa uma ferramenta bastante consistente na análise de conjuntos de dados hidroquímicos, diferentemente dos diagramas de Stiff, que são capazes de classificar apenas uma amostra por vez, possibilitando a distinção de grupos hidroquímicos e a avaliação da evolução hidroquímica ocorrida em determinado aquífero, função de processos hidroquímicos ocorridos ou da ocorrência de misturas de águas.



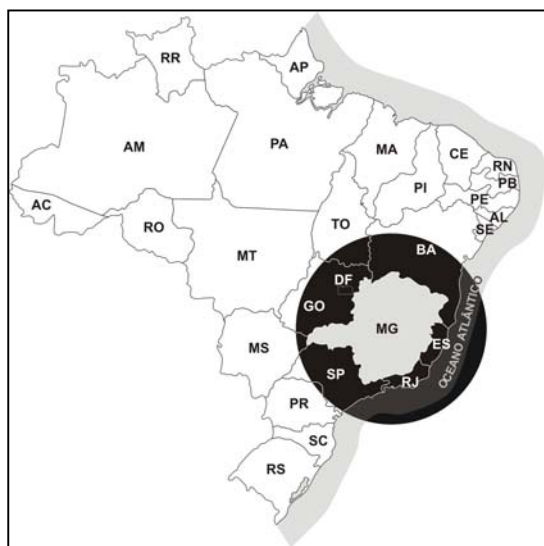
### 3. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS

O Estado de Minas Gerais ocupa área de 586.528 km<sup>2</sup> e está localizado na região Sudeste do Brasil (**Figura 03**). Apresenta, em seu substrato rochoso, uma diversidade de tipos litológicos,

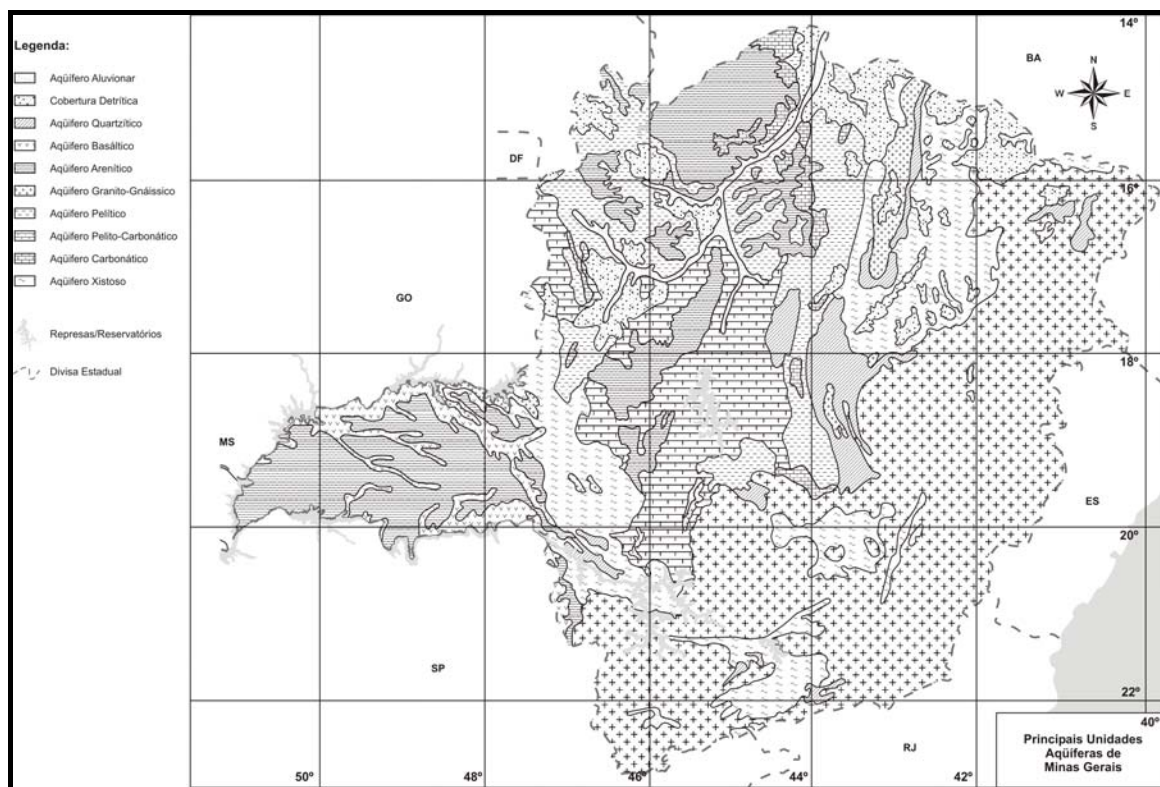
agrupados em diversas unidades litoestratigráficas, que abrangem um período de tempo que se estende desde o Arqueano até o Quaternário. Conseqüentemente, esta variada gama litológica gerou grande número de unidades aquíferas com características próprias e distintas.

