



# O USO DE TÉCNICAS ISOTÓPICAS NA DISCRIMINAÇÃO DOS PROCESSOS ENVOLVIDOS NA MINERALIZAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA ILHA DE MAIO (CABO VERDE)

contributo para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos

Alberto da Silva LIMA

*Doutor em Hidrogeologia, Centro de Investigação Geológica, Ordenamento e Valorização de Recursos, Departamento de Ciências da Terra, Universidade do Minho, 4710-057 Braga, Portugal, [aslima@dct.uminho.pt](mailto:aslima@dct.uminho.pt)*

## RESUMO

Para além dos processos naturais, a mineralização das águas subterrâneas em ambientes costeiros e insulares pode ser influenciada diretamente pela massa de água oceânica. Este processo está relacionado com o equilíbrio da chamada interface água doce/água salgada que, mesmo em condições naturais, poderá contribuir para a salinização das águas doces continentais.

O presente estudo foi realizado na ilha de Maio (Cabo Verde), uma das quatro ilhas pertencentes ao grupo do sotavento. É uma das mais planas ilhas do Arquipélago, atingindo uma altitude máxima de 436 m no Monte Penoso. Inserida na região Saheliana, a ilha de Maio apresenta um clima do tipo árido, com uma precipitação média anual de 124 mm e uma temperatura média de 24,4 °C.

Os aspectos climáticos da ilha do Maio e as suas características geológicas determinam uma mineralização relativamente elevada das águas subterrâneas, com valores de condutividade eléctrica maioritariamente superiores a 1 mS/cm. Além dos factores antes referidos, a mineralização destas águas parece estar, pelo menos em alguns casos, influenciada pela fraca inclinação da interface água doce/água salgada nas áreas litorais. Não obstante, subsistem dúvidas sobre a intervenção relativa dos diferentes processos na mineralização global das águas subterrâneas. As técnicas isotópicas têm-se revelado uma ferramenta útil na discriminação dos diferentes processos e na identificação do fenómeno de intrusão salina. Desta forma, no presente estudo apresentam-se resultados isotópicos de amostras de águas subterrâneas da ilha de Maio, no sentido de averiguar da existência de situações de salinização resultantes da intrusão das massas de água oceânicas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ilha do Maio, isótopos, águas subterrâneas, intrusão salina.

## 1. INTRODUÇÃO

Os isótopos ambientais têm vindo a afirmar-se como uma técnica de rotina em estudos hidrogeológicos, complementando as abordagens convencionais da hidrogeoquímica e da hidrodinâmica. Os isótopos estáveis da molécula de água têm sido amplamente utilizados neste tipo de estudos, já que a composição isotópica da água é modificada pelos processos meteóricos, conferindo a cada água uma assinatura isotópica característica. Por sua vez, esta assinatura constitui um traçador natural para a identificação da proveniência das águas subterrâneas.

O trabalho cuja síntese aqui se apresenta foi desenvolvido na ilha de Maio do Arquipélago da República de Cabo Verde, o qual é constituído por mais nove ilhas e cinco ilhotas localizadas entre 600 km e 750 km da costa senegalesa.

As disponibilidades hídricas em regiões de climas áridos e semiáridos são extremamente limitadas. Esta situação assume ainda maior relevo em regiões insulares, devido à dificuldade de transferências hídricas. Nestes casos, o fornecimento de água às populações é uma tarefa extremamente delicada, havendo necessidade recorrente de racionalização de recursos.

A gestão de recursos hídricos implica um conhecimento o mais rigoroso possível das disponibilidades hídricas, quer no que respeita às águas superficiais, quer em termos de águas subterrâneas. A incerteza associada às estimativas dos recursos hídricos subterrâneos de uma região requer a adopção de metodologias diversificadas, de modo a produzir valores coerentes, os quais estão na base das estratégias de planeamento. Em terrenos cristalinos, são acrescidas as dificuldades em obter estimativas consensuais que constituam um suporte efetivo da atividade de gestão dos recursos hídricos.

No caso das águas subterrâneas, para além da avaliação das disponibilidades hídricas e de modo a garantir a sustentabilidade dos recursos, é necessário ainda conceptualizar o funcionamento dos sistemas hidrogeológicos, de modo a produzir um suporte em torno do qual se desenvolvem os modelos matemáticos que deverão governar a gestão dos aquíferos.

Na elaboração dos modelos conceptuais intervêm elementos de natureza geológico-estrutural, hidrodinâmica, hidrogeoquímica e geotermométrica (LIMA e OLIVEIRA, 2006). Complementando as abordagens convencionais dos diversos domínios antes referidos, as técnicas isotópicas têm assumido particular interesse, pelo seu importante papel no estudo de alguns processos hidrogeológicos, nomeadamente, a identificação da origem das águas subterrâneas e a definição das áreas de recarga.

Os isótopos ambientais são os isótopos de ocorrência natural, surgindo em quantidades relativamente elevadas no ambiente e estando presentes em sistemas hidrológicos, geológicos e biológicos. Entre eles destacam-se o hidrogénio, o carbono, o azoto, o oxigénio e o enxofre. Tratando-se de elementos leves, a diferença de massa entre os vários isótopos é significativa, o que conduz a um fraccionamento mensurável em vários processos físico-químicos. Os isótopos ambientais são atualmente utilizados, não só na identificação da origem das águas subterrâneas, mas também no estudo dos processos de recarga, nas reações geoquímicas e na cinética dessas reações (CLARK e FRITZ, 1997).

Neste trabalho apresentam-se e discutem-se os resultados de análises isotópicas ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ) efectuadas a amostras de águas subterrâneas da ilha de Maio, em Cabo Verde, visando a discriminação dos processos envolvidos na mineralização dessas águas, nomeadamente a eventual influência direta da água do mar nas zonas costeiras. A aridez climática que caracteriza esta ilha proporciona escassos recursos hídricos, tanto superficiais como subterrâneos. A exploração das águas subterrâneas, feita essencialmente nas zonas litorais, conduz a situações de rompimento do equilíbrio

da interface água doce/água salgada, desencadeando o fenómeno de intrusão salina, que parece assumir proporções significativas sobretudo no sector norte da ilha. A identificação dos mecanismos mineralizadores das águas subterrâneas permitirá elaborar planos de exploração sustentáveis e adoptar estratégias de controlo da intrusão salina.

## 2. A ILHA DE MAIO

### 2.1 Localização

O Arquipélago de Cabo Verde fica localizado na margem Oriental do Atlântico Norte, a cerca de 450 km da Costa Ocidental da África e a cerca de 1400 km a SSW das ilhas Canárias (**Figura 1**) É limitado pelos paralelos 17° 13' (Ponta Cais dos Fortes, Ilha de St° Antão) e 14° 48' de latitude Norte (Ponta de Nho Martinho, Ilha Brava) e pelos meridianos de 22° 42' de longitude Oeste de Greenwich (ilhéu Baluarte, Ilha da Boa Vista) e 25° 22' (Ponta Chã de Mangrado, Ilha de St° Antão).

