

DISPONIBILIDADES HÍDRICAS DA ILHA DA MADEIRA

S. Prada*, A. Perestrelo**, M. Sequeira***, A. Nunes****, C. Figueira***** e J.V. Cruz*****

*Departamento de Biologia e Centro de Estudos da Macaronésia da Universidade da Madeira, Campus Universitário da Penteada, 9000-390 Funchal, +351 291705380, fax: +351 291705399; e-mail: susana@uma.pt

**Investimentos e Gestão da Água S.A. e Centro de Estudos da Macaronésia da Universidade da Madeira, Rua dos Ferreiros 148-150, 9000-082 Funchal, +351 291201020; e-mail: alexandra@iga.pt

***Departamento de Biologia e Centro de Estudos da Macaronésia da Universidade da Madeira, Campus Universitário da Penteada, 9000-390 Funchal, +351 291705380, fax: +351 291705399; e-mail: sequeira@uma.pt

****Centro de Estudos da Macaronésia da Universidade da Madeira, Campus Universitário da Penteada, 9000-390 Funchal, +351 291705380, fax: +351 291705399; e-mail: ana_nunes@portugalmail.com

*****Centro de Estudos da Macaronésia da Universidade da Madeira, Campus Universitário da Penteada, 9000-390 Funchal, +351 291705380, fax: +351 291705399 Portugal; +351 291705380, fax: +351 291705399; e-mail: celso_figueira@hotmail.com

*****Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, Rua Mãe de Deus, 9501-801, Ponta Delgada, +296 653141, fax: +296 653141, e-mail: jvc@notes.uac.pt

Resumo

Os recursos hídricos subterrâneos constituem a principal fonte de abastecimento na Madeira, ilha com cerca de 240 500 habitantes. A captação faz-se através de galerias, túneis, furos e do aproveitamento de nascentes. O volume anual de recursos subterrâneos consumido no abastecimento público, indústria, rega e produção de energia é de 185 000 000 m³. A recarga ocorre predominantemente nas zonas altas e planas da ilha. A parcela de recarga proveniente da chuva não é suficiente para manter as condições observadas no aquífero de base, sendo a recarga complementada por água proveniente dos nevoeiros retida pela vegetação. O modelo que melhor traduz a variação da precipitação com a altitude é uma regressão quadrática. O escoamento ocorrido na rede hidrográfica é consequência directa da precipitação mas também das reservas subterrâneas e do escoamento hipodérmico. O modelo hidrogeológico proposto para a ilha prevê a existência de aquíferos suspensos em altitude, relacionados com níveis impermeáveis; um aquífero de base com características distintas em função dos complexos vulcânicos; e aquíferos compartimentados por filões subverticais que atravessam intensamente o edifício vulcânico.

Palavras-Chave: Ilha da Madeira, precipitação, escoamento, modelo hidrogeológico, hidrogeoquímica, recursos subterrâneos.

Abstract

Madeira is the largest island of the Madeira archipelago, with an area of 737 km². The island was generated during Miocene times until 6000-7000 years B. P. Groundwater resources are the main source of water supply for the 240 500 inhabitants of Madeira island. Groundwater exploitation is made by means of water galleries, tunnels, wells and springs, corresponding to a total volume of groundwater of 185x10⁶ m³ by year for domestic and industrial use, as well as for irrigation and electrical power production purposes. Recharge volume due to rainfall is not sufficient to maintain the actual balance between recharge and discharge at the basal aquifer, suggesting the fog contribution to recharge.

Madeira island hydrogeological conceptual model includes the following domains:

-Basal groundwater: occurs after a certain depth. Is formed by geological units of the main and ancient volcanic complexes.

-Dike impounded groundwater: In the central part of the island, sub-vertical dikes that produce the lateral impoundment of the aquifer.

-Perched groundwater: It occurs in high parts of the island in relation to low permeability levels.

Key-words: Madeira island, precipitation, surface runoff, hydrogeological model, hydrogeochemistry, groundwater resources.

Introdução

Situada na região oriental do oceano Atlântico, entre os meridianos 16°39' e 17°16' W e os paralelos 32°38' e 32°52' N a ilha da Madeira ergue-se acima de uma vasta planície submarina, no seio da placa Africana, numa zona onde a crosta oceânica tem 130 Ma, formando um maciço vulcânico com cerca de 5.5 Km de altura, do qual, apenas 1/3 se encontra emerso.

A Madeira é um exemplo de magmatismo oceânico intraplaca (7% do magmatismo actual), consensualmente considerada um “hot-spot” (ponto quente) cuja actividade vulcânica que teve início antes do Miocénico superior, há mais de 5,2 Ma FERREIRA *et al.* (1988), tendo-se prolongado até há cerca de 6 000 anos GELDMACHER *et al.* (2000). A ilha cresceu pela acumulação de materiais vulcânicos, quer explosivos, quer efusivos, tendo formado um relevo complexo que acabou por emergir. As lavas aflorantes na ilha da Madeira podem considerar-se membros de uma série alcalina apresentando um espectro composicional que se estende dos basaltos até aos traquitos, mas onde há um nítido predomínio dos termos máficos (basaniticos e basaltos alcalinos).

Actualmente com 737 km² de superfície, 58 km de comprimento, por 23 km de largura, e uma altitude máxima de 1861 m, o Pico Ruivo, a ilha constitui um enorme contraforte de orientação E-W, recortado por profundos vales. O aspecto geral, actual, da ilha vista do mar, apesar do seu relevo contrastante e dos vales profundamente incisos, é o de um escudo achatado, dissecado pela erosão vertical, cujos bordos teriam sido quebrados pela erosão das vagas.

Quase toda a linha de costa da ilha da Madeira, com 153 km de perímetro, é uma sucessão de arribas abruptas, que atingem, no Cabo Girão, a altura máxima de 580 m. A sua imponência, verticalidade e continuidade é maior a norte que a sul, como resultado de diferentes dinâmicas hidráulicas, consequentes da predominância setentrional dos rumos eólicos.

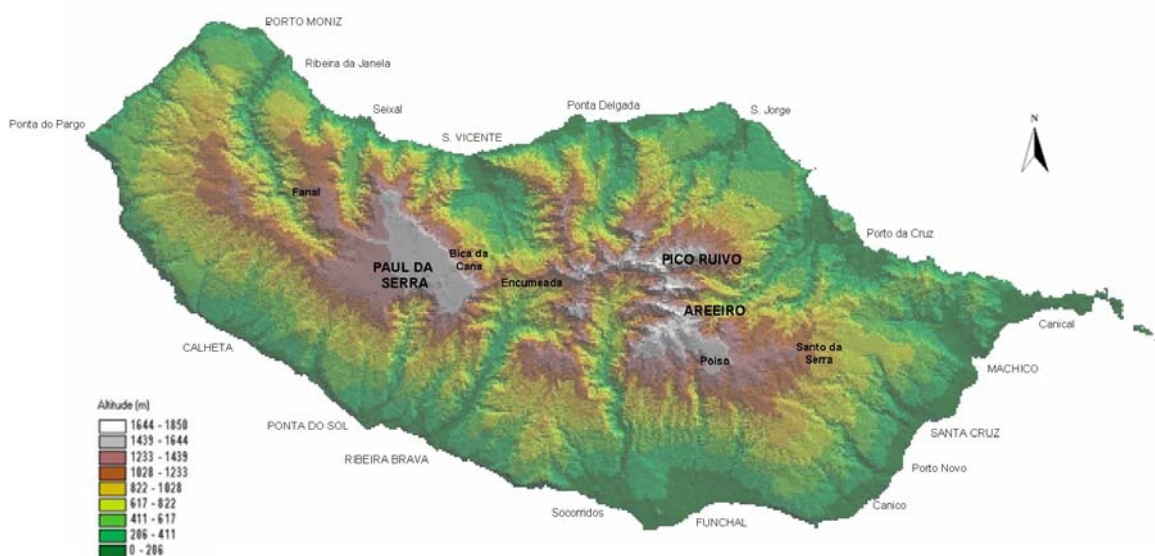


Figura 1 – Relevo da ilha da Madeira.

Ao contrário do vulcanismo que se encontra apenas adormecido, a Madeira parece ser, do ponto de vista sísmico, inactiva. A sismicidade registada, uma vez que a ilha se encontra no interior da placa Africana, deve-se apenas a efeitos secundários de sismos ocorridos nos Açores e em Portugal continental, centrados na falha Açores-Gibraltar.

De acordo com o levantamento vulcano-estratigráfico mais recente da ilha da Madeira (Prada & Serralheiro, 2000) é possível individualizar as seguintes 7 unidades geológicas principais, formadas desde o Miocénico superior até à actualidade:

- COMPLEXO VULCÂNICO ANTIGO (CA)
- CALCÁRIOS MARINHOS DOS LAMEIROS - S. VICENTE (CM)
- DEPÓSITO CONGLOMERÁTICO-BRECHÓIDE (CB)
- COMPLEXO VULCÂNICO PRINCIPAL (CP)
- COMPLEXO VULCÂNICO S. ROQUE/PAUL (SRP)
- EPISÓDIOS VULCÂNICOS RECENTES (VR)
- DEPÓSITOS DE VERTENTE (dv), FAJÃS (fj), QUEBRADAS (q), DEPÓSITOS DE ENXURRADA RECENTES (dr), AREIAS DE PRAIA (ap), DUNAS FÓSSEIS (df), TERRAÇOS (t), E ALUVIÕES (a)

Águas Subterrâneas

Numa altura em que a evolução do planeta e as profundas modificações climáticas parecem tender para a acentuação da desertificação, a água torna-se um bem cada vez mais escasso, tendo vindo a aumentar as preocupações universais, quer em relação à sua quantidade, quer à sua qualidade. Essas preocupações são ainda mais pertinentes, quando estão em causa ambientes insulares, onde, pelo seu peculiar enquadramento físico, se verifica uma fragilidade ambiental superior à dos continentes. Na Madeira, os recursos hídricos subterrâneos constituem a principal fonte de abastecimento de água (superior a 90%), sendo, por ora, suficientes para garantir as necessidades de consumo apesar de as disponibilidades não se distribuírem uniformemente no espaço e no tempo.

Variação espacial e temporal da Precipitação

Apesar de insuficiente para explicar a totalidade da variabilidade espacial da precipitação, a altitude é o primeiro parâmetro a considerar. Assim, verifica-se, para a globalidade da ilha da Madeira, um aumento da precipitação com o acréscimo da altitude, de natureza não linear, ou seja, nas cotas mais baixas, até aos 600m, a um aumento de altitude corresponde um rápido aumento da precipitação, que se torna cada vez mais lento entre as cotas 600 e 1600m, com tendência para estabilizar a partir dos 1 600m. A precipitação depende, ainda, da orientação das vertentes, sendo em regra superior na vertente norte do que na sul, para a mesma cota.

As maiores precipitações ocorrem na Bica da Cana, a 1 560m de altitude, com um máximo de 2966,5 mm/ano, decrescendo acima desta cota. Nas terras baixas da encosta sul da ilha, como o Funchal e o Lugar de Baixo, registam-se os valores mais baixos de precipitação anual, 513 mm e 583 mm, respectivamente.

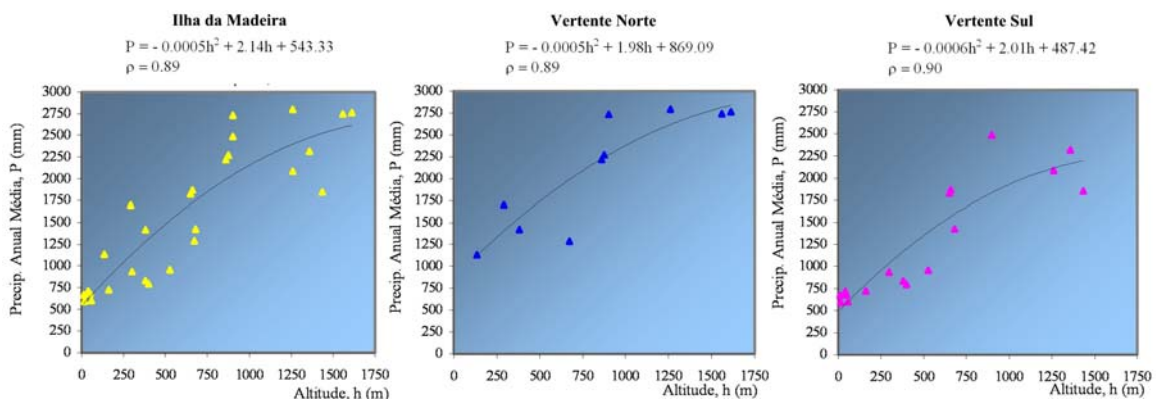


Figura 2 – Relações entre a precipitação anual média e a altitude estabelecidas considerando todos os postos da ilha e separadamente os postos localizados nas vertentes norte e sul.