Como forma de se agrupar as unidades litoestratigráficas existentes no estado de Minas Gerais, em termos de seu comportamento hidrogeológico, foram utilizados dois níveis de entidades espaciais de agrupamento, as **Unidades Aquíferas** e os **Sistemas Aquíferos** [2]. O termo **Unidade Aquífera** foi utilizado para caracterizar a ocorrência de um ou dois tipos predominantes e bem definidos de rochas portadoras de água, associados a uma unidade geológica específica [2].

Para referenciar um conjunto de unidades aquíferas com litologias predominantes e comportamento hidrogeológico semelhantes, o autor utiliza o conceito de **Sistema Aquífero** [2]. A partir deste conceito, o Estado de Minas Gerais foi subdividido em 10 Sistemas Aquíferos distintos, descritos sucintamente na **Tabela 02**, cuja distribuição pode ser visualizada no mapa da **Figura 04**.



**Figura 03 – Mapa de Localização da área de Estudo**



**Figura 04 – Mapa das Unidades Aquíferas [2]**

**Tabela 02 – Principais Sistemas Aquíferos de Minas Gerais [2].**

<b>Sistemas Aquíferos</b>	<b>Unidades Aquíferas</b>	<b>Litologias Predominantes</b>	<b>Área de Ocorrência</b>	<b>Sistemas Aquíferos</b>	<b>Unidades Aquíferas</b>	<b>Litologias Predominantes</b>	<b>Área de Ocorrência</b>
Sistema Aluvial (SAAI)	Aluviões Quaternários	Areias e Cascalhos	Vales do Rio Doce e São Francisco	Sistema Pelítico-Carbonático (SAPc)	Gr. Bambuí	Calcários, Ardósias e Siltitos	Noroeste do Estado (Porção superior da Bacia do Rio São Francisco e montante da foz do Rio Paracatu)
Sistema da Cobertura Detrítica (SACd)	Mantos de Alteração e Depósitos de Terciário e Quaternário	Areias, Siltitos e Argilitos	Região norte (Bacias dos Rios Urucuia e Paracatu)	Sistema Pelítico (SAPi)	Gr. Bambuí	Ardósias, Siltitos, Arcóseos.	Borda Oriental da Bacia dos Rios São Francisco, Paracatu e Urucuia
Sistema Basáltico (SABs)	Fm. Serra Geral	Basaltos	Triângulo Mineiro	Sistema Carbonático (SACb)	Gr. Bambuí Gr. São João Del Rey	Calcários	Noroeste do Estado
Sistema Arenítico (SAAr)	Fm. Mata da Corda, Fm. Areado Fm. Itararé Fm. Botucatu, Grupo Bauru e Fm. Urucuia	Arenitos, Siltitos e Argilitos	Noroeste do Estado e Triângulo Mineiro	Sistema Granítico-Gnaissico (SAGg)	Gr. Araxá-Andrelândia-Canastra, Ass. Xistos-Gnaisses-Migmatitos, Ass. Granitos-Gnaisses Diversos, S.Gr. Rio das Velhas, Ass. Varginha-Guaxupé, Ass. Charnockítica, Pré Cambriano indiferenciado.	Granitos, Gnaisses, Migmatitos, Pegmatitos, Dioritos, Charnockitos, Granulitos.	Faixa Leste do Estado