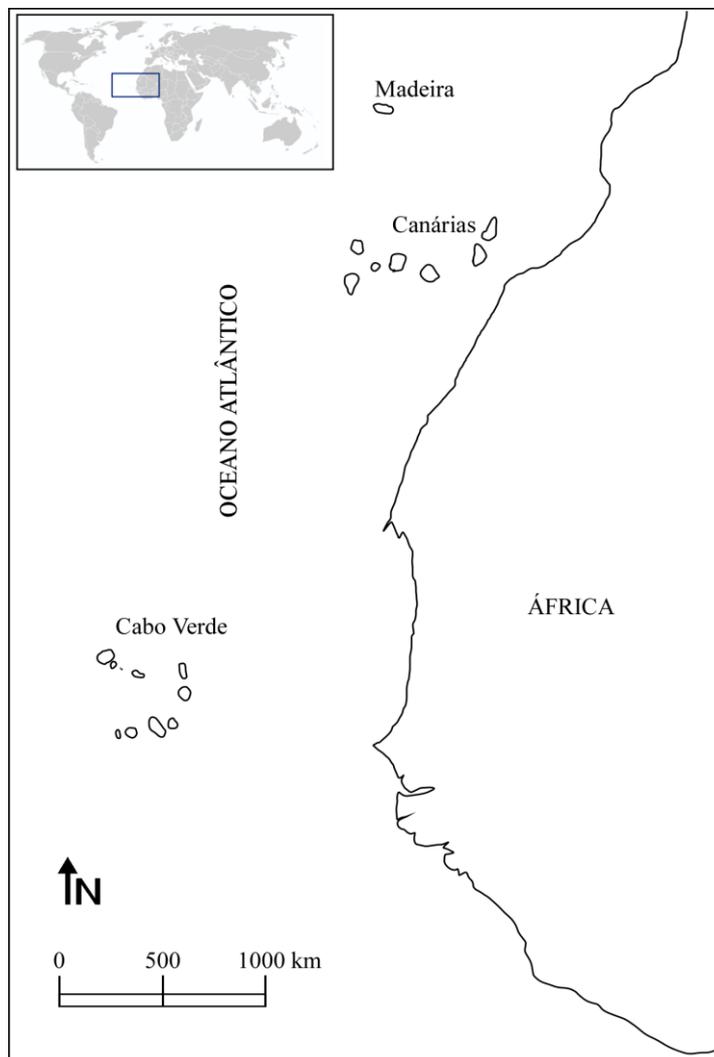


Figura 1- Localização geográfica do Arquipélago de Cabo Verde.

O arquipélago de Cabo Verde é constituído por 15 ilhas e ilhéus distribuídos em forma de ferradura com abertura para ocidente. Em função dos ventos dominantes (os alísios do nordeste) é usual dividir o arquipélago de Cabo Verde em dois grupos: (i) Barlavento e (ii) Sotavento. O primeiro é constituído pelas ilhas de Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia, São Nicolau, Sal e Boa Vista. O grupo do Sotavento inclui, para além da ilha de Maio, as ilhas de Santiago, Fogo e Brava (**Figura 2**).

A Ilha de Maio situa-se a sul da ilha de Boa Vista, a 25 km a este de Santiago e desenvolve-se entre os paralelos 15° 7' e 15° 20' de latitude norte e entre os meridianos 23° 5' e 23° 15' de longitude oeste, com um comprimento máximo de 24100 m entre a ponta de Cais do Norte, a norte, e a ponta Jampala, a sul, e uma largura máxima de 16300 m, entre a ponta Banconi, a este, e a ponta dos Flamengos, a oeste, sendo a superfície total de 269 km<sup>2</sup> (BEBIANO, 1932). O vértice geodésico do Monte Penoso assinala o ponto mais elevado da ilha onde se atinge uma altitude de 436 m.

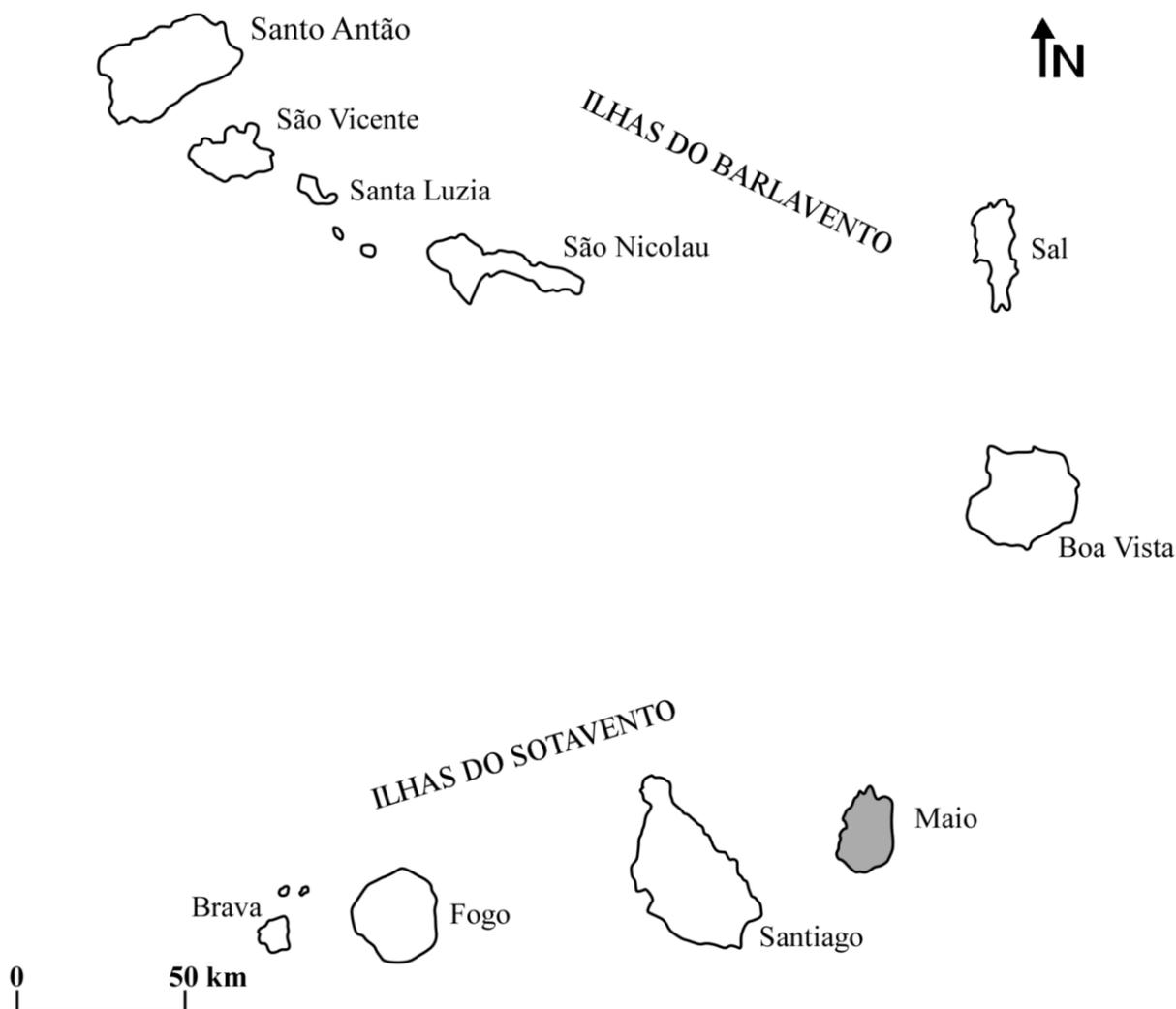


Figura 2 - Distribuição das ilhas e dos ilhéus que compõem o arquipélago de Cabo Verde, destacando-se a ilha de Maio.

A população da ilha de Maio tende a concentrar-se nas regiões litorais, onde desenvolve a sua principal atividade, que é a pesca. Para além desta atividade socioeconómica, a população da ilha do Maio dedica-se essencialmente à agricultura, embora a escassez de água e a sua salinização tenham levado ao abandono de muitos terrenos agrícolas.

## 2.2 Clima

Do ponto de vista climático, o Arquipélago de Cabo Verde fica situado numa vasta zona de clima árido e semi-árido, que atravessa a África desde o Atlântico ao Mar Vermelho e se prolonga pela Ásia. Esta faixa extensa fica compreendida entre os centros de altas pressões subtropicais do Atlântico Norte e a linha de Convergência Intertropical, no seio dos ventos alísios (AMARAL, 1964).