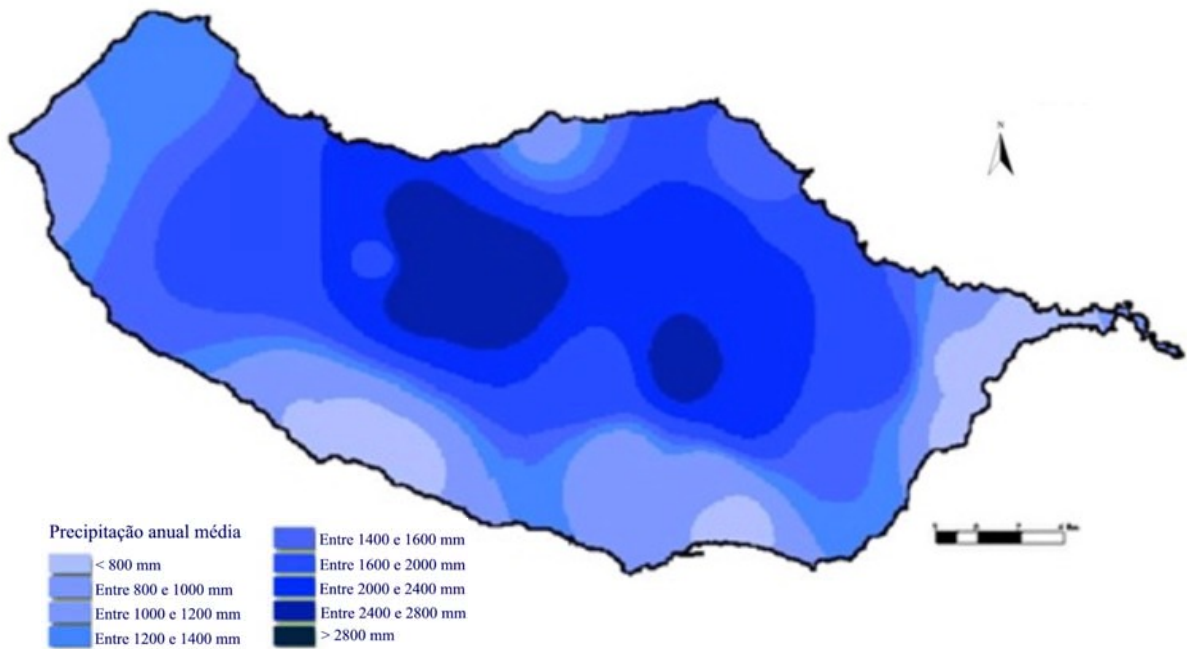


Figura 3 – Mapa de isoietas anuais médias na ilha da Madeira, GASPARGASPAR e PORTELA (2002).

A figura 3 mostra claramente o efeito da altitude na não uniformidade espacial da precipitação, sendo visíveis duas zonas com máximos de precipitação bem demarcados associadas, do lado oeste da ilha, à área do planalto do Paul da Serra, e do lado leste, à zona dos Picos do Areeiro e Ruivo.

Quanto à variação temporal da precipitação esta ocorre durante todo o ano, sendo mais intensa nos meses de Outubro a Abril, correspondendo o período menos chuvoso ao de Junho a Agosto.

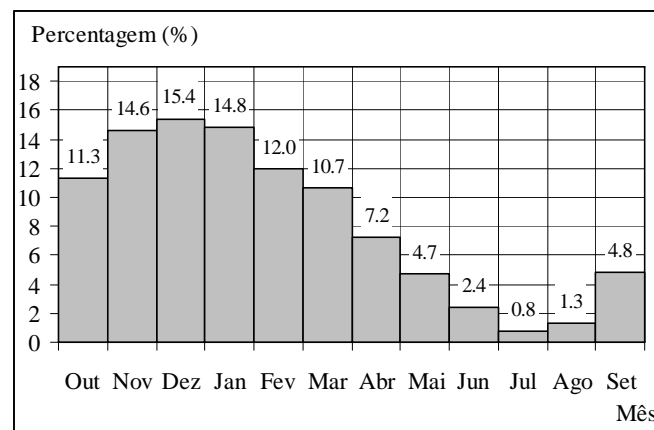


Figura 4 – Precipitações médias mensais na ilha da Madeira expressas em percentagem da precipitação anual média, GASPARGASPAR e PORTELA (2002).

Avaliação do Escoamento Superficial

A avaliação das disponibilidades hídricas superficiais na ilha da Madeira apresenta acentuada dificuldade e considerável incerteza em virtude da reconhecida escassez de dados hidrológicos, muito em especial dos referentes a escoamentos em que o número de pontos de medição e a dimensão dos períodos de registos são nitidamente insuficientes.

Tal escassez é tanto mais pertinente quanto existem factores adicionais, designadamente relacionados com a rede de levadas e com a circulação subterrânea, que interferem de modo significativo e complexo com as manifestações superficiais do escoamento e que, conseqüentemente, dificultam a interpretação dos processos ocorrentes. Acresce que a exploração e manutenção da rede hidrométrica na ilha da Madeira são bastante difíceis, pois, em consequência do regime torrencial dos cursos de água naturais associado ao acidentado relevo, é frequente ocorrerem no Inverno desprendimentos e arrastamentos de blocos rochosos que obstruem as secções de medição ou danificam os equipamentos e estruturas nelas existentes, com conseqüente interrupção da medição das alturas hidrométricas. Surgem, deste modo, inúmeras falhas de registos durante períodos por vezes extensos ou mesmo abandono de estações.

De modo a apreciar o andamento geral das séries hidrológicas e a detectar eventuais especificidades das mesmas, foram elaborados diagramas cronológicos das precipitações mensais e dos escoamentos mensais (expressos em altura de água) nas bacias hidrográficas das seis estações hidrométricas seleccionadas.

Os diagramas cronológicos obtidos revelaram a existência de períodos frequentes, especialmente no semestre de verão (de Abril a Setembro), com escoamentos mensais que podem exceder muito significativamente as precipitações nesses meses. Para tais ocorrências admite-se que possam assumir especial importância a contribuição das nascentes e do escoamento subsuperficial em cada bacia hidrográfica.

Tendo por base as estimativas, para as seis estações hidrométricas analisadas, do escoamento total e das suas duas parcelas de escoamento superfície do terreno e de escoamento hipodérmico e subterrâneo e com vista a avaliar, quer aquele escoamento total, quer as suas parcelas em qualquer secção da rede hidrográfica da ilha da Madeira, estabeleceu-se:

- no que respeita à parcela de escoamento à superfície do terreno, modelos lineares de transformação da precipitação naquele tipo de escoamento, à escala mensal;
- relativamente às contribuições provenientes das reservas subterrâneas e do escoamento hipodérmico, uma relação linear entre os valores anuais médios do escoamento à superfície do terreno e do escoamento subterrâneo e hipodérmico.

Mediante o recurso a SIG, procedeu-se à aplicação sistemática dos anteriores modelos a noventa e cinco bacias cobrindo a quase totalidade da ilha da Madeira. Os resultados permitiram o traçado dos mapas de isolinhas anuais médias dos diferentes tipos de escoamento, apresentados na figura 5.

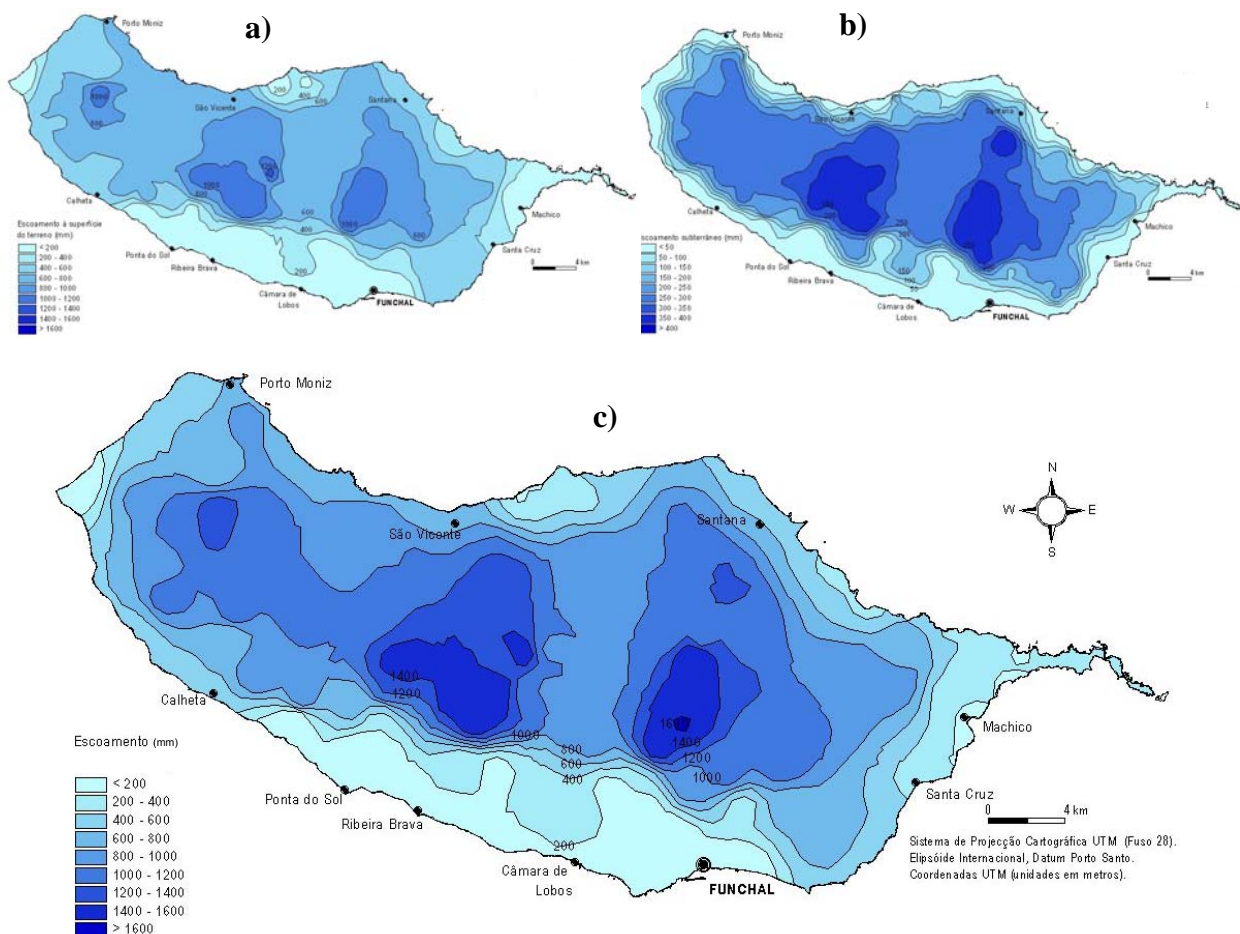


Figura 5 – Isolinhas anuais médias do: a) escoamento à superfície do terreno (mm); b) escoamento subterrâneo e hipodérmico (mm) e c) escoamento total (mm), GASPAR e PORTELA (2002.)

O quadro 1 mostra os escoamentos anuais médios que resultaram dos mapas de isolinhas, tanto para a totalidade da ilha da Madeira, como para as encostas norte e sul.

Quadro 1

Escoamentos anuais médios na ilha da Madeira.

Zona		Escoamento à superfície do terreno (mm)	Escoamento subterrâneo e hipodérmico (mm)	Escoamento total (mm)
Encosta	norte	681,5	219,3	900,8
	sul	504,4	189,2	693,6
ilha da Madeira		582,1	202,3	784,4

Precipitação Oculta

Os valores médios da nebulosidade na Madeira são maiores do que sobre o mar na região em que está situada, o que se explica pela formação de nuvens e nevoeiros orográficos, i.e., o ar húmido marítimo ao encontrar a ilha, barreira montanhosa perpendicular à direcção predominante do vento, de nordeste, vai sofrer uma subida forçada ao longo da encosta. O ar que foi obrigado a subir, arrefece adiabaticamente, condensando-se em pequenas partículas que ficam em suspensão na atmosfera, constituindo nuvens ou nevoeiros, consoante a condensação se dá em altitude ou junto da superfície do globo.

Na Madeira os nevoeiros são quase exclusivamente orográficos, formando-se a barlavento da elevação, com tendência para se dissiparem a sotavento, sendo a variação anual da frequência pouco nítida, atingindo, na Bica da Cana, 235 dias/ano, e no Areeiro 229 dias/ano.

Em relação à variação em altitude, as massas de ar húmido podem começar a condensar a altitudes relativamente baixas, a partir dos 400 m, até altitudes de cerca de 1600 m, fixando-se a cobertura nebulosa entre os 600-800 m e os 1600 m, no Inverno, descendo mais abaixo, no Verão.