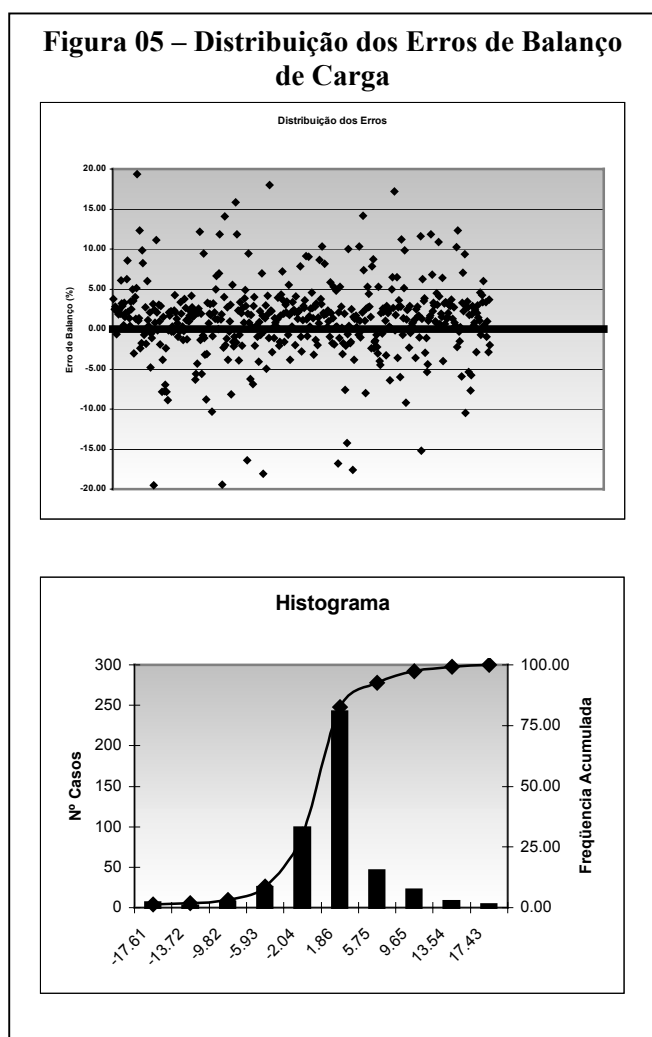
<b>Sistemas Aqüíferos</b>	<b>Unidades Aqüíferas</b>	<b>Litologias Predominantes</b>	<b>Área de Ocorrência</b>	<b>Sistemas Aqüíferos</b>	<b>Unidades Aqüíferas</b>	<b>Litologias Predominantes</b>	<b>Área de Ocorrência</b>
Sistema Xistoso (SAXs)	Gr. Bambuí, Gr. Macaúbas, S.Gr. Minas, S.Gr. Rio das Velhas, Gr. Araxá-Andrelândia-Canastra, S.Gr. Espinhaço, Ass. Xistos-Gnaisses-Migmatitos, Ass. Granitos-Gnaisses Diversos, Gr. São João Del Rey	Micaxistos, Diamictitos, Filitos, Calco-Xistos, Hematitas e Quartzitos Hematíticos, Gnaisses Calco-Xistos, Anfibólio-Xistos.	Nordeste do Estado, Região Central, Extremo Oeste e Sul de Minas.	Sistema Quartzítico (SAQz)	Gr. Araxá-Andrelândia-Canastra, Gr. Bambuí, S. Gr. Espinhaço, Gr. Macaúbas, Ass. Xistos-Gnaisses-Migmatitos, Ass. Granitos-Gnaisses Diversos, S.Gr. Rio das Velhas, Gr. São João Del Rey, Ass. Charnockítica	Quartzitos	Região Central do Estado, ao Norte de Belo Horizonte.



## 4. METODOLOGIA

A base de dados hidrogeológicas utilizada para a realização deste trabalho encontra-se disponibilizada na publicação “Disponibilidades Hídricas Subterrâneas no Estado de Minas Gerais” [2], fruto de estudo efetuado pela Empresa Hidrosistemas para a COPASA – MG. Este volume apresenta uma caracterização hidrogeológica das principais unidades litoestratigráficas do estado, bem como a base de dados contendo informações geográficas, geológicas, hidrogeológicas e hidroquímicas dos poços cadastrados.

Do conjunto inicial de informações analisadas, foram selecionados 747 poços contendo informações hidroquímicas que possibilitaram a elaboração de balanço iônico, ou seja, informações referentes às concentrações dos seguintes íons: cálcio, magnésio, sódio, potássio, ferro, carbonato, bicarbonato, sulfatos, cloretos, nitratos e fluoretos, além de valores de pH, condutividade elétrica e/ou sólidos totais dissolvidos.