O clima de Cabo Verde está fortemente condicionado pela sua localização no Sahel. A região Saheliana corresponde a uma faixa de transição entre o deserto do Sahara a norte e as savanas sudanesas a sul. Os climas desta zona são caracterizados por uma longa estação seca, intercalada por apenas um período de três meses húmidos, durante os quais as chuvas se concentram em alguns dias. Com relativa frequência ocorrem períodos de seca que podem durar vários anos (Semedo, 2004). Assim, à semelhança dos outros países sahelianos, Cabo Verde manifesta duas estações distintas: estação seca, de Dezembro a Junho e estação húmida, de Agosto a Outubro. Os meses de Julho e Novembro consideram-se de transição. O arquipélago, por vezes, é invadido por rajadas de vento quente e seco (Harmatão), proveniente do deserto de Sahara, quando o anticiclone dos Açores se desloca mais a leste. Este vento sopra por poucas horas ou prolonga-se por vários dias. Apesar do percurso marítimo de algumas centenas de quilómetros, chega às ilhas ainda quente e seco. Para além do Harmatão, o clima cabo-verdiano é condicionado por mais dois tipos de ventos, de origem e características diferentes: o Alísio do nordeste e a Monção do Atlântico Sul (AMARAL, 1964).

Em síntese, o clima de Cabo Verde apresenta três correntes aéreas principais: (i) uma soprando de NE que, embatendo nas ilhas de maior altitude, toma um movimento ascensional significativo e afecta, pela sua humidade e frescura, os solos e a vegetação para cima de uma determinada cota. Nestas condições, as vertentes expostas ao quadrante nordeste são as mais beneficiadas por esta corrente; (ii) outra, vinda de E, seca e normalmente quente, aumenta a aridez da estação seca, sobretudo nas exposições de leste e nas ilhas orientais; (iii) a última, vinda de S e SW, húmida, é responsável pelas chuvas de Verão (TEIXEIRA e BARBOSA, 1958).

As precipitações no arquipélago são na generalidade fracas, com valores médios que não ultrapassam 300 mm para as zonas situadas abaixo de 400 m de altitude e 700 mm para as zonas situadas a mais de 500 m de altitude e expostas aos ventos alísios (INGRH, 2000). Contudo, as ilhas mais aplanadas podem registar precipitações anuais inferiores a 250 mm, sendo portanto enquadráveis no clima árido. A precipitação média anual na ilha de Maio é de 125,4 mm, mas apresenta uma elevada variabilidade interanual, ocorrendo anos secos e muito secos com bastante frequência. De um modo geral, a precipitação está concentrada nos meses de Agosto, Setembro e Outubro; pelo contrário, no período de Dezembro a Junho, a precipitação é praticamente nula. Os meses de Julho e Novembro registam alguma precipitação, podendo ser considerados meses de transição (GARCIA, 2010).

A temperatura média da ilha de Maio varia entre 22,4 °C, nos meses de Fevereiro e Março, e 27,4 °C no mês de Setembro. A temperatura mínima foi registada no mês de Março (15,7 °C) e a máxima de 32,2 °C no mês de Outubro.

Da integração dos valores médios de precipitação e temperatura mensais, verifica-se que a temperatura máxima é registada no mês de Setembro, que é também o mês de maior precipitação. Nestas condições, quase todo o ano é considerado período seco, com exceção do mês de Setembro. A evapotranspiração potencial é de 1564,8 mm, o que limita a evapotranspiração efetiva ao valor da precipitação. No entanto, não é esta situação que ocorre, uma vez que os eventos pluviosos estão muito concentrados no tempo.

Considerando os valores médios dos parâmetros climáticos antes referidos, o clima da ilha de Maio pode ser classificado, no sistema de Köppen, como um clima do tipo *BWh*, ou seja, um clima seco, árido, com uma temperatura média anual superior a 18 °C (STRAHLER e STRAHLER, 1989).

### 2.3 Geologia e Geomorfologia

De acordo com BEBIANO (1932), as várias erupções vulcânicas que deram origem às ilhas de Cabo Verde tiveram início no fundo do oceano e, em alguns casos, os produtos vulcânicos levaram até à superfície fragmentos da litosfera. As ilhas de Sal, Boa Vista e Maio são consideradas as mais antigas, pelo que, estas ilhas não possuem actualmente qualquer vestígio das crateras principais.

Segundo BURKE e WILSON (1972), a génese das ilhas está associada a um mecanismo do tipo *hotspot*. Do mesmo modo, CROUGH (1978) considera que o Arquipélago é o resultado de um *hotspot* desenvolvido a partir de plumas mantélicas. Mais recentemente, ALI *et al.* (2003) e PIM *et al.* (2008) consideram que o mecanismo de *hotspot* não consegue explicar completamente a origem destas ilhas. Segundo estes autores, processos magmáticos profundos, nomeadamente o levantamento dinâmico, seriam os responsáveis pela formação das ilhas do Arquipélago.

O modelo de STILLMAN *et al.* (1982) prevê que a formação da ilha do Maio tenha ocorrido sobre ou nas proximidades da crista média oceânica, sendo as rochas da Formação do Monte Batalha as mais antigas da ilha (Jurássico Superior). No final do Jurássico o vulcanismo submarino cessou, tendo-se iniciado a sedimentação que veio a dar origem à sedimentação de calcários pelágicos da Formação do Morro. Durante esta deposição, o fundo oceânico não recebeu quantidades significativas de sedimentos terrestres e manteve-se tectonicamente estável. No final do Cretácico inferior (Albiano) reiniciou-se o vulcanismo, tendo a ilha emergido, expondo o edifício vulcânico aos fenómenos de erosão. Esta emergência está também associada ao levantamento decorrente da instalação de plutões, provavelmente alimentados por uma fonte local de magma. Esta intrusão não pode ser anterior ao Aptiano. Apesar da deposição ter continuado até ao Cretácico superior, não são conhecidos sedimentos Paleogénicos na ilha do Maio, devido provavelmente à erosão e/ou à ausência de deposição. No Neogénico foi retomada a atividade vulcânica, dando origem à Formação de Casas Velhas (ancaramitos), que veio a ser erodida, dando origem à Formação do Pedro Vaz (conglomerados). O vulcanismo Neogénico subsequente teve lugar em, pelo menos, duas fases. A primeira originou a Formação de Pedra Malhada e a segunda deu origem à Formação do Monte Penoso. A partir de então, a ilha tem sido erodida, parcialmente aplanada e recoberta por diversas gerações de depósitos Quaternários.

De acordo com FARIA (1987), a geomorfologia da ilha de Maio caracteriza-se essencialmente pela existência de muitas planuras, principalmente nas partes norte e ocidental. Essas planuras são estruturalmente de dois tipos diferentes. Umas são chamadas de planuras ou achadas do litoral e as outras, chamadas planuras ou achadas do interior, encontram-se no interior da ilha. A regularidade das

planuras do interior é muito inferior à das planuras do litoral, porque as primeiras foram originadas pela ação fluvial, enquanto as segundas resultaram de erosão marinha.

Segundo BEBIANO (1932), o maciço central é o elemento orográfico dominante da ilha de Maio. Dele ergue-se uma série de montes situados entre as aldeias do Morro, Pilão Cão e Pedro Vaz. Na parte norte, entre as aldeias de Santo António e Cascabulho, encontram-se montes separados por planuras do interior. Os relevos constituem ramos, formando uma cordilheira ligada ao monte Penoso, o mais alto da ilha, com 436 m de altitude. Linhas de água desenvolvidas e ramificadas partem deste maciço central e de outras elevações, mas possuem água apenas na época das chuvas.