Esta persistente e espessa cobertura nebulosa, responsável, na presença de vegetação, pelo fenómeno da precipitação oculta, constitui um recurso de elevado potencial hídrico. Foram obtidos sob uma *Erica arborea* L. (urze com cerca de 14 m³ de volume de copa), no Paul da Serra – local com condições bastante favoráveis – precipitações médias de 30mm/d, o que corresponde a 5 100 mm/ano (30 mm/d x 170 dias produtivos), valor superior ao da precipitação anual média daquela zona.

Consideramos, assim, que para além da precipitação directa sob a forma de chuva (média anual para a ilha de 1 636 mm), principal fonte de recarga contribuindo com cerca de 363 mm (267 500 000 m³/ano) para os nossos recursos hídricos subterrâneos, existe, na Madeira, uma outra fonte de recarga, proveniente da interacção do nevoeiro com a vegetação arbórea das zonas altas da ilha, designada por precipitação oculta.

A vegetação climácica das partes mais altas da ilha da Madeira corresponde a uma série de vegetação denominada Urzal de Altitude (*Polysticho falcinelli-Erica arboreae sigmetum*) do ponto de vista bioclimático é uma série mesotemperada superior (segundo Capelo *et al.*, 2004 por vezes “pontualmente supratemperada”), hiper-húmida superior e ultra-hiper-húmida. Do ponto de vista edáfico os solos têm sido classificados quase sempre como leptossolos e cambissolos pouco espessos, no entanto, os resultados mais recentes apontam para a ocorrência de solos profundos com grande capacidade de fixação de água. No que diz respeito à vegetação arbórea quando ocorre é dominada pelas urzes arbóreas (*Erica arborea* e *E. platycodon* subsp. *maderincola*). Embora a série de vegetação ocorra apenas acima dos 1400 m.s.m. ela é substituída, acima de 1650 m.s.m, por outras comunidades dominadas por herbáceas perenes em larga medida endémicas. A vegetação climácica arbórea é dominada por *Erica arborea* tendo sido, no passado, possivelmente co-dominada por *Juniperus cedrus* subsp. *maderensis*, ocorrem ainda outras comunidades de plantas herbáceas nas clareiras dos urzais. Actualmente são escassos os exemplos de urzais arbóreos bem conservados, no entanto eles podem ainda ser observados em relativo bom estado de conservação no Pico Ruivo e Bica da Cana (Capelo *et al.*, 2004).



Figura 6 – Gotículas de nevoeiro retidas pela vegetação



Figura 7 – Cobertura nebulosa

Fluxo Subterrâneo

As principais zonas de recarga situam-se nas zonas mais altas da ilha, principalmente nas de menor declive, onde a precipitação atinge valores elevados e as formações vulcânicas são mais recentes e, em geral, mais permeáveis, como é o caso, entre os mais importantes, do planalto do Paul da Serra, Santo da Serra e área compreendida entre o Chão dos Balcões/ Poiso/ João do Prado. Nas zonas de recarga, o fluxo é não saturado, predominantemente descendente, criando localmente aquíferos suspensos associados a níveis impermeáveis que, em certas condições morfológicas e estruturais favoráveis, originam nascentes.

A partir de uma certa profundidade entra-se na zona saturada, corpo lenticular de água doce, limitado, superiormente, por uma superfície freática e, inferiormente (com o mar), por uma interface, cuja posição depende da configuração da superfície freática. O fluxo saturado é divergente, do centro para a periferia da ilha, originando, com frequência, nascentes submarinas de água doce.

Modelo Hidrogeológico para a ilha da Madeira

Apesar da pequena extensão que as rochas vulcânicas ocupam na crosta terrestre, elas são as litologias dominantes em mais de uma centena de ilhas, espalhadas por todo o mundo. Nestas, o estudo da hidrogeologia de aquíferos vulcânicos torna-se vital, porquanto o abastecimento se faz, fundamentalmente, à custa dos recursos hídricos subterrâneos.

Apesar da sua importância, o estudo dos aquíferos vulcânicos constitui um domínio de investigação relativamente recente, tendo dado lugar, apenas em 1974, ao primeiro Simpósio Internacional de Hidrogeologia de Rochas Vulcânicas.

A análise dos aquíferos vulcânicos, feita por diferentes autores, põe em evidência a dificuldade de definir um quadro geral que possa representar a circulação subterrânea num meio insular vulcânico. Os ambientes insulares vulcânicos, categoria na qual a Madeira se inclui, são, na maioria dos casos, meios caracterizados por grande heterogeneidade petrológica. As rochas vulcânicas, presentes em maior volume, apresentam características muito diversas à circulação das águas, consoante a sua natureza, quantidades emitidas, modo de jazida, quantidade de gases e seu estado de alteração, o que lhes confere um comportamento hidrogeológico heterogéneo e anisótropo.

Os isótopos ambientais são ferramentas essenciais para o estudo e conhecimento dos meios insulares vulcânicos. São isótopos naturais de elementos que ocorrem em abundância no nosso meio ambiente, H, C, N, O e S, elementos principais dos sistemas hidrológico, geológico e biológico. São também elementos leves e, em consequência disso, as diferenças de massa relativas entre os seus isótopos são grandes, o que leva a fraccionamentos mensuráveis durante as reacções físicas e químicas. A composição em isótopos estáveis da água

é modificada por processos meteóricos e, por isso, as águas de recarga num ambiente particular terão uma assinatura isotópica característica, reveladora da sua origem. Os isótopos radioactivos servem, por sua vez, para medições de idade e velocidade de circulação. Actualmente utilizam-se os isótopos ambientais não só para investigar a proveniência das águas subterrâneas, mas também os processos de recarga, processos sub-superficiais, reacções geoquímicas e taxas de reacção. Os mais utilizados em estudos hidrológicos, por fazerem parte da molécula de água, são o deutério, oxigénio-18 e o radioactivo trítio.

Os isótopos ambientais estáveis são medidos como a razão entre os dois isótopos mais abundantes de um dado elemento. No entanto, devido à grande dificuldade de efectuar a medição da razão isotópica absoluta, a utilização das espécies isotópicas estáveis faz-se sob a forma de diferenças relativas, ou seja, através da razão entre a espécie isotópica mais pesada e a mais leve e abundante, comparada relativamente a um padrão específico, como explica a seguinte fórmula:

$$\delta (\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{amostra}}}{R_{\text{padrão}}} - 1 \right) \times 1000$$

O valor δ é adimensional e expressa-se em permilagem (‰), R_{amostra} é a razão entre as concentrações das espécies em estudo na amostra ($^2\text{H}/^1\text{H}$ ou $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) e $R_{\text{padrão}}$ refere-se à mesma razão isotópica mas do padrão. Valores de δ positivos representam amostras enriquecidas em isótopos em relação ao padrão enquanto valores negativos representam amostras empobrecidas. O padrão internacional utilizado em hidrologia para as determinações de ^{18}O e de ^2H é o VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), uma água do mar destilada e preparada pela IAEA de forma a reflectir a composição média da água dos vários oceanos, que constituem cerca de 98% do total de água presente na Terra. A composição isotópica dos oceanos em termos de ^{18}O e de ^2H é, assim, de 0‰, podendo variar até um máximo de $\pm 2\text{‰}$.

A utilidade do estudo destes dois isótopos, deve-se ao seu fraccionamento devido a diferenças nas taxas de reacção para diferentes espécies moleculares (como resultado da diferença de massas). O resultado é uma concentração desproporcionada de um isótopo em relação ao outro num dos lados da reacção. Este fraccionamento pode ter origem físico-química sob condições de equilíbrio ou condições de não-equilíbrio, bem como por difusão molecular. Por esta razão, as moléculas com isótopos mais pesados, têm preferência pela fase líquida em relação à fase gasosa. Este fenómeno também é fortemente dependente da temperatura da reacção (temperaturas frias provocam um empobrecimento isotópico em relação a temperaturas mais amenas, podendo-se assim obter um gradiente de concentração em função da temperatura). Devido a este processo, as águas naturais variam a sua composição isotópica, através de três processos fundamentais: evaporação, condensação e precipitação de massas de vapor de água

Para utilizar o ^{18}O e o ^2H na caracterização da recarga de águas subterrâneas, é necessário que as suas concentrações na precipitação tenham um sinal característico, que varie regionalmente e com o tempo. No caso da ilha da Madeira, o efeito da altitude é o mais importante, uma vez que os efeitos de continentalidade não ocorrem, não tendo por isso, os efeitos sazonais importância. Em qualquer região com relevo, ocorrerá precipitação orográfica, à medida que a massa de vapor ascende acima da topografia e arrefece adiabaticamente, originando chuva. Nas maiores altitudes, onde as temperaturas médias são mais baixas, a precipitação será isotopicamente empobrecida. Para o ^{18}O , o empobrecimento varia entre $-0,15$ e $-0,5\text{‰}$ por 100m de altitude, com um decréscimo correspondente de cerca de -1 a -4‰ para o ^2H . Este efeito de altitude permite distinguir recargas de alta altitude de recargas de menor altitude.

Outro efeito estudado na Madeira, foi o de interceptação de nevoeiro (precipitação oculta), que se pensa ser fonte importante de recarga na ilha. É um exemplo extremo de precipitação costeira, onde as gotículas de água são tão pequenas que adquirem mais facilmente os isótopos pesados do vapor de água circundante que as gotas de chuva. Ao encontrarem vegetação são capturadas e precipitadas. Assim sendo, a uma mesma cota a água do nevoeiro é mais rica isotopicamente que a água da chuva. Desta maneira podemos utilizar a informação para estabelecer relações e origens de água nos diferentes aquíferos.

As observações feitas no interior das galerias e túneis em escavação, a análise dos registos de caudais de galerias, nascentes e ensaios de bombeamento dos furos de captação, assim como a interpretação dos dados isotópicos, permitiram definir o seguinte modelo hidrogeológico para a ilha da Madeira:

- Aquíferos Suspensos

Existência de aquíferos suspensos situados em altitude, em relação com níveis pouco permeáveis ou impermeáveis, nomeadamente tufos, escoadas argilificadas, níveis de cozimento em paleossolos ou basaltos alterados e depósitos freatomagmáticos.

Estes aquíferos, por sua vez, podem ser subdivididos em superficiais e profundos. Os primeiros, situados a cotas mais elevadas, caracterizam-se por águas mais frias, pouco mineralizadas (condutividades entre 33 e 62 $\mu\text{S}/\text{cm}$), com pH ácidos e por possuírem fácies frequentemente cloretadas. São muito vulneráveis às variações do clima, variando os seus caudais, ao longo do ano hidrológico, consoante a recarga, chegando mesmo, alguns deles, a esgotar. Os aquíferos suspensos profundos, situados, ainda, no domínio de altitude, encontram-se a cotas mais baixas, possuindo circuitos subterrâneos superiores, de onde resultam águas um pouco mais mineralizadas e pH mais elevados do que os anteriores, sendo os seus caudais menos sensíveis às variações do clima.



Figura 8 – Aquífero suspenso na ilha da Madeira.

- Aquífero de Base

Apesar das heterogeneidades e descontinuidades que caracterizam os meios vulcânicos, existe na Madeira, a partir de uma certa profundidade, um nível de saturação regional ou aquífero de base com características distintas em função do complexo vulcânico presente.

Assim, em materiais do Complexo Vulcânico Principal, o aquífero caracteriza-se, em geral, por elevadas transmissividades que vão desde 1000 a 25000 m^2/d (a transmissividade representa a capacidade do aquífero para ceder água, indica a sua produtividade), gradientes piezométricos baixos, desde 0,0003 a 0,0064 (indicadores de elevada permeabilidade do meio), e águas medianamente mineralizadas com condutividades entre 100 e 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (sinónimo de percursos subterrâneos rápidos). As captações efectuadas em formações deste complexo vulcânico são bastante produtivas, como é o caso das galerias das Rabaças, do Rabaçal, do Porto Novo, Fontes Vermelhas e do túnel da levada do Seixal e nº4 dos Tornos.

Por outro lado, em formações do Complexo Vulcânico Antigo, na maioria, muito alteradas, onde se encontram basaltos já argilificados e piroclastos transformados em tufos, por serem as formações mais antigas existentes na ilha, o aquífero caracteriza-se por transmissividades mais baixas, 17 a 2263 m^2/d (indicadoras de baixas produtividades), águas, em geral, bastante mais mineralizadas (condutividades que chegam a atingir 3300 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e gradientes piezométricos mais elevados (indicam menor permeabilidade), razão pela qual as captações são muito pouco produtivas, como é o caso da galeria do Cidrão, do túnel da Encumeada, dos túneis dos “Fins Múltiplos dos Socorridos”, etc.,

A ligação entre a zona litoral saturada e a zona saturada do domínio de altitude que define o aquífero de base faz-se através de um aumento rápido do gradiente desde o litoral para o centro do maciço, devido às seguintes circunstâncias:

1. As formações vulcânicas tornam-se cada vez menos permeáveis para o interior da ilha (formações mais antigas);
2. existência de uma formação sedimentar impermeável, espessa e extensa, o Depósito Conglomerático Bréchoide;

3. a quantidade de filões aumenta progressivamente para o interior do edifício vulcânico contribuindo para a diminuição da sua permeabilidade horizontal;
4. e, ainda, pelo facto de a recarga ocorrer, predominantemente, nas zonas altas e planas do interior da ilha.