Todo o tratamento gráfico e estatístico dado às amostras de água selecionadas foi feito com as concentrações dos cátions e ânions expressas em miliequivalentes (meq/l), padronizando, desta maneira, as unidades entre os métodos de interpretação empregados.

Deste conjunto inicial, foram descartados 98 poços que não apresentavam informações a respeito de seu posicionamento geográfico, além de 125 poços que não apresentavam descrições das unidades litoestratigráficas atravessadas.

A segunda etapa de compilação da base de dados refere-se aos balanços de cargas iônicas das análises. Em função do tipo de estudo a ser efetuado, baseado em representações gráficas, foram selecionadas as amostras que apresentaram balanços iônicos menores que 20%, onde o balanço de cargas foi calculado utilizando-se a expressão:

$$Erro(\%) = \left( \frac{\sum \hat{a}nions - \sum \hat{c}at ions}{\sum \hat{a}nions + \sum \hat{c}at ions} \right) * 100 \quad (1)$$

onde a  $\Sigma \hat{a}nions$  representa a somatória da concentração, em miliequivalentes, por litro dos ânions, e  $\Sigma \hat{c}at ions$  representa a somatória da concentração, em miliequivalentes, dos cátions [14].

Os erros observados apresentaram distribuição normal, com leve tendência a prevalecerem erros positivos, o que significa que as concentrações de ânions analisados são ligeiramente superiores às concentrações de cátions, conforme observado na **Figura 05**.

Em virtude dos erros de balanços iônicos observados, foram descartadas mais 62 amostras, restando da base de dados originais 462 amostras, divididas nos diversos Sistemas Aquíferos mapeados no Estado de Minas Gerais, conforme mostrado na **Tabela 03**.

Algumas amostras, principalmente aquelas relacionadas ao Sistema Aquífero da Cobertura Detrítica (SACb), apresentam um segundo sistema aquífero associado, geralmente sotoposto. Neste caso, estas amostras foram analisadas apenas no sistema aquífero inferior.

A partir dos laudos analíticos restantes, foram elaborados os diagramas de Piper para cada sistema aquífero e calculadas as relações iônicas características ( $Na^+/Ca^{+2}$ ;  $Ca^{+2}/Mg^{+2}$ ;  $K^+/Na^+$  e  $Na^+/(Ca^{+2}+Mg^{+2})$ ), para cada aquífero.

**Tabela 03 – Distribuição das amostras segundo os sistemas aquíferos**

Sistemas Aquíferos	Numero de Casos
Sistema Aluvial	30 casos
Sistema Arenítico	11 casos
Sistema Basáltico	15 casos
Sistema Carbonático	56 casos
Sistema da Cobertura Detrítica	82 casos
Sistema Granítico-Gnaissico	251 casos
Sistema Pelítico	41 casos
Sistema Pelítico-Carbonático	20 casos
Sistema Quartzítico	13 casos
Sistema Xistoso	20 casos

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos com a classificação das amostras através de representações gráficas (Diagrama de Piper) e das relações características será discutida, separadamente, por unidade aquífera, uma vez que o objetivo principal do trabalho é mostrar as relações hidroquímicas existentes e relacioná-las com as principais litologias constituintes destas unidades.

