

Água subterrânea no maciço do Nordeste (arquipélago dos Açores, Portugal): composição química e processos mineralizadores

J.V. Cruz⁽¹⁾, C. Amaral⁽¹⁾ e J. Figueiredo⁽¹⁾

(1) Dep. de Geociências, Universidade dos Açores, Apartado 1422, 9501-801 Ponta Delgada (Portugal).
E-mail: jvc@notes.uac.pt

RESUMO

Um conjunto de 57 amostras de água captada em nascentes localizadas no Complexo Vulcânico do Nordeste (São Miguel, Açores) foram estudadas. As nascentes, situadas a diversas altitudes (65-760 m), apresentam geralmente caudais reduzidos (0.01-5.37 L.s⁻¹). As águas amostradas são frias (7.9°C<T<16.6°C), ligeiramente ácidas a alcalinas (6.17<pH<7.96) e pouco mineralizadas (condutividade eléctrica entre 56 e 200 µS.cm⁻¹). As fácies predominantes são dos tipos cloretada sódica e bicarbonatada sódica. A variação dos teores nos iões principais, em função da cota das emergências, põe em evidência que a concentração em Cl⁻ e Na⁺, assim como a condutividade eléctrica das águas, decresce com a altitude, o que sugere a maior contribuição de sais de origem marinha para a composição da água subterrânea. Com efeito, a discussão dos resultados obtidos no presente trabalho revela a influência de dois processos hidrogeoquímicos diversos: (1) entrada em solução de sais marinhos, a partir da deposição resultante de processos atmosféricos; este mesmo processo explica que na maioria das águas a relação entre o Cl⁻ e o Na⁺ siga a proporção relativa da água do mar, e (2) hidrólise de minerais silicatados. Este último processo explica que a concentração em metais alcalino terrosos seja superior à esperada considerando unicamente a mistura com sais marinhos.

Palavras chave: Açores, hidrogeologia de regiões vulcânicas, hidrogeoquímica, qualidade da água subterrânea

Groundwater in the Nordeste massif (Azores archipelago, Portugal): chemical composition and geochemical processes

ABSTRACT

A dataset of 57 groundwater samples from springs discharging in the Nordeste Volcanic Complex (São Miguel, Azores) was compiled following a field survey. Sample springs are located in an altitude range of 65 to 760 m and present generally a low discharge (0.01-5.32 L.s⁻¹). Waters are cold (7.9°C<T<16.6°C), slightly acid to alkaline (6.17<pH<7.96), present a low mineralization (electrical conductivity between 56 and 200 µS.cm⁻¹), and are mainly from the sodium chloride and sodium bicarbonate types. Major ion chemistry variation according to discharge altitude shows that Cl⁻ and Na⁺ content, as well as electrical conductivity, decreases with altitude, suggesting the contribution of sea salts spraying to groundwater composition. In fact, from the data discussion provided in the present paper two main hydrogeochemical processes explain water compositions: (1) sea salts input, due to seawater spraying; this process explain that in the majority of the samples the Cl/Na ratio follows the relative composition of seawater, and (2) silicate mineral hydrolysis. This latter processes explains the earth alkali metals enrichment observed in a large number of samples, besides values expected considering only mixing with sea salts.

Key words: Azores, groundwater quality, hydrogeochemistry, volcanic rocks hydrogeology

Intrudução

O presente trabalho insere-se no conjunto de estudos hidrogeoquímicos que têm sido conduzidos em variadas regiões vulcânicas de natureza basáltica s.l., visando: (1) analisar os ciclos geoquímicos dos elementos e o consumo de CO₂ atmosférico (Gíslason *et al.*, 1996), (2) avaliar em laboratório, e no campo, as

reacções de alteração mineral (Gíslason e Eugster, 1987a, 1987b; Arnórsson *et al.*, 2002) e, (3) caracterizar a composição química da água subterrânea a nível regional (Join *et al.*, 1997; Aiuppa *et al.*, 2000; Cruz e Silva, 2001; Herrera e Custodio, 2003; Cruz e Amaral, 2004). O grande número de estudos desenvolvidos deve-se, por um lado, à importância predominante dos basaltos em extensas regiões continen-

tais e insulares e, por outro, à elevada susceptibilidade à alteração dos minerais primários constituintes destas rochas.

O arquipélago dos Açores localiza-se no oceano Atlântico Norte, a aproximadamente 1500 km de Portugal continental, entre as latitudes 36°55'43"N e 39°43'23"N e as longitudes 24°46'15"W e 31°16'24"W. Composto por nove ilhas e alguns ilhéus, de origem vulcânica, o arquipélago possui uma área total de 2333 km² e uma população de 242073 habitantes (censo de 2001). Os habitantes encontram-se dispersos pelas nove ilhas, dos quais cerca de 54% se encontram na ilha de São Miguel e 23% na ilha Terceira.

Os Açores localizam-se junto da junção tripla entre as placas litosféricas Americana, Euroasiática e Africana, e, neste contexto geodinâmico, a crista média atlântica separa as ilhas do grupo ocidental (Flores e Corvo), das restantes, localizadas para Este daquela estrutura: grupos central (Terceira, Pico, Faial, São Jorge e Graciosa) e oriental (São Miguel e Santa Maria). O enquadramento geodinâmico complexo da região dos Açores reflecte-se na intensa actividade sismovulcânica verificada no arquipélago, e cujos efeitos são sentidos desde o povoamento do arquipélago. Exemplos mais recentes correspondem ao sismo de 9 de Julho de 1998, que atingiu a magnitude de 5.8, e a erupção submarina da Serreta (1998-2000), aproximadamente a 10 km a W da ilha Terceira.

Nos Açores, aproximadamente 97% da água de abastecimento à população e actividades económicas é obtido a partir da captação de cerca de 500 origens de água subterrânea. Neste contexto, a água subterrânea assume uma particular relevância, o que lhe confere uma importância ambiental, social e económica de inegável valor e suscita a necessidade de caracterizar quantitativamente e qualitativamente os recursos hídricos subterrâneos. Actualmente, e não obstante os recursos de água subterrânea estarem estimados em 1587.7x10⁶ m³.ano⁻¹, já se colocam alguns problemas no acesso à água subterrânea, em resultado de condicionantes hidrogeológicas que acentuam a vulnerabilidade dos aquíferos à salinização e à poluição difusa ligada às actividades pecuárias.

O presente trabalho expressa os resultados obtidos no decurso de uma investigação hidrogeoquímica desenvolvida na área dominada pelo Maciço Vulcânico do Nordeste, situado na extremidade oriental da ilha de São Miguel, a maior ilha dos Açores (747 km²), localizada entre 37°55'N a 37°04' de latitude e 25°52'W a 25°08'W de longitude (Fig. 1).

Pretende-se, assim, contribuir para colmatar a lacuna do conhecimento existente sobre a composição química da água subterrânea na área do maciço

vulcânico do Nordeste (Cruz *et al.*, 2004a, 2004b). Para este efeito específico procedeu-se à realização de um conjunto de amostragens, alargado a 57 nascentes, com o objectivo de: (1) caracterizar a composição química, (2) avaliar a sua variação em altitude e, (3) identificar os processos mineralizadores da água subterrânea.