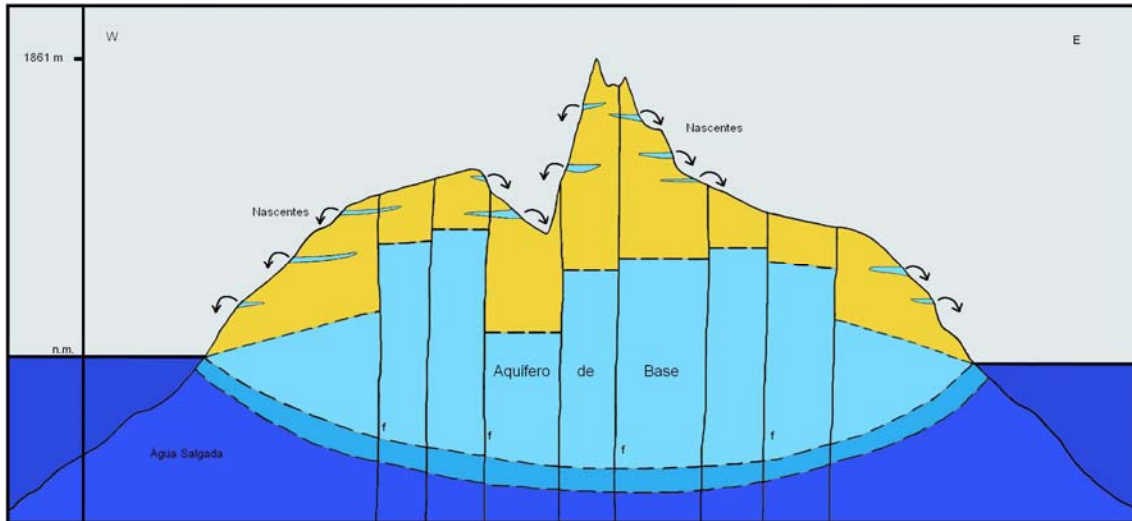


Figura 9 – Modelo hidrogeológico para a ilha da Madeira.

- *Aquíferos Compartimentados*

Dado que o vulcanismo na Madeira é, essencialmente, do tipo fissural, todo o edifício vulcânico se encontra atravessado por filões subverticais que limitam e compartmentam o aquífero de base dando origem a variações bruscas de potencial entre compartimentos contíguos (ex: galerias do Porto Novo, Fontes Vermelhas etc.). Esta compartimentação do meio vulcânico é, ainda, responsável pela existência, abaixo do nível de saturação regional, de compartimentos ou células secas, localizados em zonas que não recebem recarga.



Figura 10 – Filão basáltico subvertical

Tipos de Captação

Na Madeira, durante o Verão, as águas subterrâneas constituem a única fonte de abastecimento de água, sendo, por ora, suficientes para garantir as necessidades de consumo, apesar de as disponibilidades não se distribuírem uniformemente no espaço e no tempo. Durante o Inverno é aproveitado parte do escoamento superficial de algumas ribeiras.

Os recursos hídricos subterrâneos assumem, assim, grande importância no potencial endógeno ambiental da Madeira. Dadas as condições muito particulares do relevo da ilha, parte dos seus recursos hídricos subterrâneos destina-se, além do abastecimento público e rega, à produção de energia eléctrica. A energia hidroeléctrica produzida em 7 centrais representa cerca de 20 a 25% da produção total de energia, com uma produção de 100 a 120 GWh/ano, sem qualquer prejuízo para o abastecimento urbano e rega, havendo, deste modo, um duplo aproveitamento dos recursos hídricos.

A captação da água subterrânea processa-se através de perfurações horizontais, as galerias e os túneis (a galeria tem apenas uma abertura, um túnel tem duas, pelo que pode ser atravessado); de perfurações verticais, os furos; e do aproveitamento da descarga natural das nascentes:

O aproveitamento do caudal das nascentes faz-se através de um sistema de mais de 200 levadas que contornam a ilha numa extensão total superior a 1000 km, captando e conduzindo as águas drenadas pelas centenas de nascentes que brotam da ilha, contrariando o seu curso normal para o mar.

As galerias, projectadas para captar recursos subterrâneos, são construídas em zonas elevadas da ilha (com a precaução de não passar sobre o nível freático), de modo a atravessar formações mais recentes e mais transmissivas, onde a qualidade da água é a melhor, possibilitando, ainda, que a água circule por gravidade. Penetram no terreno (500m a 3000m) sub-horizontalmente, com declive suave para a boca, até cortarem o nível de saturação. Contudo, devido à existência, por vezes, de longos troços impermeáveis, a água nem sempre surge ao atravessar da superfície freática virtual mas ao interceptar o primeiro troço ou estrutura permeável (ex. falhas), em conexão com o sistema hidráulico com o qual contacta.

Os túneis são, normalmente, perfurações sub-horizontais nos maciços, executados com o objectivo de fazer a ligação entre duas zonas de difícil acesso, ou apenas de encurtar o percurso entre elas. Podem ser hidráulicos (destinados ao transporte de água), rodoviários ou mistos, variando a sua dimensão, de acordo com a função a que se destinam. A finalidade inicial da execução de um túnel não é a de captar recursos hídricos subterrâneos, até porque a maioria passa acima do nível freático. No entanto, quando, acidentalmente, interceptam formações ou acidentes tectónicos produtivos, esses recursos são aproveitados com algumas vantagens:

1ª A qualidade da água é superior, quando captada em altitude, do que a captada nas zonas litorais do aquífero de base;

2ª não há consumo de energia na sua captação, dado que esta drena por gravidade, ao contrário da captada nos furos;

3ª em termos económicos o mesmo investimento tem duas vantagens.

Os furos são construídos nas zonas mais baixas, normalmente no leito das ribeiras, de modo a reduzir a extensão necessária para captar o aquífero de base. A proximidade do mar levanta sempre o risco de contaminação marinha, em especial em zonas com menor recarga, devendo a extracção ser feita com precaução para não produzir salinização.



Figura 11 – Furo de captação



Figura 12 – Galeria de captação da Fajã da Ama.



Figura 13 – Origem de uma galeria de captação.



Figura 15 – Água termal gasocarbônica

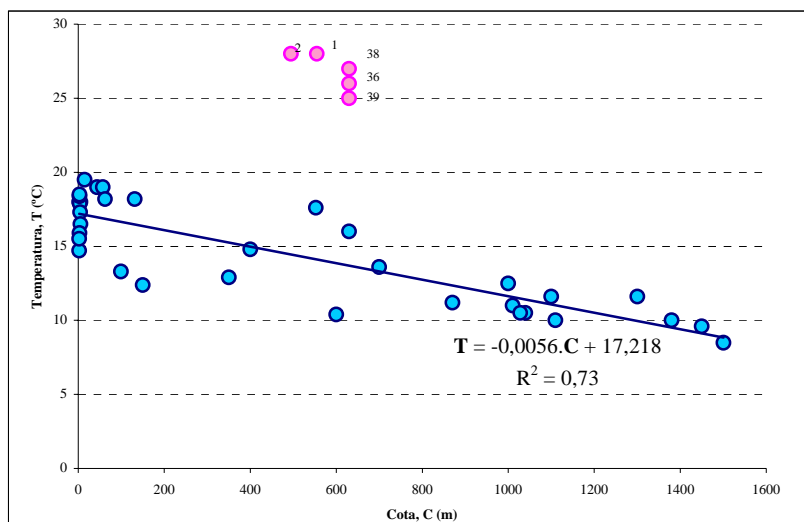


Figura 16 – Representação gráfica da temperatura das águas em função da altitude.

A distribuição espacial da condutividade revela um aumento da mineralização das águas com a profundidade e proximidade do mar, reflectindo a existência de um fluxo de água subterrânea do centro para a periferia da ilha e consequentemente a crescente influência dos principais mecanismos mineralizadores, a hidrólise dos minerais silicatados das rochas e a contaminação por sais de origem marinha.

Caracterizam-se, em geral, por baixas mineralizações, com condutividades que vão desde os 33 até aos 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sendo as águas termais, que circulam no Complexo Antigo, bastante mais mineralizadas, com condutividades que vão desde os 594 aos 3300 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

A maioria das águas amostradas possui pH superior a 7, são águas básicas, apenas as das cotas mais altas são ácidas. As alcalinidades das águas são, em geral, baixas, variando as suas médias entre 31,8 e 75,1 mg/l. Quanto à dureza (capacidade da água produzir incrustações) a maioria das águas são brandas ou leves sendo as dos furos um pouco mais duras.

O sódio é o catião mais importante, seguido do cálcio, do magnésio e, por fim, o potássio. O bicarbonato é, na maioria das águas amostradas, o anião mais importante, seguido do cloreto e do sulfato.

Quanto à qualidade da água para consumo humano, verificamos que a grande maioria das águas subterrâneas amostradas são, em relação aos elementos maiores, de boa qualidade para consumo humano, estando representadas pela cor verde (dentro do Valor Máximo Recomendado).

Os amarelos observados (dentro do Valor Máximo Admissível) ocorrem em relação com os teores em cloreto e sódio, apenas em certas épocas do ano, nos furos situados mais próximo do mar, nas ribeiras dos Socorridos, do Porto Novo, de Machico e do Caniço e, ainda, alguns valores para os nitratos, em dois furos da ribeira dos Socorridos, causados, por contaminação agrícola.

Quadro 3

Fevereiro 2004

NASCENTES	T (°C)	Cond. (µS/cm)	pH	Alc. Total (mg/L)	CO ₂ (mg/L)	Bicarbonato (mg/L)	Ca (mg/L)	Cl (mg/L)	P ₂ O ₅ (µg/L)	Mg (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	K (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Na (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Al (µg/L)	Fe (µg/L)	F (µg/L)	Mn (µg/L)
Pedras	12	50,8	6,6	<10	4	<12	2	<7	25	1,5	1,5	<0,01	0,28	11	4	<7	<8	<10	70	<4
Fonte Barro	12	58,1	6,0	<10	6,8	<12	1,7	14	-	1,9	<0,8	<0,01	0,3	5,7	6,1	<7	<8	<10	70	<4
25 Fontes	11	106,5	8,0	40	0,6	49	6,7	<7	190	4,1	1,1	<0,01	0,87	26	7	<7	<8	<10	70	<4
Homem em Pé	9	43,1	7,0	<10	1,7	<12	2,3	7	35	1,1	2,5	<0,01	0,29	14	4,1	<7	<8	<10	70	<4
Eira do Serrado	14	101,6	7,3	33	2	40	6,4	11	-	3,8	1	<0,01	0,38	31	8,2	<7	<8	<10	70	<4
Ribeiro Frio	11	88,7	7,4	27	1,3	33	4,7	9,7	70	3,4	<0,8	<0,01	0,44	20	6,9	<7	<8	<10	70	<4
Fonte Geraldo	17	1849	8,7	242	0,5	271	6,2	382	2209	12	21	<0,01	9,7	23	368	74	<8	<10	1576	<4
Galeria Fontes Vermelhas	13	109,9	8,2	33	0,3	41	5,8	11	144	3,9	1	<0,01	0,81	26	10	<7	<8	<10	70	<4
Galeria Porto Novo	11	112,6	8,1	45	0,4	55	7,3	7,5	159	5,5	0,8	<0,01	0,74	28	6,9	<7	<8	<10	70	<4
Galeria das Rabaças	12	104,6	8,2	43	0,5	52	6,1	7,1	245	5,1	1,1	<0,01	0,91	26	7,5	<7	<8	<10	70	<4
Galeria do Rabaçal	12	100	8,0	41	0,5	50	6,8	7,1	202	4,2	1,1	<0,01	0,91	27	7	<7	<8	<10	70	<4
Túnel da Levada do Seixal	12	94,2	8,0	34	0,4	41	6,1	7,3	199	3,5	<0,8	<0,01	0,81	23	6,7	<7	<8	<10	70	<4
Túnel do Norte	17	172,8	6,9	50	0,7	61	8,4	24	146	5,7	2,5	<0,01	1,2	34	17	<7	<8	<10	70	<4
Túnel 2 Tornos (2)	25	798	7,7	454	7,8	554	7,5	12	-	22	<0,8	<0,01	4,4	84	160	16	<8	22	149	21
Furo 2 Socorridos (JK2)	18	229	7,8	67	0,9	82	14	26	-	9,5	4,9	<0,01	1,4	31	16	7,6	<8	13	72	<4
Furo 3 Socorridos (JK3)	18	262	7,7	73	0,9	89	16	32	-	11	3,8	<0,01	1,5	29	18	8	<8	<10	70	<4
Furo 2 Machico (JK7)	19	305	7,9	70	1,1	86	12	42	138	10	4,5	<0,01	1,3	41	32	7,8	<8	17	71	<4
Furo 5 Machico (JK8)	18	198	8,1	52	0,5	64	9,5	23	138	5,8	4,3	<0,01	1	30	20	<7	<8	<10	70	<4
Valor Máximo Recomendável	12	400	6,5-8,5	-	-	-	100	25	400	30	25	-	10	-	20	25	50	50	-	20
Valor Máximo Admissível	25	-	9,5	500	-	-	-	200	5000	50	50	0,1	12	-	150	250	200	200	1500	50