Em duas planuras litorais evidenciam-se extensas zonas de terrenos salgados, onde o mar penetra, alimentando regularmente as salinas.

As depressões resultam essencialmente da ação da chuva e do vento. Entre o Monte Forte e duas pequenas elevações (Monte Esgrovere e Monte Caliça) situa-se a maior depressão da ilha. Trata-se da Ribeira da Lagoa, resultante da erosão pluvial. Existem ainda pequenas depressões, como a Ribeira de Pai Joana, Ribeira das Casas Velhas, Ribeira do Morro, Ribeira Preta e outras. Os vales são pouco profundos, em nítido contraste com as ilhas montanhosas.

## **2.4 Hidrogeologia**

BURGEAP (1974) apresenta um esquema hidrogeológico geral para o Arquipélago de Cabo Verde constituído por três grandes unidades: (i) unidade de base, (ii) unidade intermédia e (iii) unidade recente.

A Unidade de Base é constituída pelas formações mais antigas como é o caso do Complexo Eruptivo Interno Antigo (Ante – Miocénico Médio), da formação de mantos basálticos submarinos antigos (Miocénico Médio) e a Formação Conglomerático-Brechóide (Miocénico Médio). Estas formações apresentam globalmente uma permeabilidade reduzida, devido essencialmente ao elevado grau de alteração, que contribui também para a diminuição da capacidade de infiltração. Como tal, de um modo geral, esta unidade de base funciona essencialmente como uma barreira hidrogeológica, podendo o seu topo corresponder à base dos aquíferos sobrejacentes. No entanto, as formações da série de base podem apresentar características aquíferas. Aliás, na ilha de Maio, o Complexo Eruptivo Interno Antigo desempenha um papel hidrogeológico importante, por se encontrar bastante fracturado e pouco alterado (BURGEAP, 1974).

As águas desta unidade são geralmente muito mineralizadas, devido, pelo menos em parte, à baixa permeabilidade das formações que as constituem, o que favorece o fenómeno da interação água/rocha.

A Unidade Intermédia, essencialmente constituída pelo Complexo Eruptivo Principal (Miocénico – Pliocénico), caracteriza-se por ser a formação mais espessa e mais extensa na generalidade das ilhas de Cabo Verde. Estas características, aliadas à elevada capacidade de armazenamento e à permeabilidade reduzida, tornam esta unidade o principal aquífero do Arquipélago. Além disso, a recarga desta unidade é favorecida por dois processos. O primeiro prende-se com o facto de estas formações constituírem os principais relevos das diferentes ilhas, onde a precipitação é maior. O segundo aspecto está relacionado com a elevada permeabilidade das formações sobrejacentes, as quais, não tendo capacidade de reter água, cedem-na às formações subjacentes, ou seja, as que constituem a unidade intermédia.

A mineralização das águas associadas a esta unidade é muito inferior à da unidade de base (BURGEAP, 1974).

A Unidade Recente é constituída por material piroclástico basáltico e derrames associados, com alto grau de permeabilidade e de porosidade relativamente elevada em relação às outras formações

geológicas. Fazem parte desta unidade, a formação de cones vulcânicos (Pliocénico-Quaternário) e as formações sedimentares recentes. Trata-se de uma unidade altamente permeável, privilegiando desta forma a infiltração. No entanto, como se referiu anteriormente, não permite a retenção da água, o que faz com que a mesma seja drenada para níveis inferiores.

À semelhança da unidade intermédia, também as águas da unidade recente são muito pouco mineralizadas (BURGEAP, 1974).

A série vulcânica antiga da ilha de Maio apresenta-se bastante fracturada e pouco alterada, o que lhe confere uma importância hidrogeológica acrescida. Além disso, a ilha de Maio é também a única que apresenta formações anteriores ao Complexo Eruptivo Interno Antigo. Por estas razões, apesar da exiguidade da precipitação, esta ilha apresenta peculiaridades hidrogeológicas que lhe conferem um estatuto privilegiado no contexto da hidrogeologia do Arquipélago de Cabo Verde.

Todas as formações geológicas da ilha de Maio são relativamente permeáveis, apresentando potenciais de produtividade que podem ultrapassar uma centena de metros cúbicos por dia. No entanto, é necessário considerar dois domínios distintos: o domínio sul e Este e o domínio noroeste. O primeiro, de menor permeabilidade, apresenta gradiente hidráulico elevado, limitando a invasão marinha às zonas baixas das principais ribeiras. O domínio noroeste, mais permeável, apresenta gradientes hidráulicos pouco acentuados, favorecendo a intrusão salina (BURGEAP, 1974).

### 3. METODOLOGIA

São numerosos os pontos de água existentes na ilha de Maio. A maioria é constituída por poços, mas existem também alguns furos e poucas nascentes. No entanto, uma boa parte destes pontos de água encontra-se atualmente seca, sobretudo as nascentes e os poços.

No âmbito do presente estudo, foram seleccionados 18 pontos de água, localizados nas coordenadas indicadas no Quadro 1. De realçar que a maioria dos pontos de água seleccionados corresponde a poços escavados, cujas profundidades variam entre 6 m e 15 m. A largura destes poços é muito variável, podendo mesmo ultrapassar uma dezena de metros. Alguns encontram-se revestidos, mas outros estão desprovidos de qualquer revestimento. Muitos destes poços não têm qualquer cobertura, pelo que estão expostos às condições atmosféricas. Entre os pontos seleccionados contam-se ainda três furos e um charco, estando este último completamente exposto aos fenómenos atmosféricos. Além disso, este ponto é utilizado para a abeberação dos animais, encontrando-se bastante conspurcado. Esta situação tem grandes repercussões no conteúdo isotópico da água, alterando a assinatura isotópica da água proveniente do meio subterrâneo.

Do ponto de vista isotópico, para além da temperatura, variáveis como a altitude (Z) e a distância ao litoral condicionam o fracionamento isotópico e podem explicar a variabilidade espacial dos teores isotópicos nas águas de origem meteórica. Por isso, no Quadro 1 estão incluídas estas duas variáveis.

Quadro 1 -Pontos de água incluídos neste estudo. Referenciação UTM, WGS 84.

Ponto de água	Tipo	E (m)	N (m)	Z (m)	Distância ao litoral (km)
Mp1	Poço	266882	1684139	75	4.98
Mp2	Poço	267231	1683886	84	5.42
Mp3	Poço	273067	1689170	35	0.78
Mp4	Poço	268662	1674483	20	1.36
Mp5	Poço	265321	1675945	40	3.05
Mp6	Poço	268673	1678126	58	4.42
Mp7	Poço	268593	1678086	58	4.49

Mp8	Poço	271937	1675508	14	0.68
Mp9	Poço	270371	1678159	58	3.71
Mp10	Furo	273117	1682020	52	2.07
Mp11	Poço	272566	1686916	39	1.9
Mp12	Furo	272176	1686908	49	2.26
Mp13	Poço	272523	1689882	36	1.49
Mp14	Poço	269776	1691974	30	1.68
Mp15	Furo	261683	1679979	33	1.56
Mp16	Poço	261939	1679931	38	1.8
Mp17	Charco	265801	1679972	126	5.75
Mp18	Poço	264597	1676485	62	2.99

Em cada um dos pontos referidos no Quadro 1 foram efectuadas colheitas de amostras para análises físico-químicas e isotópicas. As análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório de Águas do Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho e no *Activation Laboratories* (Ontário, Canadá). Por sua vez, as determinações isotópicas ( $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ ) foram efectuadas pelo *Environmental Isotope Laboratory* do Departamento de Geociências da Universidade do Arizona (EUA). A precisão analítica é de 0,08‰, para o  $\delta^{18}\text{O}$ , e 0,9‰, para o  $\delta^2\text{H}$ .