Enquadramento regional

Geologia

A geologia da ilha de São Miguel é dominada pelos três vulcões centrais activos das Furnas, do Fogo e das Sete Cidades. A primeira carta geológica desta ilha, na escala 1:50000, baseada exclusivamente em critérios de natureza petrográfica, foi elaborada por Zbyszewsky *et al.* (1958, 1959). Outro autor (Moore, 1991) apresentou um novo mapa geológico para a ilha de São Miguel, considerando a existência de seis complexos vulcânicos, cuja delimitação e ordem sequencial diferem parcialmente do proposto por Forjaz (1984), que consiste nas seguintes unidades vulcanoestratigráficas: Complexo Vulcânico do Nordeste, Complexo Vulcânico da Povoação, Complexo Vulcânico das Furnas, Complexo Vulcânico das Sete Cidades, Complexo Vulcânico do Fogo e Complexo Vulcânico dos Picos (Fig. 2). Desde a descoberta de São Miguel várias erupções vulcânicas subaéreas foram reportadas, remontando os primeiros testemunhos a episódios praticamente coincidentes com o início do povoamento. A última erupção subaérea teve lugar no ano de 1652, no Complexo Vulcânico dos Picos.

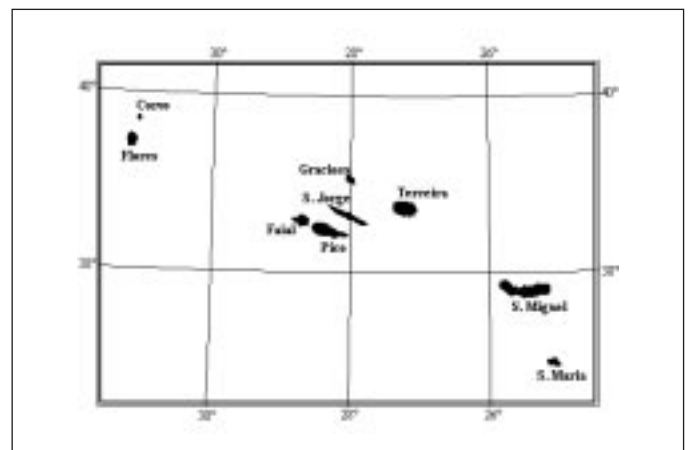


Fig. 1. Localização da ilha de São Miguel, no contexto do arquipélago dos Açores

Fig. 1. Location of the São Miguel island in the Azores archipelago

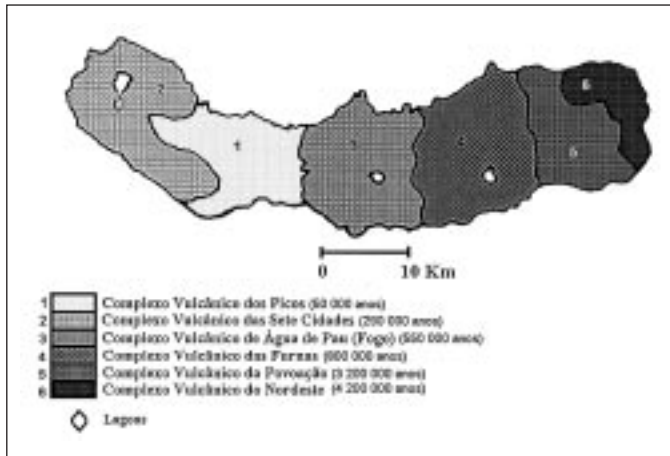


Fig. 2. Complexos Vulcânicos da ilha de São Miguel (adaptado de Forjaz, 1984)

Fig. 2. Volcanic complexes from São Miguel island (modified from Forjaz, 1984)

No decurso dos últimos 5000 anos a actividade dos três vulcões centrais activos foi marcada pela ocorrência de 57 erupções, com a emissão de 4.6 km^3 de materiais vulcânicos (Booth *et al.*, 1978). Considerando toda a ilha de São Miguel foi possível estimar que nos últimos 4 Ma foi emitido um volume de 400 km^3 , o que perfaz um valor médio de 0.01 km^3 por século, efectivamente inferior ao verificado nos últimos 5000 anos. Moore (1990) interpreta estas estimativas, que reflectem um aumento do volume emitido nos últimos 5000 anos, como resultante da edificação dos vulcões centrais traquíticos sobre o substracto vulcânico do Nordeste, mais antigo, e de natureza química básica.

O Complexo Vulcânico do Nordeste domina a extremidade oriental de São Miguel e Fernandez (1982), com base em datações absolutas pelo método do K/Ar, realizadas por Abdel-Monen *et al.* (1975), estabeleceu a sequência estratigráfica deste maciço. Neste contexto, este autor considera que as rochas mais antigas correspondem a basaltos transicionais, com cerca de 4.01 Ma, a que se sucedem ankaramitos, basaltos, traquibasaltos e tristanitos. Os termos litológicos mais recentes, com aproximadamente 0.95 Ma, são rochas de composição mais ácida, nomeadamente traquitos. Uma resultante deste enquadramento, por comparação com outros Complexos Vulcânicos de São Miguel, é o facto dos termos litológicos patentarem um elevado grau de alteração e estarem afectados por uma densa rede de filões.

Genericamente, este complexo é essencialmente constituído por escoadas lávicas e depósitos piroclás-

ticos, que correspondem em cerca de 90% a rochas máficas (Moore, 1990). O significativo predomínio de escoadas lávicas de natureza basáltica s.l. faz supor que o Complexo Vulcânico do Nordeste foi edificado por actividade vulcânica de carácter predominantemente efusivo.

Climatologia

O clima dos Açores é influenciado pela localização do arquipélago numa bacia oceânica aberta ao pólo norte e aos trópicos, em que as massas de ar marinho interagem com massas de ar polares (Ferreira, 1980). Para além destas condicionantes relacionadas com a dinâmica climática global, outros factores, como a altitude, a distância à linha de costa e a exposição do relevo, influenciam, igualmente, o clima nas ilhas, como reconhecido desde os trabalhos pioneiros de Agostinho (1938) e Bettencourt (1979).

Em geral, o clima dos Açores pode ser considerado como temperado marinho, o que se reflecte pela baixa amplitude térmica, elevadas pluviosidade e humidade relativa, e pelos ventos persistentes. Outra característica do clima do arquipélago dos Açores é o contraste acentuado entre uma estação seca e uma estação húmida (Ferreira, 1980), expressa pelo facto de entre Outubro e Março ocorrer cerca de 75% da precipitação anual (DROTRH-INAG, 2001).

A precipitação média anual nos Açores é igual a 1930 mm, variando entre 966 mm (Graciosa) e 2647 mm (Flores), excedendo largamente o valor médio anual da evapotranspiração real no arquipélago (581 mm). A evapotranspiração real média varia igualmente de ilha para ilha, entre 502 mm.ano^{-1} (São Jorge) e 632 mm.ano^{-1} , na Graciosa (DROTRH-INAG, 2001).

O clima da ilha de São Miguel pode ser considerado, de acordo com a classificação proposta por Thorntwaite (1948), como húmido a super-húmido, e mesotérmico com verões secos segundo a classificação de Kopen (Ricardo *et al.*, 1977).

A amplitude térmica em São Miguel é reduzida, não excedendo os 8°C a 9°C , e a temperatura média anual varia entre 17.3°C , na costa Sul, e 11°C a 12°C no interior da ilha, em áreas de altitude da ordem dos 800 m a 900 m. O mês de Agosto é o que apresenta temperaturas médias mensais mais elevadas, da ordem de 22°C no litoral e aproximadamente 15°C nas regiões a maior altitude. O mês mais frio é o de Fevereiro, com temperatura média entre 14°C , no litoral, e valores inferiores a 5°C , nas zonas de cota alta (Ricardo *et al.*, 1977).

A precipitação média anual em São Miguel é igual a 1722 mm (DROTRH-INAG, 2001). Mapas de isoietas projectados por vários autores evidenciam que a precipitação nas zonas costeiras é da ordem de 1000 mm, enquanto nas zonas localizadas a maior altitude a precipitação média anual pode ser superior a 3000 mm (Santos, 1988; LNEC, 1992; DROTRH-INAG, 2001).