Quadro 4

Abril / Maio 2004

NASCENTES	T (°C)	Cond. (µS/cm)	pH	Alc total (mg/L)	CO ₂ (mg/L)	Bicarbonato (mg/L HCO ₃)	Ca (mg/L)	Cl (mg/L)	P ₂ O ₅ (µg/L)	Mg (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	NO ₂ (mg/L)	K (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Na (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Al (µg/L)	Fe (µg/L)	F (µg/L)	Mn (µg/L)
Pedras		42	6,7	<10	3,4	<12	2	<7	<20	1,5	1,4	<0,01	0,32	11	3,7	<7	<8	<10	<70	<4
Fonte Barro	11	59	6,4	<10	5,3	<12	1,6	12	<20	1,9	<0,8	<0,01	0,31	5,7	6	<7	<8	<10	<70	<4
25 Fontes	11	99,7	8,0	39	0,8	48	6,8	<7	195	4,2	1	<0,01	0,37	26	6,9	<7	9	<10	<70	<4
Empenas	9	80,3	6,7	<10	2	<12	2,3	<7	36	1,1	2,5	<0,01	0,3	13	3,9	<7	<8	<10	<70	<4
Eira do Serrado	13	101,8	7,4	34	3	41	6,4	7,4	61	3,8	1,1	<0,01	0,41	30	7,8	<7	<8	<10	<70	<4
Ribeiro Frio	11	173,1	7,4	26	2	32	4,7	8,3	70	3,5	<0,8	<0,01	0,46	19	7	<7	<8	<10	<70	<4
Galeria Fontes Vermelhas	13	109,2	8,6	34	0,2	39	5,9	11	147	4	1	<0,01	0,68	27	9,7	<7	<8	<10	<70	<4
Galeria Porto Novo	12	111	8,4	47	0,4	55	7,3	7,5	163	5,8	0,81	<0,01	0,74	29	6,7	<7	<8	15	<70	<4
Galeria das Rabaças	16	82,5	8,1	44	0,4	52	6,1	<7	253	5,2	1	<0,01	0,89	26	7,1	<7	<8	<10	<70	<4
Galeria do Rabaçal	12	105,1	7,7	41	0,5	50	6,9	<7	209	4,3	1,1	<0,01	0,85	27	7	<7	<8	<10	<70	<4
Fajã da Ama (direita)	23	535	7,4	239	21	291	32	7,6	756	26	<0,8	<0,01	6	68	46	35	<8	580	<70	175
Fajã da Ama (centro)	30	550	7,3	309	31	377	38	7,1	397	34	<0,8	<0,01	7,3	79	46	25	41	1100	<70	231
Fajã da Ama (esquerda)	27	554	7,5	332	21	406	56	<7	454	34	<0,8	<0,01	5,1	71	30	11	<8	750	<70	263
Túnel da Levada do Seixal	11	94,3	8,1	33	0,5	40	6,1	7,5	206	3,5	<0,8	<0,01	0,84	23	6,6	<7	<8	<10	<70	<4
Túnel do Norte	16	165,9	8,1	48	0,7	58	8,5	22	148	5,8	2,5	<0,01	1,2	34	16	<7	<8	<10	<70	<4
Furo 2 Socorridos (JK2)	18	213	8,1	64	0,9	78	13	21	128	9,1	3,7	<0,01	1,3	32	15	<7	38	0,18	<70	<4
Furo 3 Socorridos (JK3)	17	262	8,1	68	0,9	83	16	33	106	11	3,7	<0,01	1,5	29	18	7,2	<8	14	<70	<4
Furo 2 Machico (JK7)	19	303	8,3	70	0,7	86	12	41	142	10	4,4	<0,01	1,3	41	32	9,1	<8	<10	<70	<4
Furo 5 Machico (JK8)	18	197,9	8,4	53	0,5	63	9,7	22	142	5,9	4,4	<0,01	0,99	31	20	<7	<8	<10	<70	<4
Valor Máximo Recomendável	12	400	6,5-8,5	-	-	-	100	25	400	30	25	-	10	-	20	25	50	50	-	20
Valor Máximo Admissível	25	-	9,5	500	-	-	-	200	5000	50	50	0,1	12	-	150	250	200	200	1500	50

Quadro 5

Julho 2004

NASCENTES	T (°C)	Cond. (µS/cm)	pH	Alc. total (mg/L)	CO2 (mg/L)	Bicarbonato (mg/L HCO3)	Ca (mg/L)	Cl (mg/L)	P2O5 (µg/L)	Mg (mg/L)	NO3 (mg/L)	NO2 (mg/L)	K (mg/L)	SiO2 (mg/L)	Na (mg/L)	SO4 (mg/L)	Al (µg/L)	Fe (µg/L)	F (µg/L)	Mn (µg/L)
Pedras	13	43,4	6,8	<10	2,8	<12	2	7,1	21	1,6	1,3	<0,01	0,3	11	4	<7	<8	<10	<70	<4
Fonte Barro	13	48,8	6,3	<10	6,9	<12	1,7	12	29	1,9	<0,8	<0,01	0,31	5,7	6,1	<7	<8	<10	<70	<4
25 Fontes	13	73,7	8,0	43	0,9	52	6,8	<7	202	4,1	1	<0,01	0,85	26	6,9	<7	<8	<10	<70	<4
Empenas	10	33,5	6,9	<10	2	<12	2,4	<7	35	1,1	2,4	<0,01	0,31	15	4,2	<7	11	13	<70	<4
Eira do Serrado	14	94,8	7,3	34	3,5	42	6,6	10	62	3,8	1	<0,01	0,41	31	7,9	<7	<8	<10	<70	<4
Ribeiro Frio	11	63,1	7,4	27	2,2	33	4,7	9	70	3,5	<0,8	<0,01	0,45	20	7	<7	<8	<10	<70	<4
Galeria Fontes Vermelhas	13	83,1	8,3	34	0,3	40	5,8	12	149	4	1	<0,01	0,79	27	9,7	<7	<8	<10	<70	<4
Galeria Porto Novo	12	88,3	8,4	46	0,4	55	7,4	7,7	167	5,9	<0,8	<0,01	0,74	29	6,7	<7	<8	<10	<70	<4
Galeria das Rabaças	12	78	8,2	45	0,6	54	6	<7	257	5,4	0,91	<0,01	0,91	26	7,3	<7	<8	<10	<70	<4
Galeria do Rabaçal	11	73,4	7,8	42	1,3	51	7	<7	212	4,2	1,1	<0,01	0,86	27	6,8	<7	<8	<10	<70	<4
Túnel da Levada do Seixal	11	65,2	8,1	36	0,6	44	6,2	7,8	209	3,4	<0,8	<0,01	0,83	23	6,6	<7	<8	<10	<70	<4
Túnel do Norte	17	141,8	8,2	48	0,6	58	8,1	18	150	5,4	2,6	<0,01	1,1	33	16	<7	<8	<10	<70	<4
Túnel 2 Tornos (1)	21	516	8,2	294	3,6	359	12	10	111	21	<0,8	<0,01	4,8	62	89	10	<8	11	<70	14
Túnel 2 Tornos (2)	26	788	8,0	425	8	518	7,9	11	323	22	<0,8	<0,01	4,5	85	154	19	<8	28	101	26
Furo 2 Socorridos (JK2)	19	231	8,0	72	1,4	88	16	26	136	11	7,5	<0,01	1,4	31	18	11	8	<10	<70	<4
Furo 3 Socorridos (JK3)	19	280	8,2	69	0,8	84	20	49	107	13	4,4	<0,01	1,6	30	21	9,8	9	<10	<70	<4
Furo 2 Machico (JK7)	20	268	8,1	74	1,2	90	12	41	145	10	4,4	<0,01	1,3	42	33	10	<8	<10	<70	<4
Furo 5 Machico (JK8)	18	170,7	8,3	54	0,5	64	9,9	23	146	5,9	4,7	<0,01	0,99	31	21	<7	<8	<10	<70	<4
Valor Máximo Recomendável	12	400	6,5-8,5	-	-	-	100	25	400	30	25	-	10	-	20	25	50	50	-	20
Valor Máximo Admissível	25	-	9,5	500	-	-	-	200	5000	50	50	0,1	12	-	150	250	200	200	1500	50

Quadro 6

Outubro 2004

NASCENTES	T (°C)	Cond. (µS/cm)	pH	Alc. total (mg/L)	CO2 (mg/L)	Bicarbonato (mg/L HCO3)	Ca (mg/L)	Cl (mg/L)	P2O5 (µg/L)	Mg (mg/L)	NO3 (mg/L)	NO2 (mg/L)	K (mg/L)	SiO2 (mg/L)	Na (mg/L)	SO4 (mg/L)	Al (µg/L)	Fe (µg/L)	F (µg/L)	Mn (µg/L)
Pedras	13	42,1	6,8	<10	3,2	<12	1,8	<7	21	1,4	1,4	<0,01	0,27	11	3,9	<7	<8	<10	<70	<4
Fonte Barro	13	53,3	7,1	<10	1,6	<12	1,3	11	<20	1,6	<0,8	<0,01	0,27	5,2	5,7	<7	<8	<10	<70	<4
25 Fontes	11	71,6	8,1	37	0,6	45	6,7	<7	193	4,1	1,1	<0,01	0,81	26	7	<7	<8	<10	<70	<4
Empenas	9	43,3	7,1	<10	1,6	<12	2,4	<7	38	1,1	2,5	<0,01	0,35	14	4,1	<7	<8	<10	<70	<4
Eira do Serrado	15	102,7	7,6	32	1,6	39	6,6	10	57	3,9	1,2	<0,01	0,4	31	7,8	<7	<8	<10	<70	<4
Ribeiro Frio	11	64,5	7,5	27	1,7	33	5,1	9,2	73	3,6	<0,8	<0,01	0,47	21	7,5	<7	<8	<10	<70	<4
Fonte do Geraldo	21	1732	8,9	226	0,5	255	7,3	398	2182	12	22	0,014	10	24	380	72	14	<10	1617	<4
Fonte de S. Roque	20	1012	8,2	131	1,5	160	17	260	206	30	4,6	<0,01	3,1	29	169	47	<8	13	75	<4
Galeria Fontes Vermelhas	13	81,8	8,4	31	0,2	37	5,8	12	145	4	1,1	<0,01	0,75	27	9,8	<7	<8	<10	<70	<4
Galeria Porto Novo	12	81,2	8,3	42	0,4	50	7,3	7,1	161	5,7	0,94	<0,01	0,72	28	6,8	<7	<8	<10	<70	<4
Galeria das Rabaças	12	103,2	8,1	41	0,6	50	6	<7	252	5,2	1,1	<0,01	0,88	26	7,4	<7	<8	<10	<70	<4
Galeria do Rabaçal	12	100,3	7,9	38	1	47	6,9	<7	213	4,4	1,2	<0,01	0,83	27	7	<7	<8	<10	<70	<4
Túnel da Levada do Seixal	11	65,3	8,2	32	0,4	39	6	<7	201	3,5	<0,8	<0,01	0,79	23	6,6	<7	<8	<10	<70	<4
Túnel do Norte	17	131,1	8,2	42	0,5	52	8	17	143	5,4	2,8	<0,01	1	32	16	<7	<8	<10	<70	<4
Túnel 2 Tornos (1)	21	558	8,4	286	2,1	340	11	<7	104	21	<0,8	<0,01	4,5	61	87	<7	<8	15	<70	13
Túnel 2 Tornos (2)	25	789	8,1	410	6,2	500	7,5	7,5	318	21	<0,8	<0,01	4,5	85	154	13	<8	26	123	22
Furo 2 Socorridos (JK2)	19	256	8,0	60	1,2	73	15	36	122	11	3,4	<0,01	1,4	31	17	<7	<8	14	75	<4
Furo 3 Socorridos (JK3)	19	331	8,0	60	1,2	73	21	54	103	14	5,5	<0,01	1,6	30	22	11	<8	<10	<70	<4
Furo 2 Machico (JK7)	20	269	8,1	67	1	82	12	41	140	10	4,4	<0,01	1,2	41	34	8,9	<8	<10	<70	<4
Furo 5 Machico (JK8)	19	168,3	8,4	49	0,4	59	9,6	22	142	5,9	4,4	<0,01	0,96	31	21	<7	<8	<10	<70	<4
Valor Máximo Recomendável	12	400	6,5-8,5	-	-	-	100	25	400	30	25	-	10	-	20	25	50	50	-	20
Valor Máximo Admissível	25	-	9,5	500	-	-	-	200	5000	50	50	0,1	12	-	150	250	200	200	1500	50