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 2 apresentam-se os resultados das determinações dos isótopos estáveis de hidrogénio e oxigénio das amostras de águas subterrâneas incluídas neste estudo.

No que respeita ao oxigénio, os teores variam entre -5,11‰ VSMOW (MP8) e -1,06‰VSMOW (MP17). Em relação ao deutério, os valores estão compreendidos entre -36,0‰VSMOW (MP2) e -14,7‰ VSMOW (MP17). Exceptuando os teores relativos à amostra MP17, o conteúdo isotópico das águas subterrâneas da ilha de Maio é semelhante ao das águas subterrâneas da ilha de Santiago (LIMA *et al.*, 2009), refletindo a semelhança das condições climáticas das duas ilhas. Os teores da amostra MP17 são anómalos em termos regionais. Tal situação deverá estar relacionada com as condições específicas deste ponto de água, que favorecem a evaporação e, portanto, o fraccionamento isotópico, com o conseqüente enriquecimento em isótopos pesados.

À semelhança do oxigénio, também os teores de deutério são semelhantes nas duas ilhas. De facto, excluindo a amostra MP17 (pelos motivos referidos), os teores das restantes amostras da ilha de Maio são inferiores a -25,8‰ VSMOW, enquanto na ilha de Santiago o limite superior é de -23,0‰ VSMOW.

Quadro 2 –Resultados das análises isotópicas.

Amostra	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW)	$\delta^2\text{H}$ (‰ VSMOW)
Mp1	-5.10	-34.7
Mp2	-5.09	-36.0
Mp3	-4.18	-27.0
Mp4	-3.51	-25.8
Mp5	-3.70	-29.4
Mp6	-4.89	-34.2
Mp7	-5.10	-33.9
Mp8	-5.11	-34.2

Mp9	-4.98	-32.9
Mp10	-5.09	-35.7
Mp11	-5.02	-33.4
Mp12	-4.40	-30.8
Mp13	-3.23	-26.1
Mp14	-4.33	-30.7
Mp15	-4.92	-32.4
Mp16	-4.40	-31.2
Mp17	-1.06	-14.7
Mp18	-4.16	-30.3

De um modo geral (exceptuando o ponto MP17), os teores isotópicos encontrados nas águas subterrâneas da ilha de Maio enquadram-se na distribuição global da composição isotópica da precipitação regional (ROZANSKI *et al.*, 1993). Não obstante, observam-se teores mais leves em algumas amostras, que não podem ser explicados pela evaporação das águas de infiltração, já que este processo teria como consequência o aumento relativo de isótopos pesados. Como tal, a precipitação atmosférica sobre a ilha de Maio deverá possuir teores isotópicos mais leves que os referidos por ROZANSKI *et al.* (1993). Do mesmo modo, a eventual mistura com água do mar, decorrente de intrusão salina, também não pode explicar os baixos teores isotópicos, já que o efeito seria contrário.

Na Figura 3 mostra-se a distribuição espacial dos pontos de água amostrados, bem como os teores isotópicos de oxigénio. Aparentemente, não se observa qualquer tendência espacial na distribuição dos teores isotópicos, sobressaindo, no entanto o teor de  $-1.06\text{‰}$  VSMOW, do ponto MP17. Este valor foi antes justificado.

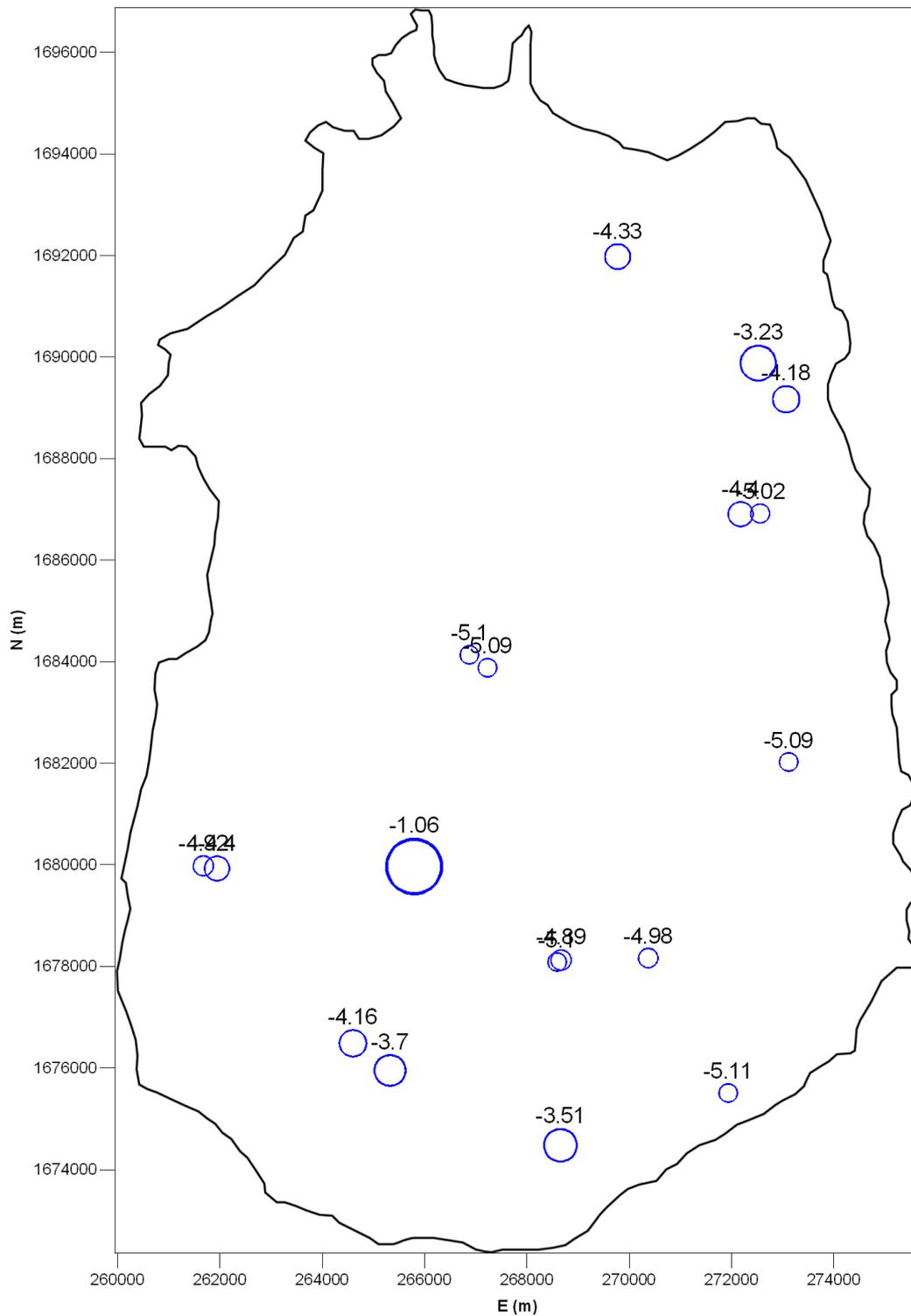


Figura 3 – Localização dos pontos de água incluídos neste estudo e teores isotópicos de oxigénio (‰ VSMOW).

A Figura 4 mostra a distribuição espacial dos teores de deutério. À semelhança do oxigénio, o padrão espacial dos teores de deutério parece aleatório. A amostra MP17 destaca-se, uma vez mais,

por se mostrar enriquecido em isótopo pesado (-14,7‰ VSMOW). No entanto, descortina-se um paralelismo entre os teores do dois isótopos (oxigénio e deutério).