A distribuição sazonal da precipitação apresenta uma diferença acentuada entre a estação húmida e seca, como no exemplo da estação meteorológica localizada em Ponta Delgada, em que 76.3% da precipitação anual (958 mm) ocorre entre Setembro e Março.

Escoamento de superfície

Os cursos de água nos Açores apresentam geralmente um comprimento reduzido, com um máximo de 29 km em São Miguel, e um regime predominantemente torrencial. Em função da permeabilidade das formações de cobertura, assim como das condições fisiográficas, como o declive do terreno, a densidade de drenagem é extremamente variável, e em algumas áreas de diversas ilhas é inclusivamente igual a 0 (Cruz, 1997; Cruz e Silva, 2001). A área das bacias hidrográficas é também reduzida, não excedendo os 30 km² (DROTRH-INAG, 2001).

O escoamento anual por unidade de superfície nos Açores é igual a 680 mm, variando entre 134 mm (Graciosa) e 1371 mm (Flores). Tomando em conta a área das ilhas é possível estimar o escoamento total em 1608×10^6 m³.ano⁻¹, que varia entre 8×10^6 m³.ano⁻¹ (Graciosa) e 511×10^6 m³.ano⁻¹ (São Miguel; DROTRH-INAG, 2001).

Em São Miguel o escoamento anual por unidade de superfície é igual a 686 mm, e ocorre essencialmente nos vulcões centrais, nomeadamente nos aparelhos Sete Cidades, do Fogo, das Furnas, da Povoação e do Nordeste. Não obstante o facto da densidade de drenagem depender de muitos factores, como por exemplo a permeabilidade superficial dos terrenos, o relevo e o coberto vegetal, podem referir-se, a título meramente indicativo, os valores obtidos por Borges (1995) para a ilha de São Miguel. Este autor utilizou um mesmo conjunto de cartas topográficas, para obviar ao efeito de escala, e determinou que na região dos Picos a densidade de drenagem é praticamente nula, enquanto, em oposição, nas restantes áreas são atingidos valores superiores a 11.7 km⁻¹.

Hidrogeologia

Os resultados de alguns inventários de pontos de água subterrânea têm sido publicados, e apontam para a existência de mais de 1000 origens no arquipélago dos Açores (Paradela, 1980; Mendonça, 1992; Cruz, 2001a; LNEC, 2001). Os trabalhos efectuados no âmbito dos estudos técnicos do Plano Regional da Água permitiram cadastrar cerca de 950 nascentes e 83 furos de captação (Cruz, 2001a). A distribuição de nascentes no arquipélago apresenta grandes assimetrias, o que é demonstrado pela densidade de pontos de água subterrânea, que varia entre 0.01 nascentes.km⁻² (Pico) e 0.72 nascentes.km⁻² (Santa Maria). Para além do controle climático e geomorfológico, estas diferenças expressam também factores hidrogeológicos, quer singenéticos, quer secundários, como a alteração das rochas.

O caudal específico dos furos varia entre 1.40×10^{-2} e 266.67 L.s⁻¹.m⁻¹ (n=65; mediana= 32.29 L.s⁻¹.m⁻¹; Cruz, 2001a). Os valores mais elevados são observados nas ilhas do Pico e da Graciosa.

A interpretação dos registos dos ensaios de bombeamento, quando disponíveis, e a realização de ensaios de maré, permitiram estimar alguns valores de parâmetros hidrodinâmicos relativos a aquíferos dos Açores, nomeadamente a transmissividade e a difusividade hidráulica (Cruz, 2001a). O conjunto de resultados relativos à transmissividade (n=65) varia entre 1.65×10^{-5} e 4.03×10^{-1} m².s⁻¹ (mediana= 3.66×10^{-2} m².s⁻¹), correspondendo, em 63.5% dos casos, a valores muito altos de acordo com a classificação de Krásny (1993; $T > 1.16 \times 10^{-2}$ m².s⁻¹). Os valores mais elevados correspondem a aquíferos formados por escoadas lávicas basálticas recentes, de espessura reduzida e muito fracturadas, enquanto em Santa Maria são captadas formações litologicamente idênticas, mas de idade Miocénica.

O valor médio da difusividade hidráulica, obtido a partir de observações do efeito de maré em poços e furos da ilha do Pico, é igual a 38.08 m².s⁻¹ (Cruz, 1997; Cruz e Silva, 2001). Este valor é similar aos obtidos na ilha de Reunião por Join *et al.* (1998).

Em São Miguel, os aquíferos de altitude são drenados por cerca de 420 nascentes de água subterrânea, localizadas preferencialmente nos flancos dos vulcões centrais das Sete Cidades, Fogo, Furnas, Povoação e Nordeste (Fig. 3). O caudal é em geral mais elevado em nascentes relacionadas com aquíferos constituídos por escoadas lávicas, comparativamente com aqueles formados por materiais piroclásticos. O caudal de recessão das nascentes relacionadas com o primeiro tipo de aquífero citado varia

entre 5.78×10^{-2} e 47.45 L.s^{-1} , enquanto no segundo grupo varia entre 3.47×10^{-2} e 3.52 L.s^{-1} (Paradela 1980).

O caudal específico dos furos de São Miguel varia entre 0.49 e $100 \text{ L.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$ ($n=65$; mediana= $1.11 \text{ L.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$; Cruz, 2001a). A transmissividade varia entre 5.98×10^{-4} e $1.22 \times 10^{-1} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, (mediana= $1.35 \times 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$), e 45.4% dos valores calculados podem ser considerados como intermédio de acordo a classificação de Krásny (1993; $1.16 \times 10^{-4} < T < 1.16 \times 10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$).

Hidrogeoquímica

As nascentes de águas frias dos Açores apresentam uma temperatura média de cerca de 15°C e um pH que varia entre 4.7 e 8.21. Correspondem a águas pouco mineralizadas, como sugerido pela gama de valores de condutividade eléctrica, entre 36 e $725 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ (média= $188 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$). Quanto à dureza, podem ser classificadas como brandas, dado o valor médio deste parâmetro ser igual a $0.67 \text{ meq.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$.

Nas nascentes, a composição química das águas subterrâneas é dominada pelos iões HCO_3^- , Cl^- , Na^+ e K^+ , e as amostras analisadas correspondem predominantemente a fácies cloretada sódica a bicarbonatada sódica (Cruz e França, 2001; Cruz e Amaral, 2004).

Os iões predominantes em solução, cloreto e sódio, correspondem respectivamente a 13.8% a 84.9% e 38% a 93.2% do conteúdo relativo em aniões e catiões, o que põe em realce a influência do transporte de sais de origem marinha, nomeadamente pelos agentes atmosféricos. Outras nascentes apresentam águas cuja composição é dominada pelo bicarbonato, e este enriquecimento, que pode explicar até 84.9% do conteúdo aniónico relativo, indicia a influência dos processos de dissolução de minerais silicatados, bem como a dissolução de CO_2 nos solos.

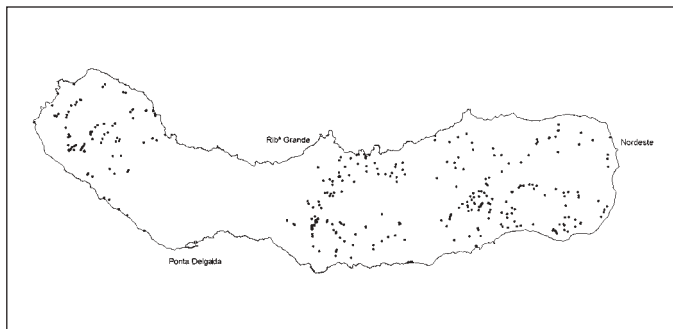


Fig. 3. Localização das nascentes de água subterrânea na ilha de São Miguel (adaptado de Cruz, 2001a)

Fig. 3. Location of the groundwater springs in São Miguel island (modified from Cruz, 2001a)

Nalgumas regiões do arquipélago, a influência de voláteis vulcânicos, de origem profunda, também pode explicar o enriquecimento em HCO_3^- (Cruz *et al.*, 1999).