Quadro 7

Março / Maio 2004

NASCENTES	As (µg/L)	Cd (µg/L)	Pb (µg/L)	Co (µg/L)	Cu (µg/L)	Cr (µg/L)	Hg (µg/L)	Ni (µg/L)	Va (µg/L)	Zn (mg/L)	Al (µg/L)	Fe (µg/L)	F (µg/L)	Mn (µg/L)
Pedras	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	74	25	<70	<4
Empenas	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	<10	<70	<4
Eira do Serrado	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	<10	<70	<4
Ribeiro Frio	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	17	<70	<4
Fonte Serrão	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	10	<0,05	<8	<10	<70	<4
João Frino	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	<10	72	<4
Fonte São Roque	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	27	<0,05	<8	<10	<70	<4
Galeria Fontes Vermelhas	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	<10	<70	<4
Galeria Porto Novo	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	12	<0,05	<8	<10	<70	<4
Túnel do Norte	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	15	<0,05	<8	<10	<70	<4
Galeria das Rabaças	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	13	<0,05	16	12	<70	<4
Galeria do Rabaçal	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	11	<0,05	<8	<10	<70	<4
Túnel da Levada do Seixal	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	13	<0,05	<8	<10	<70	<4
Fajã Ama (direita)	0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	580	<70	175
Fajã Ama (esquerda)	1,3	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	750	<70	263
Fajã Ama (centro)	1,3	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	41	1100	<70	231
Furo 6 Socorridos (JK16)	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	<10	83	<4
Furo 5 Socorridos (JK5)	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	<10	80	<4
Furo 2 Machico (JK7)	<0,8	<0,5	<3	<7	3	<3	<0,7	<4	17	<0,05	<8	<10	<70	<4
Furo Santa Luzia (JK20)	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	16	<0,05	<8	<10	<70	<4
Furo São João (JK19)	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	18	<0,05	41	100	173	5
Furo Porto Novo (JK10)	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	18	<0,05	<8	<10	124	<4
Furo Santa Cruz (JK15)	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	0,07	<8	<10	<70	<4
Furo Boa Ventura (JK21)	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	10	<0,05	<8	<10	<70	<4
Valor Máximo Recomendável	50	5	50	-	-	-	1	50	-	-	50	50	-	20
Valor Máximo Admissível	-	-	-	-	100	-	-	-	-	0,1	200	200	1500	50

Quadro 8

Outubro 2004

NASCENTES	As (µg/L)	Cd (µg/L)	Pb (µg/L)	Co (µg/L)	Cu (µg/L)	Cr (µg/L)	Hg (µg/L)	Ni (µg/L)	Va (µg/L)	Zn (mg/L)	Al (µg/L)	Fe (µg/L)	F (µg/L)	Mn (µg/L)
Pedras	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	<10	<70	<4
Fonte Barro	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	<10	<70	<4
25 Fontes	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	12	<0,05	<8	<10	<70	<4
Empenas	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	<10	<70	<4
Eira do Serrado	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	<10	<70	<4
Ribeiro Frio	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	<10	<70	<4
Fonte do Geraldo	3,6	<0,5	<3	<7	<3	4	<0,7	<4	362	<0,05	14	<10	1617	<4
Fonte de S. Roque	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	4	<0,7	<4	30	<0,05	<8	13	75	<4
Galeria Fontes Vermelhas	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	<10	<70	<4
Galeria Porto Novo	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	13	<0,05	<8	<10	<70	<4
Galeria das Rabaças	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	12	<0,05	<8	<10	<70	<4
Galeria do Rabaçal	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	11	<0,05	<8	<10	<70	<4
Túnel da Levada do Seixal	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	13	<0,05	<8	<10	<70	<4
Túnel do Norte	<0,8	<0,5	<3	<7	8	<3	<0,7	<4	14	<0,05	<8	<10	<70	<4
Túnel 2 Tornos (2)	1,2	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	26	123	22
Túnel 2 Tornos (1)	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	15	<70	13
Furo 2 Socorridos (JK2)	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	11	<0,05	<8	14	75	<4
Furo 3 Socorridos (JK3)	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	<10	<0,05	<8	<10	<70	<4
Furo 2 Machico (JK7)	<0,8	<0,5	<3	<7	7	<3	<0,7	<4	18	<0,05	<8	<10	<70	<4
Furo 5 Machico (JK8)	<0,8	<0,5	<3	<7	<3	<3	<0,7	<4	15	<0,05	<8	<10	<70	<4
Valor Máximo Recomendável	50	5	50	-	-	-	1	50	-	-	50	50	-	20
Valor Máximo Admissível	-	-	-	-	100	-	-	-	-	0,1	200	200	1500	50

Avaliação da contaminação proveniente da agricultura nas águas subterrâneas da ilha da Madeira

A superfície agrícola, ocupada com bananeira, vinha, frutícolas e cultura arvense, vai até aos 700 m de altitude ocupando uma área de 6000 ha, o que corresponde a 8% da superfície da ilha. Esta superfície é irrigada desde a Primavera até ao princípio do Outono, consumindo cerca de 41 milhões m³/ano de água.

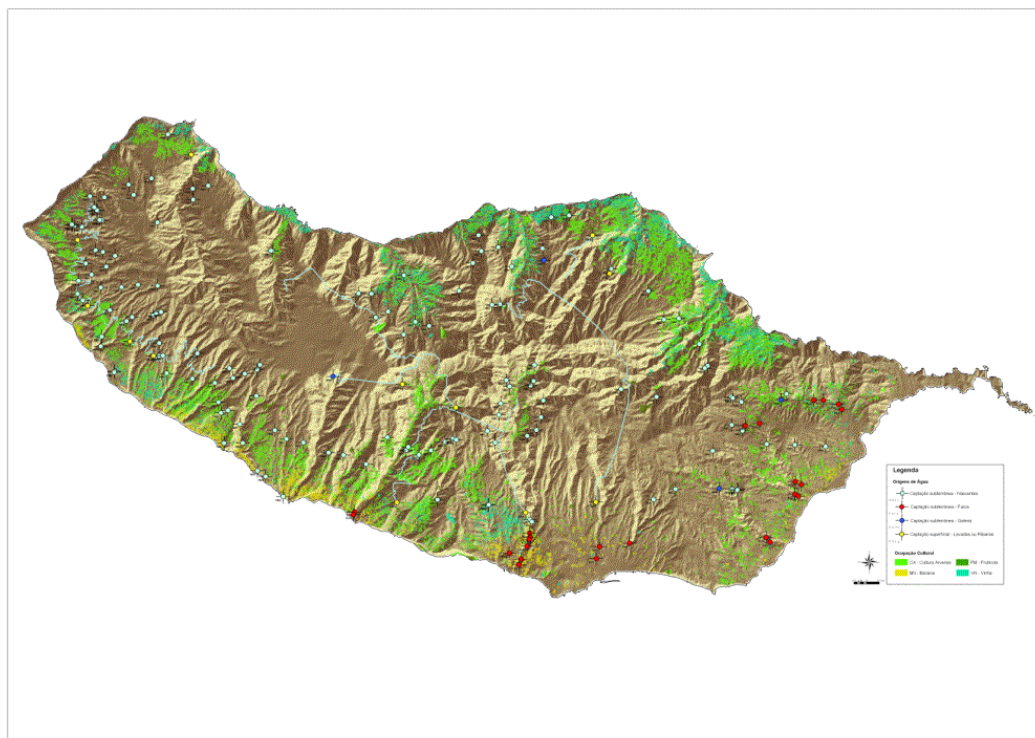


Figura 17 – Localização da área agrícola e das captações.

O sistema de rega predominante efectua-se por alagamento através de sistemas de levadas, uma particularidade da ilha que consiste num conjunto de canais utilizados para transportar a água desde a captção até ao local onde a água é necessária.

A utilização de pesticidas e fertilizantes na agricultura, nomeadamente os adubos azotados, constitui uma ameaça constante aos recursos hídricos naturais. A contaminação das águas subterrâneas dá-se na sequência da lixiviação desses compostos nos solos irrigados. A presença de nitratos em águas para consumo humano trás repercussões na saúde pública, uma vez que a sua toxicidade está relacionada com a redução de nitratos a nitritos no interior do corpo humano. Estes nitritos desempenham um papel importante na formação de metahemoglobina e nitrosaminas. A metahemoglobina é uma forma anormal de hemoglobina incapaz de transportar oxigénio. Quanto às nitrosaminas, resultam da reacção entre nitritos e aminas e são cancerígenas.

Uma vez que os nitratos são frequentemente apontados como um indicador da presença de pesticidas na água, determinámos a sua concentração nas águas subterrâneas da ilha, nomeadamente nos furos, galerias, túneis e nascentes destinados ao abastecimento público. As amostras foram analisadas no Laboratório Regional de Controlo da Qualidade da Água através de um autoanalisador de fluxo segmentado, desde 1992 a 2004.

Através dos resultados das análises de nitratos efectuadas a nascentes, galerias e túneis, verifica-se que todos os valores se encontram abaixo do valor máximo recomendável (VMR=25 mg/l). Este facto pode ser facilmente explicado devido à posição elevada das nascentes, e à posição afastada de zonas agrícolas no caso das galerias e túneis.

Quanto aos furos (figura 17), das 1023 amostras realizadas a nitratos, 883 estão abaixo do valor máximo recomendável, 133 encontram-se entre o valor máximo recomendável e o valor máximo admissível (VMA=50 mg/l), e 7 apresentam-se acima do valor máximo admissível. Como se pode ver no gráfico os valores entre o VMR e VMA (amarelo) limitam-se aos furos 1,2,4,5 e 6 dos Socorridos e ao furo de São João. É apenas no furo 5 e 6 dos

Socorridos que se encontram valores acima do VMA (vermelho). Todos os outros furos analisados tem valores abaixo do VMR (verde).