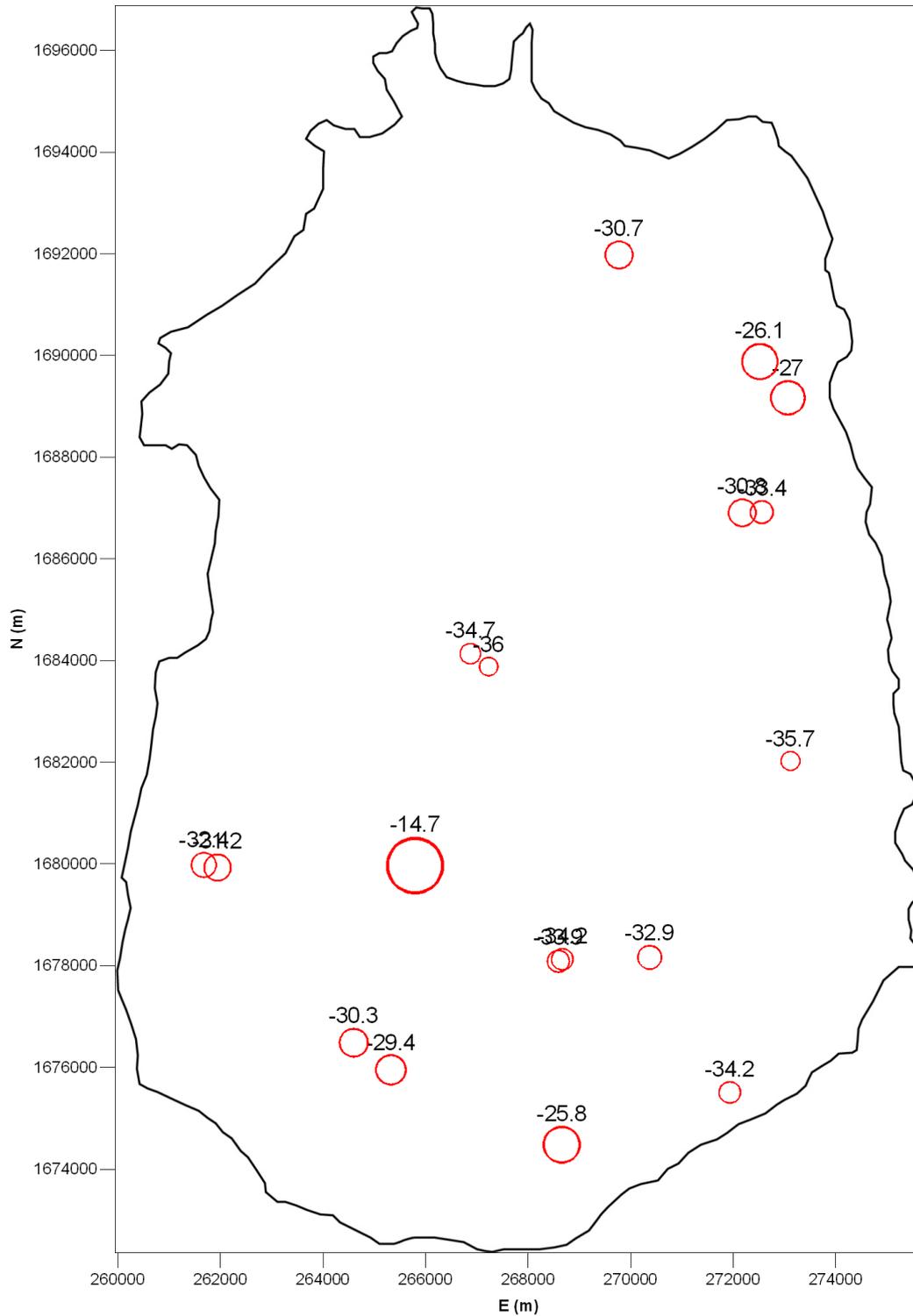


Figura 4 – Localização dos pontos de água incluídos neste estudo e teores isotópicos de deutério (‰ VSMOW).

A relação entre os teores de oxigénio e de deutério nas águas subterrâneas analisadas está ilustrada no diagrama de dispersão da Figura 5. A recta de regressão de mínimos quadrados apresenta coeficiente angular e ordenada na origem inferiores aos da recta meteórica global (RMG). LIMA *et al.* (2009) haviam já notado situação análoga nas águas subterrâneas da ilha de Santiago. Nestas, a recta de regressão apresenta a equação  $\delta^2\text{H} = 6,19 \delta^{18}\text{O} - 0,77$ , tendo, por isso, inclinação e ordenada na origem superiores às da recta da ilha de Maio. Neste caso, trata-se provavelmente de uma recta de evaporação, até porque a amostra MP17 surge perfeitamente inserida na tendência descrita pelas restantes amostras. Atendendo à tipologia da maioria dos pontos de águas amostrados (poços de grande diâmetro sem cobertura) e às características climáticas da ilha de Maio, não surpreende que a água das captações esteja constantemente sujeita a evaporação. No entanto, nas captações tipo furo não é razoável admitir evaporação, pelo que o enriquecimento em isótopos pesados deverá estar relacionado com outro factor. Tal é o caso do ponto de água MP12, que possui um teor de  $\delta^{18}\text{O}$  de  $-3,23\text{‰}$  VSMOW e um teor de  $\delta^2\text{H}$  de  $-26,1\text{‰}$  SMOW. Nesta situação, a explicação deverá estar relacionada com a mistura entre água doce e água do mar, cujo teor isotópico é aproximadamente  $0\text{‰}$  VSMOW, tanto para o oxigénio como para o deutério.

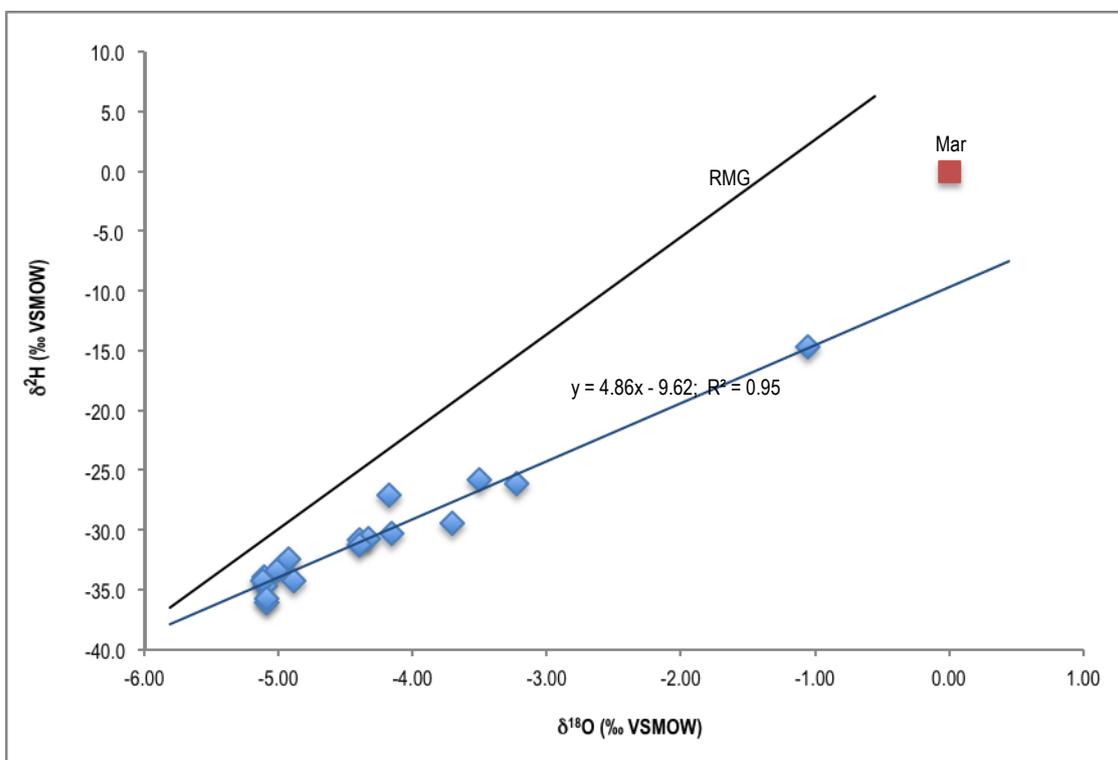


Figura 5 – Diagrama de dispersão dos teores de  $\delta^{18}\text{O}$  e de  $\delta^2\text{H}$  das amostras estudadas (RMG – recta meteórica global).