As águas subterrâneas captadas em furos, predominantemente situados junto à costa, apresentam mineralizações mais elevadas, como é sugerido pelo valor da mediana da condutividade eléctrica, igual a $1044 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ (Cruz, 2001b), e apresentam geralmente fácies cloretada sódica. A salinização dos furos que captam no sistema aquífero basal, devido à intrusão marinha, é favorecida nalgumas ilhas pelas condições geológicas e, nalguns casos, provocaram o abandono de furos, com os inerentes encargos financeiros negativos (Cruz e Silva, 2000).

Hidrogeoquímica do maciço do nordeste

Apresentação de resultados

A área em estudo corresponde grosseiramente ao Sistema Aquífero do Nordeste-Faial da Terra (Cruz, 2001a) que, no contexto dos 6 sistemas aquíferos definidos na ilha de São Miguel, é aquele em que o caudal de recessão das nascentes é mais baixo (mediana= 0.25 L.s^{-1} ; Cruz, 2001a).

As nascentes estudadas correspondem a descargas a partir de aquíferos em altitude, que correspondem a uma série de aquíferos confinados e semiconfinados, essencialmente constituídos por escoadas lávicas basálticas s.l., e sobrejacentes a níveis de permeabilidade muito reduzida, como por exemplo camadas de cinzas alteradas. Apenas em 29 locais foi possível medir os caudais, que no decurso da amostragem variaram entre 0.01 e 5.37 L.s^{-1} . Como sugerido pelo valor da mediana (0.74 L.s^{-1}), os caudais seguem uma distribuição lognormal, com uma classe modal correspondente aos valores entre 0 e 1.4 L.s^{-1} (Fig. 4).

Os procedimentos de campo consistiram na leitura do pH, temperatura e condutividade eléctrica, e na determinação da alcalinidade e CO_2 dissolvido por titulação. As amostras foram filtradas a $0.45 \mu\text{m}$ e colocadas em frascos de polietileno, sendo o frasco destinado à análise de catiões por espectrometria de absorção atómica, acidificado com ácido nítrico. A determinação do teor em aniões foi feita por cromatografia iónica e o doseamento da SiO_2 pelo método colorimétrico (espectrofotometria). Os erros de balanço têm um valor médio igual a -3.1% .

A amostragem realizada permitiu obter um conjunto de dados referente à composição química da

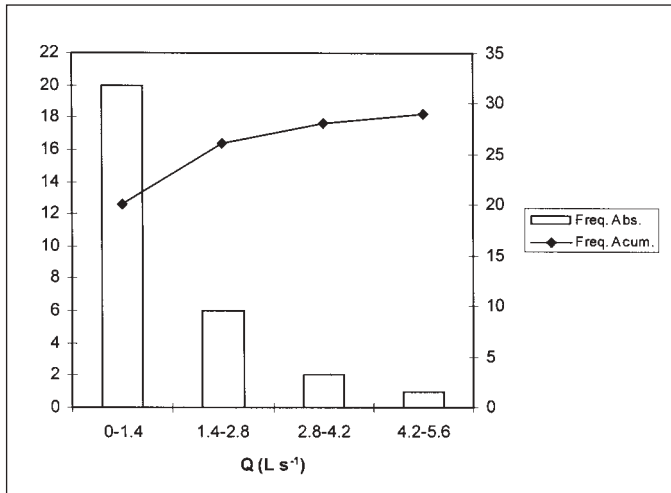


Fig. 4. Histograma relativo aos caudais das nascentes onde se procedeu à amostragem de águas subterrâneas no maciço do Nordeste

Fig. 4. Histogram from the discharge of the sampled springs in the Nordeste massif

água subterrânea descarregada nas nascentes localizadas no maciço do Nordeste, sumariados nas Tabelas 1 e 2.

As amostras recolhidas correspondem a águas frias, com temperaturas de emergência entre 7.9 e 16.6°C, com pH ligeiramente ácido a alcalino, a variar entre 6.17 e 7.96 (mediana=6.87). Os valores de condutividade eléctrica, distribuídos entre 56 e 200 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (mediana=115 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) sugerem que as águas são pouco mineralizadas.

As águas amostradas apresentam durezas totais entre 0.12 e 0.76 $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCO_3 , o que permite classificá-las como águas brandas. A alcalinidade, determinada no campo imediatamente a seguir à amostragem, varia entre 0.18 e 0.72 $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ de Ca CO_3 .

A projecção em diagrama de Piper revela que as fácies predominantes são cloretadas sódicas e bicarbonatadas sódicas. Embora ocorram em grande número termos intermédios aniónicos (Cl-HCO_3 e

$\text{HCO}_3\text{-Cl}$) (Fig. 5). Por seu turno, os termos intermédios catiónicos (Na-Ca e Ca-Na) são menos importantes. A composição química das águas subterrâneas do maciço do Nordeste pode ser expressa em termos relativos, por ordem decrescente de importância, sobre a forma $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ e $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$, respectivamente para catiões e aniões. O Cl^- e o HCO_3^- explicam, respectivamente, 19.1 a 35.5% e 12.3 a 29.8% do conteúdo iónico relativo equivalente, enquanto o Na^+ corresponde a 17.2 a 33.0% da composição iónica relativa equivalente. O diagrama de Schoeller evidencia a grande homogeneidade do conjunto de resultados obtidos (Fig. 6).

Variações em altitude

A Figura 7.a expressa a variação da mineralização da água em função da altitude das emergências amostradas. Neste gráfico é patente um acréscimo da condutividade eléctrica à medida que a cota de implantação das nascentes diminui. A variação em altitude dos teores nos iões mais importantes em solução, Cl^- e Na^+ , revela igualmente um aumento à medida que a cota das nascentes diminui (Fig. 7.b e 7.c). Esta observação, associada à variação em altitude da condutividade eléctrica, sugere um controlo de mineralização pelo acarreo de sais marinhos, dependente de vários factores, como a altitude e distância à linha de costa. Com efeito, o aumento da salinidade da água ao longo das linhas de fluxo, pode resultar do facto de nas zonas de menor altitude, a recarga é mais reduzida, mas mais concentrada em sais e ocorre sobre uma superfície mais extensa (Custodio, 1992). Por outro lado, nas áreas a maior altitude, a recarga é mais intensa mas menos salina. Adicionalmente, nas zonas mais baixas poderá ocorrer ainda um efeito decorrente da maior evapotranspiração.