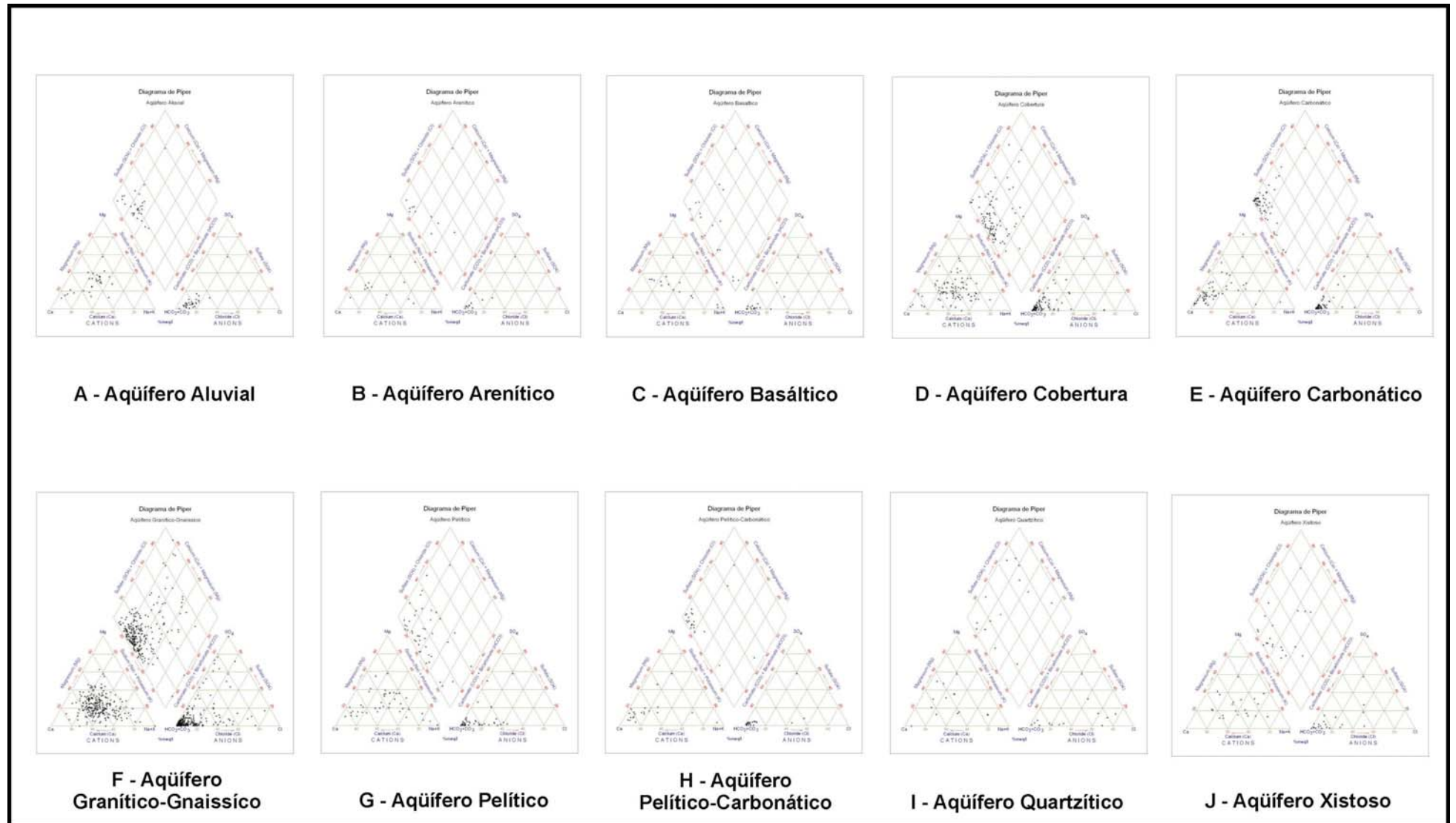
Como forma auxiliar de determinação das relações entre as litologias constituintes dos aquíferos e o quimismo das águas subterrâneas, foram calculadas as razões iônicas ou índices hidrogeoquímicos, que podem indicar um certo relacionamento entre o litotipo e a água [14].

A **Tabela 04** apresenta as variações das razões iônicas para estes aquíferos, enquanto a **Figura 06** mostra os diagramas de Piper para todos os sistemas aquíferos amostrados.