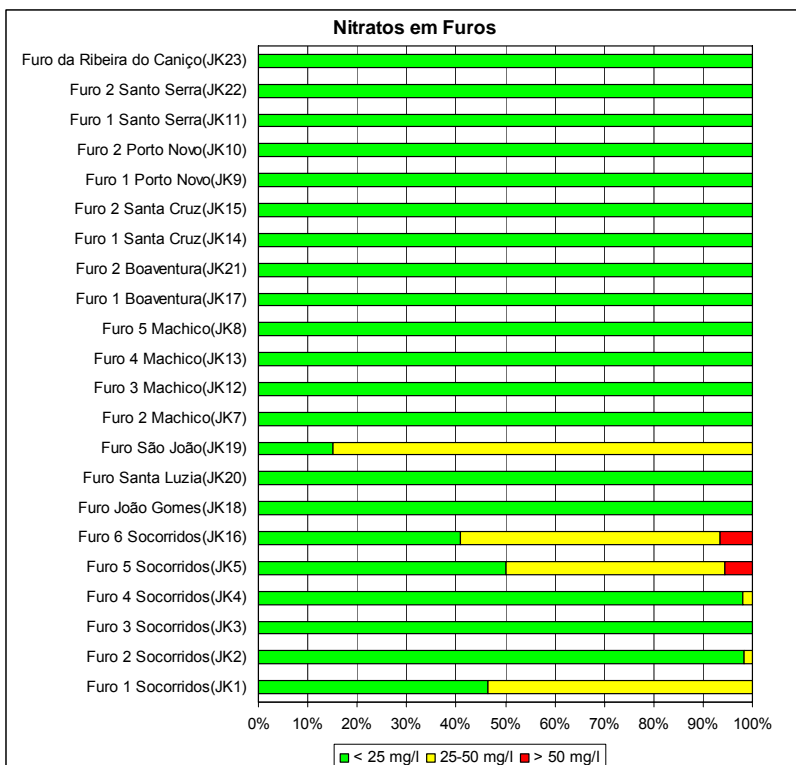


Figura 18 – Representação dos teores em nitratos nos furos

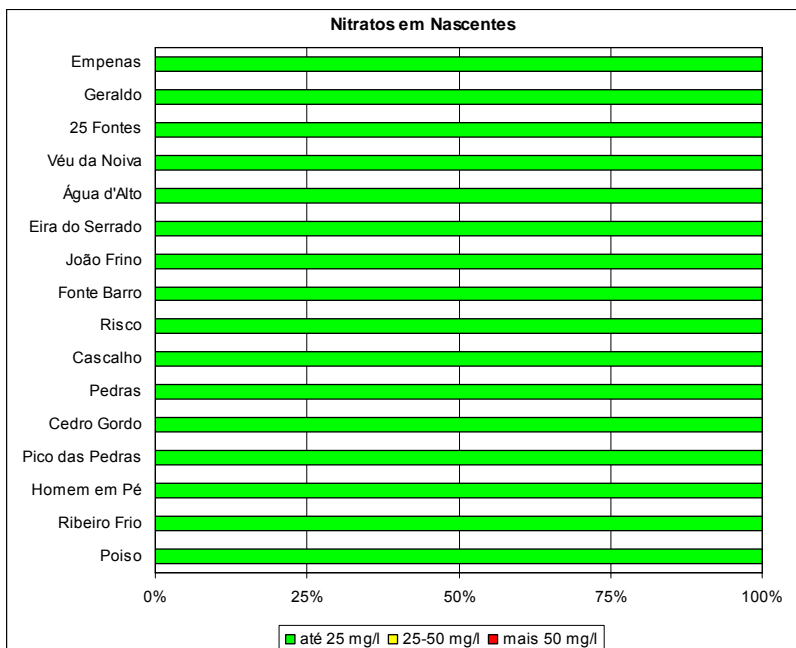


Figura 19 – Representação dos teores em nitratos em nascentes

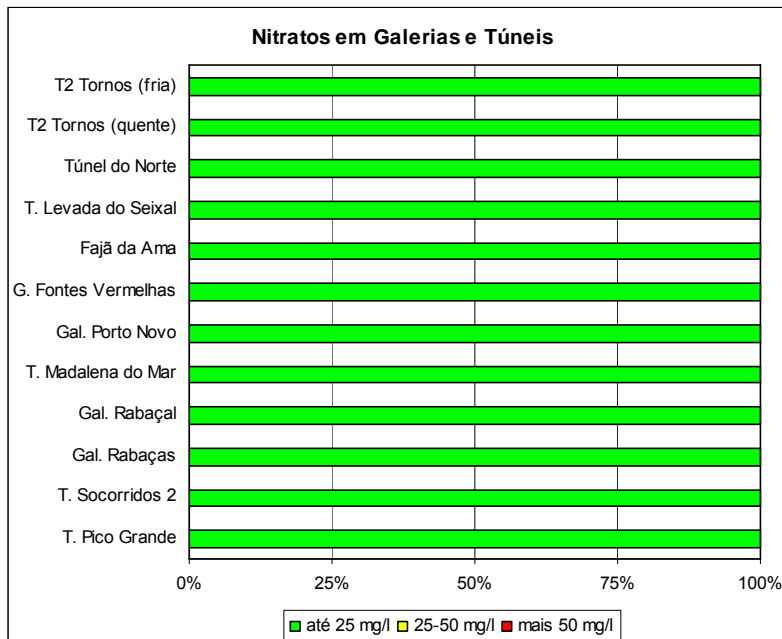


Figura 20 – Representação dos teores em nitratos em galerias e túneis

Os furos dos Socorridos situam-se no troço jusante da Ribeira dos Socorridos, bacia hidrográfica na qual se pratica agricultura (essencialmente bananeiras). Verifica-se que os valores acima do VMA ocorrem geralmente de Setembro a Novembro, altura em que se faz sentir o efeito da diminuição da recarga durante o Verão.

O furo de São João insere-se no centro da cidade do Funchal, e provavelmente os nitratos encontrados não se devem à agricultura, mas sim à poluição urbana, águas residuais, que advêm da intensa ocupação humana na cidade.

Verifica-se que as águas subterrâneas da ilha da Madeira se encontram muito pouco contaminadas por nitratos. Nas nascentes, galerias e túneis o teor de nitratos é sempre inferior ao valor máximo recomendável. Nos furos, são as ribeiras dos Socorridos e de São João que apresentam valores acima do valor máximo recomendável, e apenas na ribeira dos Socorridos ocorrem, esporadicamente, valores acima do valor máximo admissível.

Tempos Médios de Residência das Águas Subterrâneas

O trítio é o isótopo mais utilizado para identificar a presença de recarga moderna. É um isótopo de vida curta do Hidrogénio, com uma semi-vida de 12,43 anos. Por ser directamente incorporado na molécula de água, é o único radioisótopo que, na verdade data a água subterrânea. O trítio é produzido naturalmente por radiações cósmicas na alta atmosfera, embora a sua maior produção tenha ocorrido durante os testes atmosféricos de bombas termonucleares entre 1951 e 1980. Por volta de 1990, a maior parte deste trítio produzido por bomba tinha sido removido da atmosfera, e os seus níveis na precipitação global estão actualmente próximos dos níveis naturais. Durante as últimas três décadas, a presença de trítio termonuclear nas águas subterrâneas foi utilizada como uma evidência clara de recarga activa. Embora este isótopo possa ser encontrado nalgumas águas subterrâneas lentas, confia-se agora no sinal de ^3H natural para datar as águas subterrâneas modernas. As concentrações de trítio são expressas como unidades de trítio (TU), em que: $1\text{ TU} = 1\ ^3\text{H por } 10^{18}$ átomos de hidrogénio.

Os níveis naturais de trítio na precipitação são muito baixos, e representam um equilíbrio secular entre a produção natural e a combinação do decaimento na atmosfera com a perda para a hidrosfera e oceanos. Com a detonação atmosférica de engenhos termonucleares entre 1952 e 1962, as concentrações deste elemento aumentaram várias ordens de magnitude. Este *input* substancial contaminou os sistemas de precipitação global por mais de 40 anos. Apesar destes testes terem sido banidos em 1963, continuaram a ocorrer em menor quantidade até 1980. O último ano dos grandes testes, 1962, criou um grande pico que apareceu na chuva na Primavera de 1963. Este pico tornou-se um marcador utilizado em muitos estudos hidrogeológicos. Actualmente, e apesar de quantidades menores deste elemento serem lançadas para a atmosfera por centrais de energia nuclear, estações de

processamento de combustíveis nucleares, etc (com importância local), as concentrações deste isótopo voltaram em grande parte aos níveis cosmogénicos naturais.

Nas últimas três décadas desde os últimos testes nucleares, o trítio proveniente das detonações foi grandemente atenuado pelos oceanos, e os níveis actuais aproximam-se da produção atmosférica natural. Esta evolução da função de *input* mais a mistura nalguns aquíferos com águas subterrâneas pré-bomba, conspiram contra interpretações refinadas de idades de águas. A interpretação quantitativa dos tempos médios de residência da água subterrânea torna-se muito difícil, fazendo-se então uma interpretação qualitativa. No caso da Madeira por ser uma zona costeira e de baixa latitude, consideramos as seguintes correlações:

- <0,8 TU Submodernas – recarregadas anteriormente a 1952
- 0,8 a ~2 TU Mistura entre submodernas e recarga recente
- 2 a 8 TU Modernas (<5 a 10 anos)
- 10 a 20 TU Trítio residual “de bomba” presente
- >20 TU Componente considerável de recarga dos anos 60 ou 70

Quadro 9

Idade das águas subterrâneas da Madeira

NASCENTES	Data de	Teor em ³ H	idade de recarga
	Recolha	(T.U.)	
Pedras	08.10.03	1.9 ± 0.5	moderna
Fonte do Barro	08.10.03	2.5 ± 0.5	moderna
25 Fontes	08.10.03	2.1 ± 0.5	moderna
Empenas	09.10.03	1.8 ± 0.5	moderna
Fonte do Geraldo	24.10.03	3.6 ± 0.5	moderna
GALERIAS	Data de	Teor em ³ H	idade de recarga
	Recolha	(T.U.)	
Túnel Levada Seixal	08.10.03	1.6 ± 0.5	mistura submoderna/moderna
Gal Fontes Vermelhas	15.10.03	0.8 ± 0.5 F	mistura submoderna/moderna
Galeria do Porto Novo	15.10.03	1.1 ± 0.5	mistura submoderna/moderna
Túnel do Norte	15.10.03	0.7 ± 0.5 F	mistura submoderna/moderna
Galeria das Rabaças	30.10.03	1.3 ± 0.5	mistura submoderna/moderna
Túnel 2 dos Tornos	31.10.03	0.1 ± 0.5 F	submoderna
FUROS	Data de	Teor em ³ H	idade de recarga
	Recolha	(T.U.)	
Furo 1 Socorridos	04.11.03	1.6 ± 0.5	mistura submoderna/moderna
Furo 3 Machico	29.10.03	1.5 ± 0.6	mistura submoderna/moderna
Furo Santa Luzia	28.10.03	1.7 ± 0.5	mistura submoderna/moderna
Furo Porto Novo	28.10.03	3.0 ± 0.6	moderna

Disponibilidades Hídricas Subterrâneas

A avaliação das disponibilidades hídricas subterrâneas foi efectuada a partir da aplicação do modelo de Escoamento/Recarga de AZEVEDO *et al.* (2002) que estima as componentes de infiltração e escoamento em ilhas vulcânicas a partir dos valores de superavit hídrico resultante do balanço hidrológico sequencial que envolve as variáveis precipitação, evapotranspiração real e variação da reserva de água no solo. As variáveis climatológicas utilizadas no balanço, nomeadamente os valores de precipitação e da evapotranspiração são estimados a partir do modelo *CIELO* (CLIMA INSULAR À ESCALA LOCAL) de Azevedo (1996).

Esta metodologia foi aplicada, com sucesso, no arquipélago dos Açores que é formado por um conjunto de ilhas vulcânicas, algumas das quais, com muitas semelhanças com a ilha da Madeira.

O modelo Escoamento/Recarga traduz-se pela seguinte equação:

$$H = SH \left[a + b \left(\frac{D_d}{D_{d_{\max}}} \right) \right]$$

em que são

- H – escoamento anual
- SH – superavit hídrico anual;
- D_d – densidade de drenagem da bacia hidrográfica;
- $D_{d_{\max}}$ – densidade de drenagem máxima das bacias hidrográficas em estudo;
- a e b – parâmetros a estimar.

O modelo fundamenta-se nas seguintes considerações ou pressupostos que consideram que a e b deverão ser positivos:

- ✓ sempre que existe superavit hídrico ($SH \geq 0$) está garantido um escoamento residual que é mínimo quando a densidade de drenagem é nula ($D_d = 0$);
- ✓ quando a densidade de drenagem é máxima ($D_d = D_{d_{\max}}$) o escoamento varia linearmente com o superavit hídrico;
- ✓ entre esses dois limites, o escoamento varia em função da densidade de drenagem e do superavit hídrico;
- ✓ quando o superavit hídrico é nulo não existe escoamento.

Da aplicação deste modelo à ilha da Madeira obtém-se uma recarga anual média de 363 mm.

Dado que se estimaram as seguintes descargas subterrâneas anuais médias:

1. extracções directas a partir de túneis, galerias e furos: 94 mm;
2. descarga de nascentes não incluídas nas levadas, captadas directamente para o abastecimento, PARADELA (1980): 15 mm;
3. escoamento subterrâneo e hipodérmico estimado para a rede hidrográfica: 202 mm;
4. e ainda, existência de uma parcela de escoamento subterrâneo não contabilizada nas estações hidrométricas, pois o escoamento observado na foz das ribeiras durante o verão é, claramente, superior à diferença entre o escoamento subterrâneo e hipodérmico estimado menos o captado e transportado pelas levadas ($202 - 141 = 61$ mm); considerando, assim, que o escoamento subterrâneo e hipodérmico estimado possa estar subavaliado e que por hipótese corresponda apenas a 90% do real, então a parcela em questão será de $225 - 202 = 23$ mm, valor que se aproxima do caudal médio encontrado nas ribeiras ($61 + 23 = 84$ mm), assim disponibilidades hídricas subterrâneas serão:

$$363 - 94 - 15 - 202 - 23 = 29 \text{ mm}$$

O montante disponível, de 29 mm, calculado a partir da recarga proveniente da precipitação anual média, afigura-se claramente baixo, não sendo coerente com as condições e características hidrodinâmicas e hidroquímicas observadas no aquífero de base da ilha da Madeira. O facto, ainda, de a avaliação do balanço hídrico do Paul da Serra, mostrar que a recarga obtida apenas a partir da chuva não é suficiente para satisfazer a descarga subterrânea daquele maciço, e ainda, os elevados valores de precipitação proveniente dos nevoeiros obtidos sob uma *Erica arborea* L. na Bica da Cana, leva a assumir que a recarga na ilha da Madeira é complementada por uma importante parcela de água proveniente dos nevoeiros sob a forma de precipitação oculta.