A relação entre o caudal das nascentes e a altitude não é suficientemente clara, embora, se possa deprender que existe uma ligeira tendência de decréscimo

| | Alt. (m) | Q (Ls ⁻¹) | pH | T (°C) | Cond. ($\mu\text{S cm}^{-1}$) | TDS _c | HCO_3^- | Cl^- | SO_4^{2-} | Na^+ (mg L ⁻¹) | K^+ | Mg^{2+} | Ca^{2+} | SiO_2 |
|---------------|----------|-----------------------|------|--------|---------------------------------|------------------|------------------|---------------|--------------------|-------------------------------------|--------------|------------------|------------------|----------------|
| Máximo | 760 | 5.37 | 7.96 | 16.6 | 200.0 | 128.7 | 43.92 | 36.21 | 7.16 | 19.1 | 12.30 | 3.55 | 11.25 | 37.24 |
| Mínimo | 65 | 0.01 | 6.17 | 7.9 | 56.0 | 33.3 | 10.98 | 11.00 | 1.92 | 5.80 | 0.93 | 0.50 | 1.29 | 8.56 |
| Média | 449 | 1.14 | 6.92 | 13.6 | 125.3 | 86.4 | 29.14 | 20.84 | 4.14 | 13.68 | 4.05 | 1.80 | 4.84 | 27.01 |
| Mediana | 440 | 0.74 | 6.87 | 13.9 | 115.0 | 86.3 | 28.06 | 19.88 | 4.08 | 14.50 | 3.22 | 1.81 | 4.65 | 27.61 |
| Desvio Padrão | 143 | 1.29 | 0.36 | 1.8 | 27.9 | 14.2 | 6.30 | 5.40 | 1.35 | 2.82 | 2.40 | 0.67 | 2.13 | 5.07 |

Tabela 1. Descrição estatística dos resultados analíticos referentes às nascentes amostradas
Table 1. Groundwater chemical data statistics from the sampled springs

| | rCl/rSO_4^{2-} | rNa^+/rK^+ | rNa^+/rCl^- | rNa^+/rMg^{2+} | rCa^{2+}/rMg^{2+} |
|---------------|------------------|--------------|---------------|------------------|---------------------|
| Máximo | 16.0 | 12.4 | 1.6 | 14.8 | 4.6 |
| Mínimo | 3.5 | 1.8 | 0.6 | 1.9 | 0.9 |
| Média | 7.6 | 7.1 | 1.0 | 4.7 | 1.7 |
| Mediana | 6.7 | 7.4 | 1.0 | 3.9 | 1.6 |
| Desvio Padrão | 3.1 | 2.7 | 0.2 | 2.6 | 0.6 |

Tabela 2. Descrição estatística de algumas razões entre espécies dissolvidas
 Table 2. Statistical data for some ratios between dissolved species

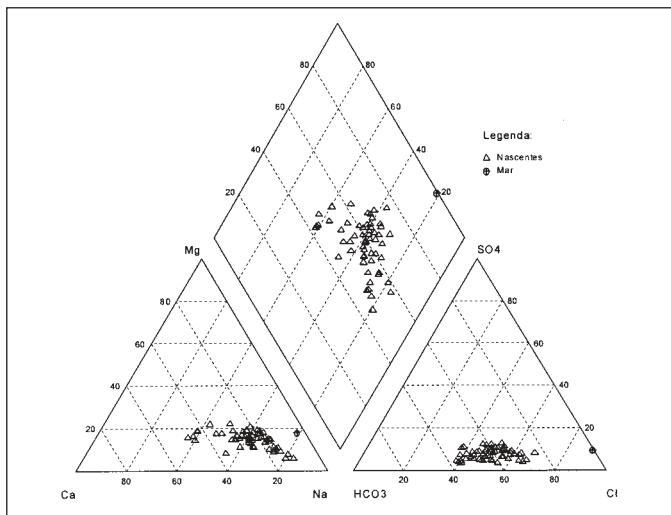


Fig. 5. Diagrama de Piper relativo à composição química das águas amostradas no maciço do Nordeste
 Fig. 5. Chemical composition of the sampled waters represented by means of a Piper diagram

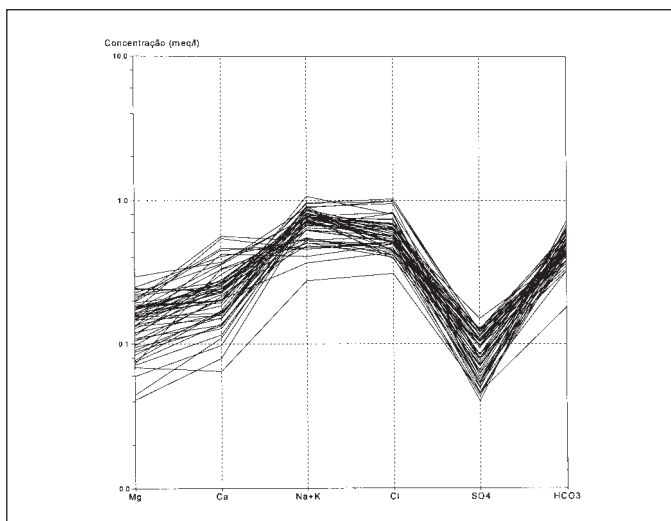


Fig. 6. Diagrama de Schoeller relativo à composição química das águas amostradas, revelando a homogeneidade dos dados
 Fig. 6. Chemical composition of the sampled waters by a Schoeller diagram, revealing the homogeneity of the data set

do volume da descarga nas zonas mais baixas (Fig. 8). Sugere-se que esta tendência seja causada pelo efeito do relevo, que implica por exemplo uma maior recarga em altitude, e uma maior permeabilidade nas zonas de menor cota.

Processos mineralizadores

A variação da condutividade eléctrica e dos teores em Cl^- e Na^+ em função da altitude revela o contributo de sais de origem marinha para a mineralização das águas subterrâneas estudadas. Os efeitos deste processo podem ser inferidos a partir da projecção dos teores de Cl^- , como espécie conservativa, em função da condutividade eléctrica e do conteúdo em Na^+ (Fig. 9.a e 9.b). No primeiro dos gráficos referidos é patente que a mineralização das águas é controlada pelo ião Cl^- (Fig. 9.a), enquanto na segunda projecção verifica-se a existência de uma relação positiva entre o cloreto e sódio (Fig. 9.b). Neste último gráfico verifica-se, ainda, que a maioria das amostras é projectada próximo da recta representativa da relação entre aquelas espécies na água do mar, o que expressa indubitavelmente a contribuição marinha, aliás como se sugeriu a partir das variações em altitude. Com efeito, a composição química da água em ilhas, ou zonas costeiras continentais, é influenciada por sais de origem marinha (Berner e Berner, 1996). Neste contexto, refira-se que a adição de espécies com origem marinha é um dos mais significativos processos mineralizadores da água subterrânea nos Açores (Cruz e Amaral, 2004).

Da projecção Cl^- vs. Na^+ é ainda patente que a maioria das amostras denota um enriquecimento em Na^+ , o que indicia uma adição resultante de processos de interacção água-rocha.

O bicarbonato pode ter origem essencialmente a partir da dissolução do CO_2 no solo, ou a sua concentração pode aumentar como resultado das reacções de dissolução de minerais silicatados. A projecção HCO_3^- vs. condutividade eléctrica das águas, evidencia uma fraca relação positiva entre aquelas variáveis, o que sugere um contributo menor desta espécie para a mineralização (Fig. 10.a). A relação entre o HCO_3^- e o caudal das nascentes sugere um incremento da concentração daquela espécie quando maior for o volume de água da descarga (Fig. 10.b) que, por seu turno, tende a ser mais elevado em altitude. Esta observação é consistente com uma maior dissolução de CO_2 do solo, derivada da maior recarga e da menor diluição por sais de origem marinha.