**Tabela 04 – Razões Iônicas**

Sistema Aquífero	Intervalo – Razão Iônica			
	$Mg^{+2}/Ca^{+2}$	$K^+/Na^+$	$Na^+/Ca^{+2}$	$Na^+/Ca^{+2}+Mg^{+2}$
Aluvial	0,5 – 1,0	0,2 – 0,4	0,3 – 0,7	0,15 – 0,4
Arenítico	0,3 – 0,5	0,02 – 0,2	0,04 – 0,2	0,03 – 0,2
Basáltico	0,3 – 1,0	0,03 – 0,2	0,2 – 1,4	0,1 – 1,0
Cobertura	0,3 – 0,7	0,02 – 0,2	0,3 – 1,0	0,2 – 0,6
Carbonático	0,1 – 0,5	0,01 – 0,2	0,01 – 0,4	0,01 – 0,2
Granítico-Gnaissico	0,2 – 0,7	0,03 – 0,3	0,4 – 1,0	0,2 – 0,7
Pelítico	0,3 – 1,0	0,03 – 0,1	0,2 – 2,0	0,1 – 1,0
Pelítico-Carbonático	0,1 – 0,4	0,01 – 0,2	0,04 – 0,4	0,05 – 0,3
Quartzítico	0,2 – 1,0	0,1 – 0,5	0,1 – 1,0	0,1 – 0,6
Xistoso	0,2 – 0,9	0,05 – 0,2	0,4 – 1,5	0,3 – 1,0

**Figura 06 – Diagramas de Piper**



### 5.1. Sistema Aquífero Aluvial (SAAl)

As amostras de água do SAAl são classificadas como bicarbonatadas cálcicas, e subordinadamente bicarbonatadas calco-magnesianas (**Figura 06-A**), com as seguintes relações geoquímicas:

$$\text{Ca} \geq \text{Mg}; \text{Ca} > \text{Na}; \text{Na} > \text{K}.$$

A composição mineralógica dos aluviões é quase que exclusivamente de quartzo, com a presença de minerais acessórios como feldspatos, micas, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, argilo-minerais dentre outros. A composição bicarbonatada calco-magnesiana, indica a presença de feldspatos e argilo-minerais mais ricos em cálcio que em sódio, e a presença de magnésio associada a ocorrência de micas (biotita).

### 5.2. Sistema Aquífero Arenítico (SAAr)

Foram analisadas 11 amostras de água enquadradas dentro do SAAr, cuja distribuição pode ser visualizada na **Figura 06-B**, quase todas classificadas como sendo bicarbonatadas cálcicas e/ou sódicas entretanto, em função das diferentes associações litológicas encontradas dentro das diferentes unidades litoestratigráficas que constituem este sistema aquífero, distinções podem ser feitas.

As amostras classificadas como bicarbonatadas cálcicas estão relacionadas a arenitos com cimento carbonáticos das formações Urucuia, Mata da Corda e Botucatu, com variações apenas nas concentrações dos cátions e ânions.

As águas bicarbonatadas sódicas, com altos pH's, encontradas nos sedimentos do Gr. Bauru podem estar relacionadas a fragmentos de rochas alcalinas, observados nos sedimentos pertencentes a Fm. Uberaba.

### 5.3. Sistema Aquífero Basáltico (SABs)

No SABs foram analisadas 15 amostras, a maioria associada aos derrames basálticos da Formação Serra Geral, inseridos no contexto geológico da porção norte da Bacia do Paraná.

De maneira geral, as amostras desta unidade são hidroquimicamente classificadas como sendo bicarbonatadas cálcicas e sódicas, com alguns termos magnesianos associados. Esta classificação pode ser observada no Diagrama de Piper apresentado na **Figura 06-C**.

As relações hidrogeoquímicas indicam as seguintes razões:

$$\text{Ca} \geq \text{Mg}; \text{Ca} \geq \text{Na}; \text{Na} \gg \text{K}.$$

As rochas vulcânicas básicas da Bacia do Paraná, apresentam assembléia mineralógica constituída essencialmente por plagioclásios, piroxênios, óxidos de ferro, associados a olivinas, apatitas, etc. Os minerais principais (plagioclásios e piroxênios) seriam os responsáveis pelas características hidroquímicas das águas. Termos sódicos observados estão relacionados a presença de zeólitas em amígdalas e vesículas, bastante comuns nas rochas vulcânicas na Bacia do Paraná.

#### **5.4. Sistema Aquífero Carbonático (SACb)**

Dentro do SACb foram analisadas 56 amostras, que são classificadas normalmente como bicarbonatadas cálcicas e, subordinadamente como calco-magnesianos, conforme diagrama da **Figura 06-E**.

As razões hidrogeoquímicas para os principais cátions indicam claramente a preponderância do cálcio sobre todos os outros elementos, em função da composição mineralógica das rochas constituintes deste sistema aquífero (calcários e dolomitas).

As águas com características pouco mais magnesianas estão associadas a presença de calcários ricos em dolomitas, ou ainda a presença de argilo-minerais ricos em magnésio, misturados ao carbonato de cálcio.