A composição isotópica do Oceano Atlântico ao largo do Arquipélago de Cabo Verde afasta-se um pouco do valor teórico acima referido, como mostraram LIMA *et al.* (2009), a partir de amostras colhidas ao largo da ilha de Santiago. Segundo estes autores, estas águas apresentam um enriquecimento em isótopos pesados, o qual deverá estar relacionado com o fraccionamento isotópico associado à evaporação da água do mar, já que as amostras foram colhidas na parte mais superficial, isto é, na camada diretamente envolvida no processo de evaporação. A situação descrita não constitui uma exceção, já que a própria água do mar não apresenta os mesmos teores isotópicos nas diferentes

massas oceânicas. Por exemplo, o Mar Mediterrâneo e o Mar Vermelho estão enriquecidos em isótopos pesados relativamente ao padrão VSMOW, verificando-se o mesmo no Atlântico Norte, mas com menor expressão. Acresce que na parte superficial das massas de água oceânica podem ocorrer grandes variações na composição isotópica relativamente às águas oceânicas profundas (ROZANSKI *et al.*, 2000). Estes factos fazem com que as águas oceânicas superficiais ao largo do Arquipélago de Cabo Verde se encontrem enriquecidas em isótopos pesados e esse fenómeno está dependente da taxa de evaporação e, portanto, da temperatura.

O conteúdo isotópico médio da água da parte superficial do Oceano Atlântico é de 0,77‰ VSMOW para o  $\delta^{18}\text{O}$  e de 3,05‰ VSMOW, para o  $\delta^2\text{H}$  (LIMA *et al.*, 2009).

Considerando o teor isotópico da água subterrânea da ilha de Maio mais empobrecida em isótopos pesados, pode criar-se uma recta de mistura de água doce com a água do oceano (Figura 6).

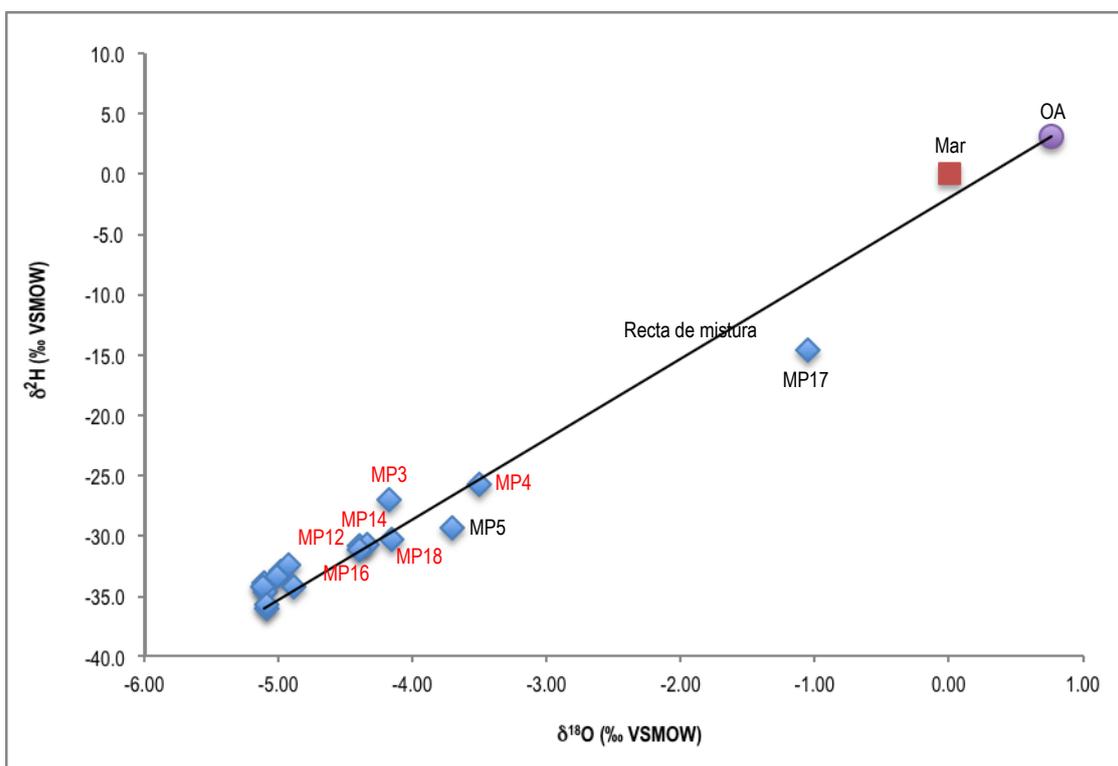


Figura 6 – Diagrama de dispersão dos teores de  $\delta^{18}\text{O}$  e de  $\delta^2\text{H}$  das amostras de águas subterrâneas da ilha de Maio (OA – ponto representativo da composição isotópica da camada superficial do Oceano Atlântico ao largo do Arquipélago de Cabo Verde).

Como se observa na Figura 6, os teores isotópicos da maioria das amostras projetam-se sobre ou muito próximo da recta de mistura, sugerindo que a variabilidade isotópica das águas subterrâneas pode estar relacionada com a mistura de água doce com água oceânica, ou seja, com o fenómeno de intrusão salina. Dir-se-ia que, apenas a amostra MP17 e, provavelmente, a amostra MP5 revelam o efeito de evaporação. As restantes poderiam estar sob a influência da água oceânica. Contudo, deste grupo é necessário excluir as amostras empobrecidas em isótopos pesados, ou seja, aquelas que possuem teores de  $\delta^{18}\text{O}$  à volta de -5‰ VSMOW. Assim, considera-se que as águas subterrâneas associadas aos pontos MP3, MP4, MP12, MP14, MP16 e MP18 estão, em maior ou menor grau, sob a influência da água oceânica e, portanto, sujeitas, de forma mais ou menos significativa, ao fenómeno de intrusão salina. No entanto, não se observa correlação significativa entre os teores isotópicos

destas amostras e os valores de condutividade eléctrica ou as concentrações de ião cloreto. Não obstante, GARCIA (2010) coloca já a hipótese de algumas águas subterrâneas da ilha de Maio estarem sob a influência da água oceânica, nomeadamente as amostras MP4 e MP12.

A possibilidade de mistura entre água doce e água salgada nas amostras antes referidas é apoiada pela dependência dos teores em  $\delta^2\text{H}$  em relação à distância à linha de costa. A Figura 7 mostra um empobrecimento em isótopos pesados à medida que aumenta a distância ao litoral, o que pode ser devido à diminuição da influência da água oceânica. Tal significa que a aproximação à linha de costa traduz-se num enriquecimento em isótopo pesado, como consequência do maior grau de mistura entre os dois tipos de água.