A contribuição dos processos de dissolução dos minerais silicatados pode ser deduzida da projecção dos teores de HCO_3^- vs. SiO_2 (Fig. 11.a) e HCO_3^- vs. Ca^{2+}

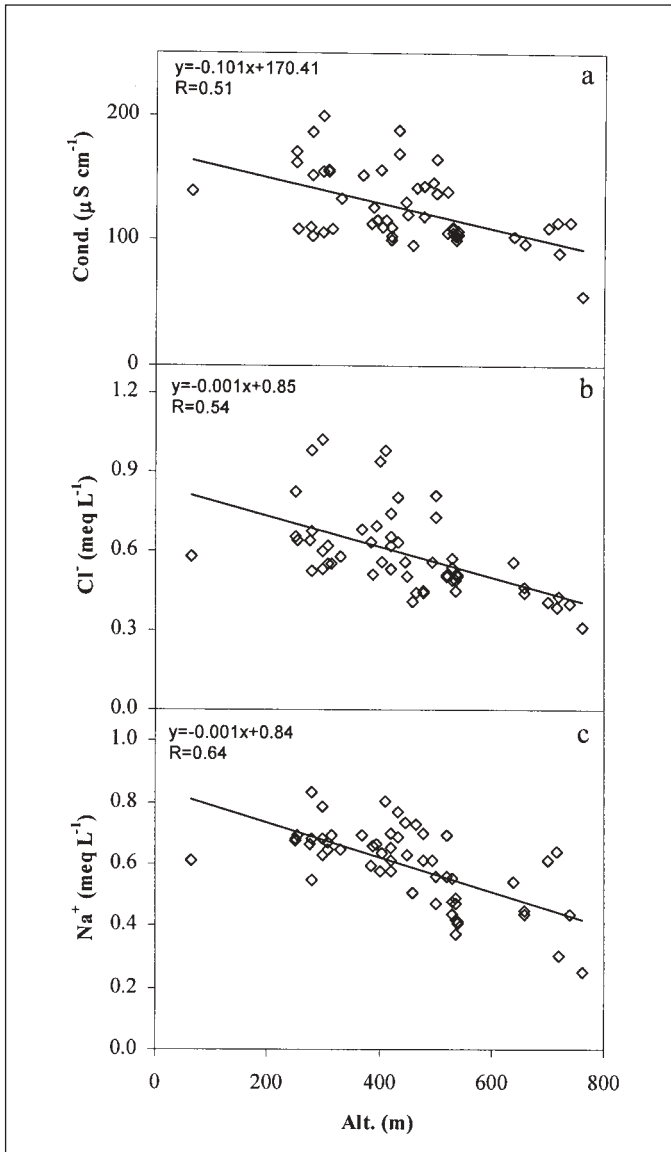


Fig. 7. Variação: (a) da condutividade eléctrica da água amostrada; (b) do teor em Cl; (c) do teor em Na⁺ nas águas, representada em função da altitude de emergência
 Fig. 7. Variation of: (a) electrical conductivity; (b) Cl⁻ content; (c) Na⁺ content in groundwater, plotted according to spring altitude

(Fig. 11.b). Em ambos os gráficos é patente uma relação positiva entre as variáveis projectadas, resultante dos processos de hidrólise dos minerais silicatados que, de acordo com o contexto litológico do maciço vulcânico do Nordeste, correspondem essencialmente a rochas basálticas s.l.

A influência dos dois principais processos mineralizadores referidos pode ser aquilatada da projecção do gráfico Ca²⁺+Mg²⁺ vs. Na⁺+K⁺ (Fig. 12). Neste gráfico verifica-se que algumas amostras são projectadas sobre a recta que mostra a proporção relativa dos

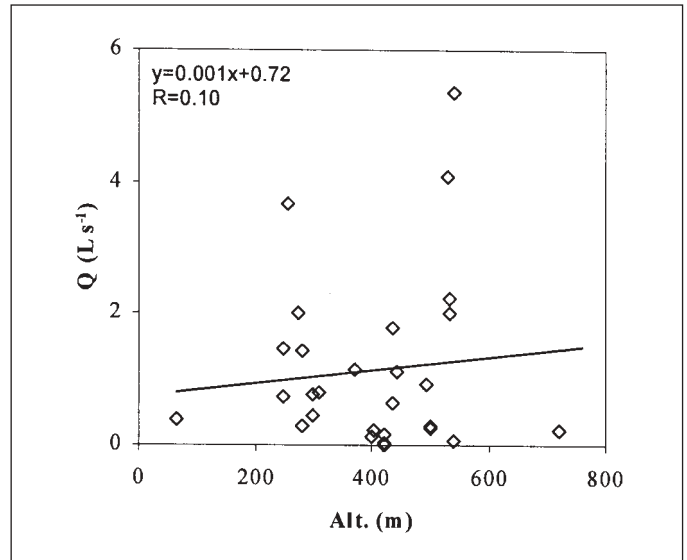


Fig. 8. Variação do caudal das nascentes representada em função da altitude de emergência
 Fig. 8. Variation of the spring discharge plotted according to spring altitude

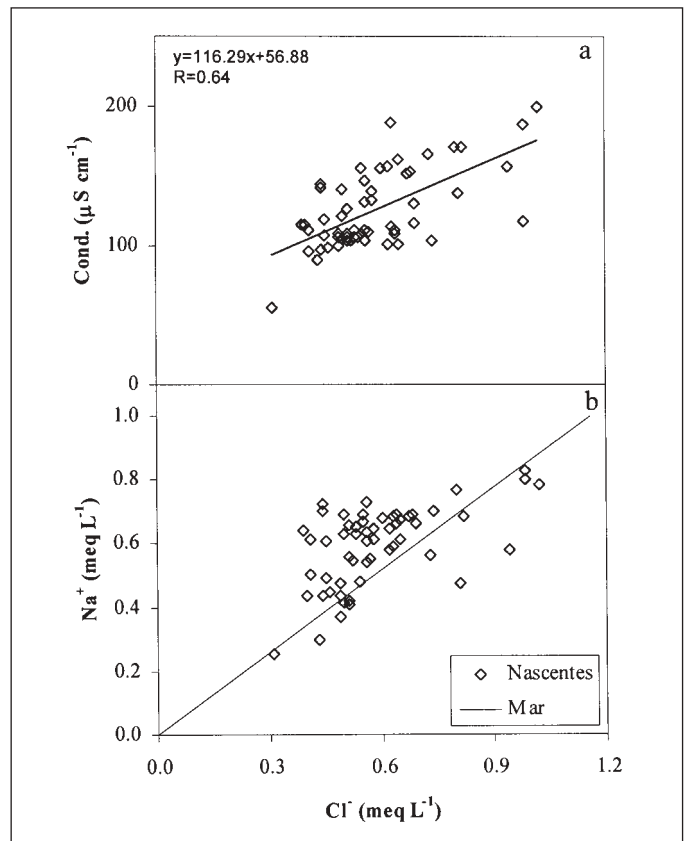


Fig. 9. Relação entre a: (a) condutividade eléctrica; (b) concentração em Na⁺, representada em função do teor em Cl nas águas estudadas
 Fig. 9. Relation between: (a) the electrical conductivity; (b) Na⁺ concentration in groundwater, plotted according to the Cl content

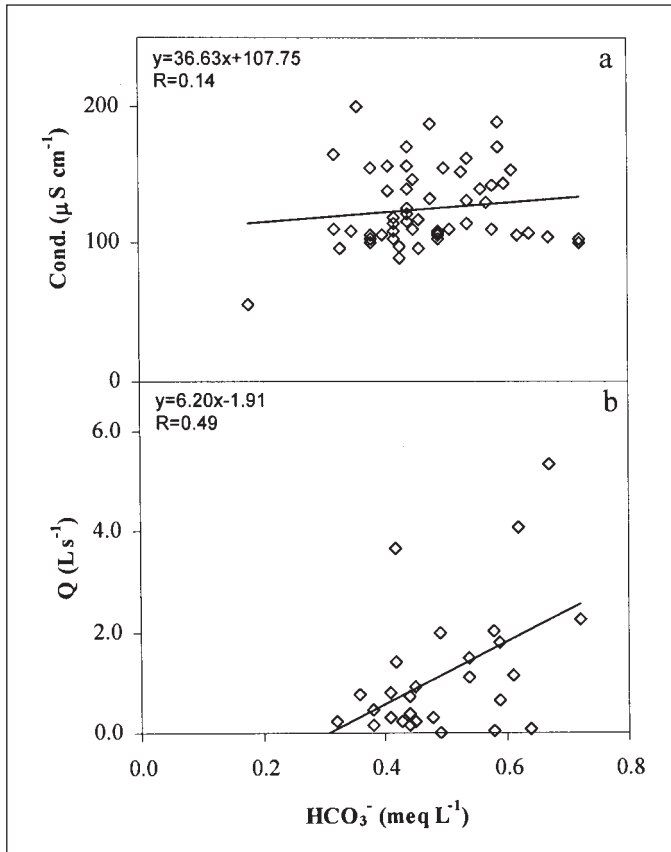


Fig. 10. Relação entre: (a) a condutividade eléctrica; (b) o caudal das nascentes, representada em função do teor em HCO_3^- nas águas estudadas