#### **5.5. Sistema Aquífero Granítico-Gnaíssico (SAGg)**

Este sistema aquífero é o que apresenta maior número de amostras distribuídas pelo estado de Minas Gerais (251 casos foram analisados) mostrando portanto uma distribuição maior com relação aos tipos hidroquímicos. Grosso modo, as águas são predominantemente bicarbonatadas cálcicas a calco-magnesianas; termos sódicos também são comuns.

Os intervalos das razões geoquímicas para este sistema aquífero apresentam grandes variações, conforme observado na **Tabela 04**, refletindo a grande variação mineralógica das unidades geológicas, onde são observados granitos, gnaisses, charnoquitos, migmatitos entre outros.

A presença de minerais magnesianos (como biotitas) pode ser evidenciada pela razão Mg/Ca e Na/Ca+Mg, com valores entre 0,2 e 0,7, enquanto a predominância de feldspatos cálcicos sobre termos sódicos pode ser evidenciada na relação entre Na/Ca, que é menor que 1 na maior parte das amostras, bem como na razão Na/Ca+Mg, também menor que 0,7.

Apesar dos feldspatos potássicos serem minerais constituintes comuns na composição das rochas graníticas e gnáissicas, as concentrações de potássio nas águas subterrâneas são pequenas, devido principalmente a facilidade de sua absorção nos retículos cristalinos de argilo-minerais, principalmente a illita, gerados pela alteração das rochas [15].

## 5.6. Sistema Aquífero Pelítico (SAPi)

As rochas associadas a este sistema aquífero são as ardósias e filitos do Grupo Bambuí, e foram analisados 41 casos e as amostras de água são principalmente bicarbonatadas cálcicas, e subordinadamente bicarbonatadas calco-magnesianas. Alguns termos sódicos são observados (**Figura 06-G**).

As razões geoquímicas apresentadas na **Tabela 04** mostram que:

$$\text{Ca} \geq \text{Mg}; \text{Ca} \geq \text{Na}; \text{Na} \gg \text{K}.$$

Essas rochas (ardósias e filitos) são constituídas essencialmente por filossilicatos ricos em cálcio e magnésio, refletindo diretamente na composição química das águas. Termos mais sódicos estão associados a águas com concentrações maiores em cloretos, associados a climas mais áridos na região norte de minas.

## 5.7. Sistema Aquífero Pelítico-Carbonático (SAPc)

A composição das rochas associadas a este sistema aquífero (mistura de calcários com ardósias e filitos) explica claramente a tendência das águas apresentarem características bicarbonatadas cálcicas, com pequena presença de magnésio e sódio (**Figura 06-H**).

Termos sódicos estão associados a um aumento das concentrações de cloreto, relacionadas a climas mais áridos, existentes na região norte do estado de Minas Gerais.

## 5.8. Sistema Aquífero Quartzítico (SAQz)

Associadas ao SAQz foram analisadas 13 amostras, que apresentaram grande dispersão com relação a classificação hidroquímica, desde termos bicarbonatados calco-magnesianos, a amostras cloretadas sulfatadas calco-magnesianas (**Figura 06-I**).

As rochas quartzíticas associadas a este sistema aquífero estão relacionadas a diversas unidades meta sedimentares presentes no estado de Minas Gerais, e que, apesar da composição mineralógica ser essencialmente quartzosa, a variabilidade dos feldspatos e micas associados ao quartzo nestas rochas explicaria o grande número de classes hidroquímicas de suas águas, que acaba refletindo na grande amplitude da maioria das razões hidroquímicas.

A presença de termos sulfatados pode estar associado a presença de pirita nos quartzitos, que se oxidaria produzindo o sulfato dissolvido na água.

## 5.9. Sistema Aquífero Xistoso (SAXs)

Foram analisadas 20 amostras dentro do SAXs classificando-se a maioria como bicarbonatadas cálcicas ou sódicas, sendo a presença de magnésio observada em quase todas as amostras (**Figura 06-H**).

As amostras de água relacionadas aos xistos do Gr. Macaúba são essencialmente bicarbonatadas sódicas, refletindo a presença de feldspatos sódicos (albita). As águas associadas aos xistos do Super Grupo Espinhaço são predominantemente cálcicas com termos calco-sódicos evidenciando a presença de alguma albita na paragênese.