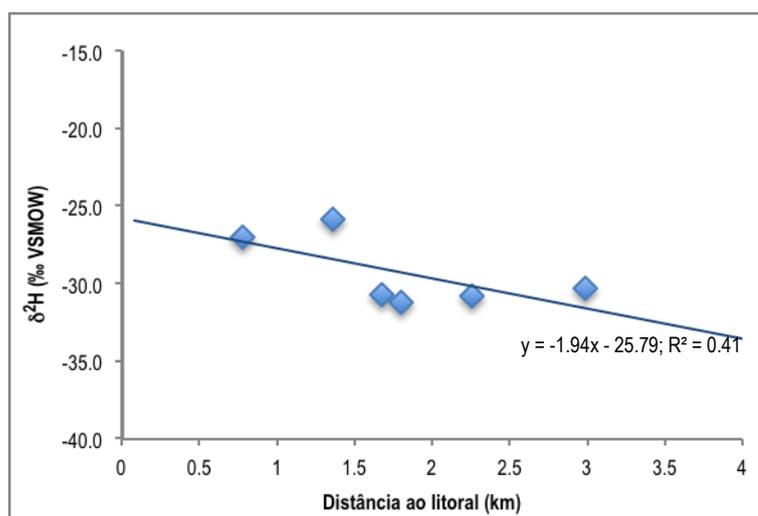


Figura 7 – Variação dos teores em  $\delta^2\text{H}$  em função da distância ao litoral, nas amostras provavelmente sob a influência da intrusão salina.

Em função do exposto, pode dizer-se que a variabilidade isotópica das águas subterrâneas da ilha de Maio pode ser explicada pelos fenómenos de evaporação e mistura com a água oceânica. Factores de fraccionamento usualmente reconhecidos nas assinaturas das águas subterrâneas, como o efeito de altitude, não foram identificados na situação em estudo. Uma explicação relaciona-se com a geomorfologia da ilha, que se caracteriza por grandes planuras ou achadas.

## 5. CONCLUSÕES

A mineralização das águas subterrâneas da ilha de Maio (Cabo Verde) está relacionada com diversos processos, ainda não totalmente explicados. A salinidade das águas atinge, em certos casos, valores dificilmente explicáveis apenas à luz dos fenómenos normalmente invocados, como a interação água/rocha. Tratando-se de uma ilha plana, com um clima árido, a intrusão salina constitui um potencial de contaminação das águas subterrâneas não negligenciável, cuja ação não está devidamente estudada. São fortes os indícios de salinização, particularmente no sector norte da ilha e em locais de baixa altitude, próximos do litoral.

A aplicação de técnicas isotópicas na discriminação dos processos envolvidos na mineralização das águas subterrâneas deu um contributo, sobretudo ao nível da interação água doce/água salgada, tendo-se identificado possíveis fenómenos de mistura entre os dois tipos de água. No entanto, a técnica utilizada não permitiu, de forma inequívoca, estabelecer dependências entre a mineralização das águas subterrâneas e a intrusão salina. Nestas condições, propõe-se uma abordagem integrada do fenómeno, incluindo os domínios da hidrogeoquímica convencional e isotópica e da hidrodinâmica.

### **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito das atividades do Centro de Investigação Geológica, Ordenamento e Valorização de Recursos da Universidade do Minho, apoiadas pelo programa plurianual da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, financiado por verbas da União Europeia (Fundos Estruturais – FEDER) e do Orçamento Geral do Estado.

O autor agradece a colaboração do grupo de trabalho do Doutor Alberto Mota Gomes na colheita das amostras de água. Agradecimentos especiais são devidos à Dr.<sup>a</sup> Elizandra Garcia e ao Sr. Carlos Dias, Delegado do Ministro do Ambiente, do Desenvolvimento Rural e dos Recursos Marinhos na ilha de Maio.

### **BIBLIOGRAFIA**

- ALI, M. Y., WATTS, A. B.; HILL, I. (2003). A Seismic Reflection Profile Study of Lithospheric Flexure in the Vicinity of the Cape Verde Island. *J. Geophys. Res.*, **108** (B5), 2239, doi: 10.1029/2002JB002155.
- AMARAL, I. (1964). *Santiago de Cabo Verde.- A Terra e os Homens*. Junta de Investigação do Ultramar, Lisboa, 1964, pp. 78-145.
- BEBIANO, J. B. (1932). *A Geologia do Arquipélago de Cabo Verde*. Oficina Gráfica, Lda., Lisboa, 275 pp.
- BURGEAP (1974). *La mise en valeur des aux souterraines dans l'archipel du Cap Vert*. Ministério da Coordenação Interterritorial, Brigada de Águas Subterrâneas de Cabo Verde, 290 pp.
- BURKE, K.; WILSON, J.T. (1972). Is the African Plate Stationary?, *Nature*, **239**, pp. 387-390.
- CLARK, I.; FRITZ, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, New York, 328 pp.
- CROUGH, S. T. (1978). Thermal origin of mid-plate hot-spot swells. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **55**, 2, pp. 451-469.
- FARIA, F. X. (1987) – *Os solos da ilha do Maio*. Instituto de Investigação Científica Tropical, Lisboa, 87 pp.
- GARCIA, E. O. (2010). *Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Ilha do Maio (Cabo Verde): o Contributo das Águas Subterrâneas*. Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Braga, 140 pp.
- INGRH (2000) - *Visão Nacional sobre a Água, a Vida e o Ambiente no Horizonte*. Instituto Nacional de Gestão Integrada dos Recursos Hídricos, Praia.

- LIMA, A. S.; OLIVEIRA, A. C. V. (2006). Conceptualização de Modelos Hidrogeológicos em Águas Sulfúreas. *In Actas do II Fórum Ibérico de Águas Engarrafadas e Termalismo: o Valor Acrescentado das Ciências da Terra no Termalismo e no Engarrafamento de Água*, pp. 71-84.
- LIMA, A. S.; PINA, A. P. S. A.; BORGES, A. P. B. (2009). O papel da hidrogeoquímica isotópica na gestão dos recursos hídricos subterrâneos da ilha de Santiago, Cabo Verde. *In 1º Simpósio Nacional dos Recursos Hídricos de Cabo Verde*, Cidade da Praia, Cabo Verde, 16 e 17 de Julho. 21 pp. Publicação em CD-ROM.
- PIM, J.; PEIRCE, C.; WATTS, A. B.; GREVEMEYER, I.; KRABBENHOEFT, A. (2008). Crustal Structure and Origin of the Cape Verde Rise. *Earth and Planetary Science Letters*, **272**, pp. 422-428.
- ROZANSKI, K. ; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L. ; GONFIANTINI, R. (1993). Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. *In: Climate Change in Continental Isotopic Records* (P. K. Swart, K. C. Lohman, J. Mckenzie and S. Savin, Eds.), American Geophysical Union, Geophysical Monograph, **78**, pp. 1-36.
- ROZANSKI, K.; FROELICH, K.; MOOK, W. G. (2000). *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications. Volume III: Surface Water*. UNESCO/IAEA, Paris/Vienna, 118 pp.
- SEMEDO, J. M. (2004). *O Parque Natural da ilha do Fogo, Cabo Verde – Subsídios para a sua gestão e seu desenvolvimento*. Dissertação de mestrado, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Fundacion Universitaria Iberoamericana, España/Brasil, 160 pp.
- STILLMAN, C. J.; FURNES, H.; LESBAS, M. J.; ROBERTSON A. H. F.; ZEILONKA J. - (1982). The Geological History of Maio, Cape Verde Islands. *Journal of the Geological Society*, **139**, 3, pp. 347-361.
- STRAHLER A. N.; STRAHLER A. H. (1989). *Geografia Física*. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, 550 pp.
- TEIXEIRA, A. J. S; BARBOSA, L. A. G (1958). *A Agricultura do Arquipélago de Cabo Verde*, Junta da Investigação do Ultramar, Lisboa, 177 pp.