Fig. 10. Relation between the: (a) electrical conductivity; (b) springs discharge, plotted according to HCO_3^- content in the studied groundwater

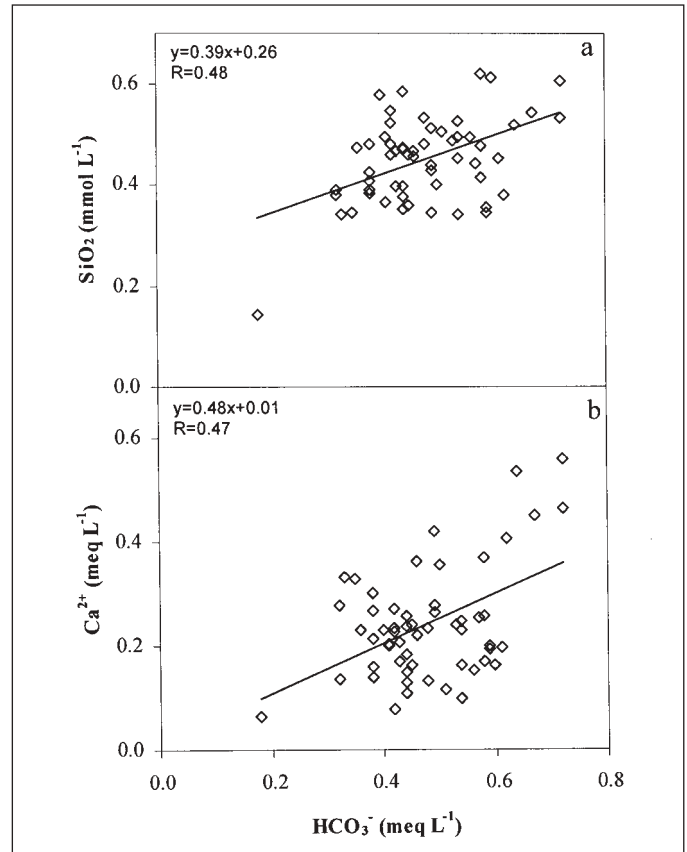


Fig. 11. Relação entre as concentrações de: (a) SiO_2 ; (b) Ca^{2+} , em função do conteúdo em HCO_3^- nas águas estudadas

Fig. 11. Relation between the: (a) SiO_2 ; (b) Ca^{2+} , plotted according to HCO_3^- contents in the studied groundwater

metais alcalinos e alcalino terrosos na água do mar. Contudo, a maioria das amostras cai entre as rectas da água do mar e da igualdade $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$. O enriquecimento em $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, que nalguns casos implica que se verifique a relação $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+$, embora o Mg^{2+} também possa ser resultante da influência marinha, expressa a contribuição da hidrólise de minerais silicatados.

Conclusões

Os recursos hídricos subterrâneos são preponderantes no contexto do abastecimento de água nos Açores. Desta forma, e tomando em linha de conta a importância sócio-económica e ambiental da água subterrânea no arquipélago, a investigação hidrogeológica tem sido incrementada nos últimos anos, proporcionando uma base de informação indispensável à gestão sustentável deste recurso.

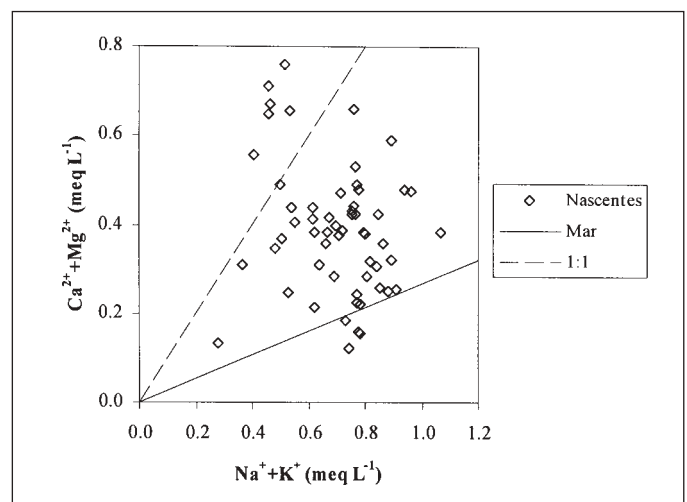


Fig. 12. Relação entre os teores de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ e $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ nas águas estudadas

Fig. 12. Plot of $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ vs. $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ contents in the studied groundwater

O estudo conduzido no Complexo Vulcânico do Nordeste, que domina a extremidade oriental da ilha de São Miguel, incidiu, em particular, sobre a composição química da água subterrânea emergente em 57 nascentes situadas a várias altitudes. Os caudais destas nascentes são, no geral, baixos, distribuídos entre 0.01 e 5.73 L.s⁻¹ (mediana=0.74 L.s⁻¹), com a classe modal correspondente aos valores entre 0 e 1.4 L.s⁻¹.

Os resultados obtidos evidenciam que as águas amostradas são frias (7.9°C<T<16.6°C), com pH ligeiramente ácido a alcalino (6.17<pH<7.96) e de mineralização reduzida, como sugerem os valores de condutividade eléctrica (56-200 µS.cm⁻¹; mediana=115 µS.cm⁻¹). As fácies dominantes são cloretadas sódicas e bicarbonatadas sódicas e a composição relativa das águas pode ser descrita, em ordem decrescente, sobre a forma Na⁺>Ca²⁺>Mg²⁺>K⁺ e Cl⁻>HCO₃⁻>SO₄²⁻, respectivamente para catiões e aniões.

O aumento dos teores em Cl⁻ e Na⁺, assim como o acréscimo da mineralização total, expressa pela condutividade eléctrica, à medida que a altitude de emergência é menor, isto é quanto maior for a proximidade à linha de costa, sugere a influência do acarreio de sais de origem marinha sobre a composição das águas subterrâneas. A projecção dos teores de Na⁺ vs. Cl⁻ próxima da relação típica da água do mar demonstra inequivocamente a hipótese sugerida. A dissolução de minerais silicatados, em rochas de natureza essencialmente basálticas s.l., explica o enriquecimento em metais alcalino terrosos e a relação positiva entre a SiO₂ e HCO₃.

A contribuição da dissolução de minerais silicatados pode ser interpretada a partir da relação entre os metais alcalinos e alcalino-terrosos, em que a maioria das amostras é projectada claramente acima da recta da água do mar e inclusivamente nalguma águas verifica-se a relação Ca²⁺+Mg²⁺>Na⁺+K⁺.

Agradecimientos

Os autores agradecem o apoio disponibilizado pela Câmara Municipal do Nordeste no decurso dos trabalhos de campo. A revisão e os comentários críticos formulados pelo Professor Emilio Custodio muito contribuíram para a presente publicação.

Bibliografia

Abdel-Monem, A.A., Fernández, L.A. e Boone, G.M. 1975. K/Ar ages from the eastern Azores group (Santa Maria, São Miguel and the Formigas islands). *Lithos*, 4, 247-254.