As águas relacionadas aos xistos do Grupo Araxá e Minas apresentam-se sem íon predominante, o sódio proveniente dos feldspatos, o magnésio proveniente das micas e/ou de granadas, e o cálcio proveniente de feldspatos cálcicos presentes.

## 6. CONCLUSÕES

Diagramas hidroquímicos associados a outros tipos de análises (estatística e razões hidroquímicas) tem sido largamente empregadas na análise de dados hidroquímicos por diversos autores, e com as mais diversas finalidades.

A utilização desta ferramenta com o objetivo de se estimar composições mineralógicas das rochas constituintes de sistemas aquíferos regionais mostrou que ela pode ser empregada para conjuntos com paragênese mineralógica mais ou menos uniforme, neste trabalho os sistemas SAAI, SAAr, SABs, SACb, SAPI e SAPc.



Para sistemas aquíferos com grande variação litológica a ferramenta deve ser empregada com algumas restrições, estudos de caso em escalas menores, e com maior controle da constituição mineralógica destas rochas deve apresentar resultados satisfatórios.

De maneira geral, podemos afirmar que as características hidroquímicas das águas subterrâneas refletem a composição mineralógica das rochas que as contêm, e em associação com fatores climáticos, que produzem a concentração de cloretos, imprimem às águas sua composição final.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão de auxílio através de bolsas de estudo processos nº 140471/2003-0, nº 133211/2003-7 e nº 141469/2004-8 e a FAPESP pela concessão de auxílio através de bolsas de estudo processo nº 02/10143-9.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] HEM, J.D. **Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Waters**. U.S.Geological Survey Water Supply Paper 2254. 272p – 1985;
- [2] SOUZA, S.M.T. **Disponibilidades Hídricas Subterrâneas no Estado de Minas Gerais**. HIDROSISTEMAS/COPASA. Belo Horizonte. 525p. 1995;
- [3] GÜLLER, C.; THYNE, G.D.; McCRAY, J.E.; TURNER, A.K. Evaluation of Graphical and Multivariate Statistical Methods for Classification of Water Chemistry Data. **Hydrogeology Journal** **10:455-474**. 2002;
- [4] COLLINS, W.D. Graphic representation of water analyses. **Ind.Eng. Chemistry** **15:394**. 1923;
- [5] STIFF, H.A. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. **Journal of Petroleum Technology** **3(10):15-17**. 1951;
- [6] SCHOELLER, H. Utilité de la notion des échanges de bases pour la comparasion des eaux souterraines. **Société Géologie Comptes Rendus Sommaire et Bulletin Série** **5(5): 651-657**. 1935;
- [7] PIPER, A.M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysuis. **American Geophysical Union Transactions** **25:914-923**. 1944
- [8] VIDAL, A.C.; KIANG, C.H. Caracterização Hidroquímica dos Aquíferos da Bacia de Taubaté. **Revista Brasileira de Geociências** **32(2):267-276**. 2002;
- [9] MENG, S.X.; MAYNARD, J.B. Use of Statistical Analysis to Formulate Conceptual Models of Geochemical Behaviour: Water Chemical Data from the Botucatu Aquifer in São Paulo State, Brazil. **Journal of Hydrology** **250:78-97**. 2001;

- [10] INVERNIZZI, A.L.; OLIVEIRA, S.M.B. Hydrochemical characterization of watershed through factor analysis. **Revista Águas Subterrâneas** 18: 67-79. 2004;
- [11] DAVIS, J.C. **Statistics and data analysis in geology**. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, New York. 1986;
- [12] LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos multivariados..** Lab.Geomatemática, DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, Texto Didático 03, 128 pp. 2000. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>.Acessado em 04/11/2003;
- [13] FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology** 4<sup>nd</sup> ed. New York Macmillan Publishing Company 2001;
- [14] CUSTÓDIO, E; LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterrânea** 2<sup>a</sup> Edicion. Barcelona;Ediciones Omega 1983;
- [15] HITCHCOCK, B.; PERKINS, E.H.; GUNTER, W.D. **Introduction to groundwater geochemistry**. Geoscience Publishing Ltd. Sherwood Park, Alberta, Canada. 1999.