- Agostinho, J. 1938. Clima dos Açores (1º parte). *Açoreana*, 2, 35-65.
- Aiuppa, A., Allard, P., D'Alessandro, W., Michel, A., Parello, F., Treuil, M. e Valenza, M. 2000. Mobility and fluxes of major, minor and trace metals during basalt weathering and groundwater transport at Mt. Etna volcano (Sicily). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 1827-1841.
- Arnórsson, S., Gunnarsson, I., Stéfansson, A., Andrésdóttir, A. e Sveinbjornsdóttir, Á. 2002. Major element chemistry of surface and ground waters in basaltic terrain, N-Iceland. I. Primary mineral saturation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66, 4015-4046.
- Berner, E.K. e Berner, R.A. 1996. *The global water cycle, geochemistry and environment*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 376pp.
- Bettencourt, M.L. 1979. O clima dos Açores como recurso natural, especialmente em agricultura e indústria de turismo. *O Clima de Portugal*, 18, INMG, Lisboa, 103 pp.
- Booth, B., Croasdale, R. e Walker, G.P.L. 1978. A quantitative study of five thousand years of volcanism on São Miguel, Azores. *Philosophical Transactions Royal Society of London*, 288, 271-319.
- Borges, P. 1995. *Contribuição para o conhecimento geológico do litoral sul de São Miguel (Açores)*. Dissertação de Mestrado, University of Azores, Ponta Delgada, Portugal, 168 pp.
- Cruz, J.V. 1997. *Estudo hidrogeológico da ilha do Pico*. PhD Thesis, University of Azores, Ponta Delgada, Portugal, 433 pp.
- Cruz, J.V. 2001a. Recursos subterrâneos; *Plano Regional da Água da Região Autónoma dos Açores*. Relatório Técnico-Científico 03/DGUA/01, Centro de Geologia Ambiental, Univ. Açores, Ponta Delgada, 453 pp.
- Cruz, J.V. 2001b. Salinization of the Basal Aquifer System at Volcanic Islands: Azores Archipelago (Portugal) Case Study. In: Ribeiro, L. (Ed.), *Proceedings 3th International Conference on Future Groundwater Resources at Risk*, CVRM-Geosystems Center, Lisbon, 633-640.
- Cruz, J.V. e Amaral, C. 2004. Major ion chemistry of groundwaters from perched-water bodies at Azores (Portugal) volcanic archipelago. *Applied Geochemistry*, 19 (3), 445-459.
- Cruz, J.V. e França, Z. 2001. Groundwater composition of perched-water bodies at Azores volcanic islands. In: Cidu, R. (Ed.), *Proceedings Tenth International Symposium on Water Rock Interaction*, Vilasimus, Balkema Publishers, Lisse, 481-484.
- Cruz, J.V. e Silva, M.O. 2000. Groundwater salinisation in Pico island (Azores, Portugal): origin and mechanisms. *Environmental Geology*, 39, 1181-1189.
- Cruz, J.V. e Silva, M.O. 2001. *Hydrogeologic framework of the Pico island (Azores, Portugal)*. *Hydrogeology Journal*, 9, 177-189.
- Cruz, J.V., Coutinho, R.M., Carvalho, M.R., Oskarsson, N. e Gislason, S.R. 1999. Chemistry of waters from Furnas volcano, São Miguel, Azores: fluxes of volcanic carbon dioxide and leached material. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 151-167.
- Cruz, J.V., Amaral, C. e Figueiredo, J. 2004a. Água subterrânea no maciço do Nordeste (Açores): I Composição quí-

- mica. In: *Resumos da 4ª Assembleia Luso Espanhola de Geodesia e Geofísica*, Figueira da Foz, 737-738.
- Cruz, J.V., Amaral, C. e Figueiredo, J. 2004b. Água subterrânea no maciço do Nordeste (Açores): II Processos Mineralizadores. In: *Resumos da 4ª Assembleia Luso Espanhola de Geodesia e Geofísica*, Figueira da Foz, 739-740.
- Custodio, E. 1992. Efecto de la aridificación de la recarga en las características hidrogeoquímicas de un acuífero en forma de sector circular. In: *Actas do V Simposio de Hidrogeologia*. Tomo XVI, 355-369.
- DROTRH-INAG. 2001. *Plano Regional da Água. Relatório técnico*. Versão para consulta pública. Rep. DROTRH-INAG, Ponta Delgada, 414 pp.
- Fernández, L.A. 1982. The petrology and geochemistry of the Nordeste Volcanic Complex, S. Miguel, Azores. *Arquipélago*, Série Ciências da Natureza, 3, 145-158.
- Ferreira, D.B. 1980. Contribution à l'étude des ventes et de l'humidité dans les îles centrales de l'archipel des Açores. Centro de Estudos Geográficos, Lisboa, 329 pp.
- Forjaz, V.H. 1984. *S. Miguel volcanostratigraphic sketch*. Dep. Geociências, Univ. Açores, Ponta Delgada, 1pp.
- Gíslason, S., Arnórsson, S. e Ármannsson, Á. 1996. Chemical weathering of basalt in southwest Iceland: effects of runoff, age of rocks and vegetative/glacial cover. *American Journal of Science*, 296, 837-907.
- Gíslason, S. e Eugster, H.P. 1987a. Meteoric water-basalt interactions. I. A laboratory study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 2827-2840.
- Gíslason, S. e Eugster, H.P. 1987b. Meteoric water-basalt interactions. II. A field study in N.E. Iceland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 2841-2855.
- Herrera, Ch. e Custodio, E. 2003. Hipótesis sobre el origen de la salinidad de las aguas subterráneas en la isla de Fuerteventura, Archipiélago de Canarias, España. *Boletín Geológico y Minero*, 144 (4), 433-452.
- Join, J.L., Coudray, J. e Longworth. 1997. Using principal components analysis and Na/Cl ratios to trace groundwater circulation in a volcanic island: the example of Reunion. *Journal of Hydrology*, 190, 1-18.
- Krásny, J. 1993. Classification of transmissivity magnitude and variation. *Ground Water*, 31, 230-236
- LNEC. 1992. *Avaliação das disponibilidades hídricas da ilha de S.Miguel (Açores)*. Relatório LNEC 217/92-NHHF, LNEC, Lisboa, 123 pp.
- Mendonça, J.J.L. 1992. Contribuição para o conhecimento da hidrogeologia do arquipélago dos Açores. *Memórias e Notícias do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra*, 113, 57-74.
- Moore, R.B. 1990. Volcanic geology and eruption frequency, São Miguel, Azores. *Bulletin of Volcanology*, 52, 602-614.
- Moore, R.B. 1991. Geologic map of São Miguel, Azores. U.S. Geol. Surv. Misc. Invest. Ser. Map I-2007, scale 1:50000. U.S. *Geological Survey*, Denver, 1pp.
- Paradela, P.L. 1980. Hidrogeologia geral das ilhas adjacentes. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, 66, 241-256.
- Ricardo, R.P., Madeira, M.A.V., Medina, J.M.B., Marques, M.M. e Sanches, F.A. 1977. Esboço pedológico da ilha de S.Miguel (Açores). *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, 37, 275-385.
- Santos, H. 1988. Aspectos do ordenamento cultural na ilha de S.Miguel-Açores. *Estudos, Experimentação e Divulgação*, 13, Direcção Regional dos Recursos Florestais, Ponta Delgada.
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a national classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55-94.
- Zbyszewski, G., Almeida, F.M., Ferreira, O.V. e Assunção, C.T. 1958. Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000; notícia explicativa da folha "B" da ilha de S. Miguel (Açores). *Serv. Geol. Portugal*, Lisboa, 37 pp.
- Zbyszewski, G., Ferreira, O.V. e Assunção, C.T. 1959. Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000; notícia explicativa da folha "A" da ilha de S. Miguel (Açores). *Serv. Geol. Portugal*, Lisboa, 22 pp.

Recibido: mayo 2004

Aceptado: julio 2004