Definição de medidas de protecção de furos e galerias de captação de água para consumo humano

Apesar de ser inquestionável a importância que as águas subterrâneas assumem, em termos de quantidade, não só para o abastecimento público como privado, nem sempre é tida em conta essa importância na manutenção da sua qualidade natural. Na realidade, poucos são os países que adopta políticas de protecção das águas subterrâneas em relação à poluição e à sobreexploração.

Apesar de melhor protegidas que as águas superficiais, as águas subterrâneas, quando alcançadas por poluentes recuperam a sua qualidade mais dificilmente e de forma mais dispendiosa, sendo igualmente dispendioso o desenvolvimento de recursos alternativos. Para além disso, quando um aquífero fica seriamente contaminado torna-se muito difícil restabelecer a sua qualidade natural, mesmo que a fonte poluente já esteja inactiva. A agravar, a poluição de um aquífero é normalmente afectada muito tempo depois de se iniciar o fenómeno de poluição, altura em que o volume de formação aquífera afectada é considerável.

Uma das formas mais antigas de proteger uma captação de água subterrânea é restringir a utilização do terreno envolvente. Actualmente, os perímetros de protecção das captações são a ferramenta de protecção de aquíferos mais utilizada em todo o mundo, na tentativa de evitar elevados custos e demoras associados à recuperação das águas subterrâneas, mas também com a necessidade de proteger e garantir a sua qualidade longo prazo, de modo a assegurar-las para as futuras gerações.

O Perímetro de Protecção

Um perímetro de protecção não é mais que a área de superfície e subsuperfície envolvente de uma ou mais captações destinadas ao abastecimento público, onde as actividades susceptíveis de alterar a qualidade da água subterrânea, são limitadas, proibidas, ou regulamentadas de modo progressivo (*i.e.* as restrições diminuem com o aumento da distância à captação). Os limites da zona de protecção são definidos de modo a que os potenciais poluentes que alcancem a água subterrânea, na fronteira da zona de protecção ou fora dela, se degradem ou se tornem inofensivos antes de alcançarem a captação.

Como poluente entende-se substância ou forma de energia estranha à composição natural da água, capaz de alterar a sua qualidade e prejudicar as suas utilizações posteriores ou a sua função ecológica.

A delimitação dos perímetros de protecção em torno de uma captação pretende alcançar os seguintes objectivos:

1. evitar a chegada de substâncias poluentes à captação, devido a (1) variações do fluxo de água subterrânea como consequência de variações na extracção de água na captação, (2) eventuais descargas ou deposições, acidentais ou não, em zonas mais vulneráveis, e (3) infiltração de águas pluviais ou excedentes de águas de rega e de lavagem;
2. assegurar a atenuação do poluente durante o seu percurso entre o foco de poluição e a captação, por actuação dos processos naturais de diluição e de autodepuração;
3. recorrer, atempadamente, a fontes de abastecimento alternativas, em caso de descargas acidentais de poluentes que coloquem em perigo o sistema de abastecimento público;
4. garantir a protecção das águas subterrâneas no interior da zona de contribuição da captação.

De um modo geral, as zonas englobadas num perímetro de protecção são as seguintes:

Zona de protecção imediata ou de restrições absolutas (Zona 1)

- Zona contígua à captação.
- No seu interior é proibido qualquer tipo de actividade e/ou instalação, excepto as que se prendem com o funcionamento da captação. O mais indicado é que seja propriedade do operador da captação, que deverá controlar cuidadosamente todas as actividades relacionadas com a extracção de água, de modo a evitar qualquer possibilidade de poluição.
- Tem que estar vedada de modo a impedir o acesso a pessoas não autorizadas, e o terreno tem que ser mantido limpo de resíduos de modo a evitar a infiltração de substâncias poluentes.
- Na delimitação pode ser utilizado um critério temporal, nomeadamente um tempo de propagação (tempo que decorre entre a entrada da substância no aquífero e a sua saída ou extracção) de 24 horas (ITGE, 1991), ou uma área fixa de pequena extensão (como acontece na legislação portuguesa).

Zona de protecção intermédia ou de restrições máximas (zona 2)

- Zona que envolve a anterior.
- A sua função é a de proteger o aquífero contra a poluição microbiológica (bactérias, vírus, etc.), favorecendo a sua diluição ou eliminação, antes de alcançar a captação.
- Deve permitir, após ser detectada a poluição, um tempo de resposta suficiente para que sejam tomadas as medidas necessárias antes do poluente atingir a captação.
- O seu dimensionamento utiliza normalmente um critério temporal (*e.g.* 50dias).

Zona de protecção alargada ou de restrições moderadas (zona 3)

- Zona que envolve a anterior.
- A sua função é a de proteger a captação da poluição de grande persistência, ou seja, de difícil atenuação (*e.g.* poluição química não degradável ou poluição radioactiva).
- Deve permitir, após ser detectada a poluição, um tempo de reposição suficiente para que seja encontrada uma fonte de água alternativa para consumo humano.
- O critério utilizado na sua delimitação pode ser temporal (aproximadamente 10 anos) ou hidrogeológico, englobando neste caso a área de recarga da captação.

Zona de protecção especial

- Zona que assume maior importância no caso de aquíferos cársicos ou fracturados.
- Delimita áreas mais afastadas, localizadas fora do perímetro de protecção, mas que apresentam conexão hidráulica com a captação devido à existência de condutas ou fissuras.
- As restrições nesta zona são equivalentes às da zona de protecção imediata. A sua definição deve ser antecedida em ensaios com traçadores.

Zona de protecção perante a intrusão salina

- Zona definida em regiões costeiras.
- São restringidos os caudais extraídos que conduzam a uma eventual degradação da qualidade da água subterrânea, devido ao avanço da cunha salina em direcção ao aquífero.

Zona de protecção da quantidade

- Zona onde devem ser controlados os volumes de água subterrânea extraídos, de modo a garantir a sua quantidade.

Enquadramento Legislativo do Perímetro de Protecção em Portugal

Em Portugal, a definição das dimensões dos perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas está actualmente legislada no Decreto-lei 382/99, de 22 de Setembro de 1999, que estabelece as normas e os critérios de delimitação dos *perímetros de protecção* de captações de águas subterrâneas, com a finalidade de proteger a qualidade das águas captadas. Este Dec.-Lei:

- obriga à definição da zona de protecção imediata em todas as captações destinadas ao abastecimento público, e à definição de todas as zonas de protecção previstas no Decreto-lei, em captações destinadas ao abastecimento público de aglomerados populacionais superiores a 500 habitantes ou cujo caudal de exploração seja superior a 100 m³/dia.
- refere que a definição das zonas de protecção deve ter como base estudos hidrogeológicos e económicos que permitam definir as características do aquífero, as condições da captação e os caudais de exploração; caso não se torne possível a realização desses estudos, pode recorrer-se ao método do raio fixo calculado ou a outro método considerado mais adequado.
- refere zonas de protecção especial, nomeadamente no caso de aquíferos carsificados ou fissurados, e também no caso de zonas costeiras, contra o avanço da cunha salina.
- interdita ou condiciona, em cada uma das zonas de protecção, as actividades e instalações susceptíveis de contaminar as águas subterrâneas.

Aplicação da metodologia de delimitação da área de protecção aos furos de captação da ilha da Madeira

Na Ilha da Madeira existem 23 furos de captação de água para consumo humano, dos quais 2 não estão a ser explorados. Face à crescente ocupação dos espaços ao longo das margens das ribeiras com diversos tipos de actividades (ocupação urbana, ocupação agrícola, extracção de inertes e outros materiais para construção civil, etc.), que contribuem para a degradação da qualidade da água, torna-se premente proceder à implementação de medidas de protecção dos furos e galerias, tendo em vista a preservação da qualidade das águas armazenadas nos aquíferos. Assim, a IGA deu início em 2001 a um estudo de “delimitação de perímetros de protecção dos furos de captação de água para consumo humano”.

Os perímetros significam a definição de áreas na vizinhança dessas captações, onde se estabelecem restrições de utilidade pública ao uso e transformação do solo em função das características pertinentes às formações geológicas que armazenam as águas, como forma de salvaguardar a protecção da respectiva qualidade.

No essencial, os perímetros de protecção das captações de águas subterrâneas visam prevenir, reduzir e controlar a poluição das águas subterrâneas por infiltração de águas pluviais lixiviantes e de águas excedentes de rega e de lavagens, bem como potenciar os processos naturais de diluição e de autodepuração das águas subterrâneas, prevenir, reduzir e controlar as descargas acidentais de poluentes e ainda proporcionar a criação de sistemas de aviso e alerta para a protecção dos sistemas de abastecimento de água com origem nas captações de águas subterrâneas, em situações de poluição acidental dessas águas.

Os serviços contratados incidiram sobre 23 furos de captação e incluem as seguintes actividades:

- i) Caracterização das condições geo-estruturais consideradas influentes na recarga e na exploração dos Recursos Hídricos Subterrâneos de cada uma das captações existentes, utilizando-se para o efeito, a análise e a interpretação fotogeológica e o reconhecimento de campo.
- ii) Definição dos limites do sistema aquífero, da geometria e do modelo conceptual, dos parâmetros hidráulicos (transmissividade, velocidade de fluxo, tempo de trânsito na zona não saturada e na saturada, etc.) pretendendo-se a valorização do circuito de alimentação com base nas características hidrodinâmicas.
- iii) Estabelecimento de critérios específicos para a definição da delimitação dos perímetros de protecção, os quais terão como base fundamental as características geológico-estruturais e hidrogeológicas locais e regionais das formações do complexo vulcânico, as condições de recarga e do funcionamento hidráulico dos sistemas de aquíferos captados, a vulnerabilidade e os riscos de poluição, etc.
- iv) Determinação da distância correspondente a um tempo de transporte que será proposto como limite da área de protecção das zonas intermédias.
- v) O cálculo do poder depurador das formações em relação com os poluentes será relacionado com o conceito de vulnerabilidade e esta definida segundo o método designado DRASTIC, estabelecendo-se classes de valores e traçando-se estratégias que assegurem a valorização ambiental do aquífero captado.
- vi) Elaboração de perfis hidrogeológicos necessários à compreensão da percolação aquífera subterrânea (incidência de factores litológicos, geomorfológicos e estruturais).
- vii) Delimitação para cada furo de captação, do perímetro de protecção das Zonas imediata, intermédia e alargada, com definição das respectivas coordenadas, representação cartográfica e cálculo das áreas de cada perímetro.

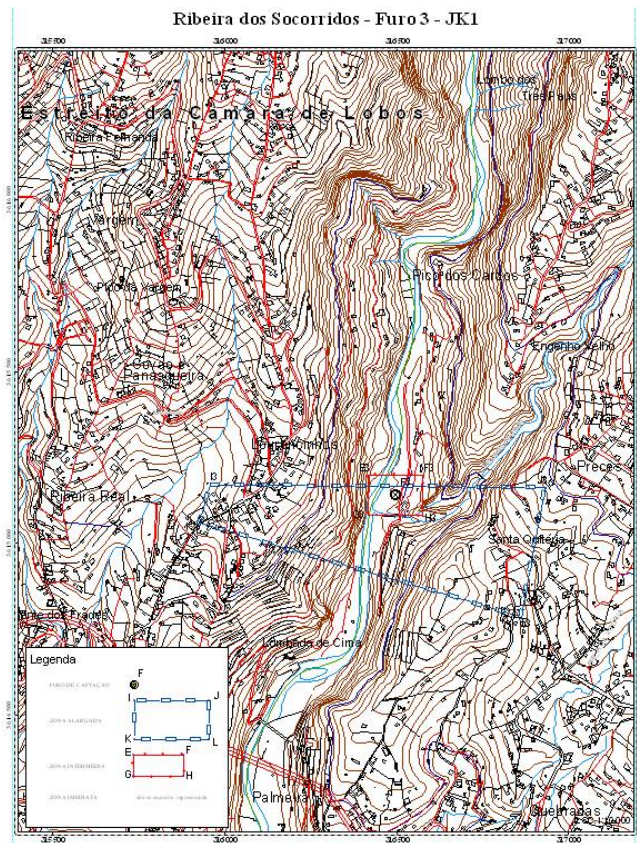


Figura 21 – Perímetro de protecção do furo 3 da Ribeira dos Socorridos



Figura 22 – Furo 3 da Ribeira dos Socorridos

Conclusões

A Madeira é um exemplo de magmatismo oceânico intraplaca, consensualmente considerada um “hot-spot” (ponto quente) cuja actividade teve início antes do Miocénico superior, há mais de 5,6 Ma, tendo-se prolongado até há 6 000/ 7 000 anos BP. Os trabalhos de campo mais recentes permitiram definir sete unidades geológicas principais. Durante a abertura recente dos túneis da Encumeada (rodoviário e hidráulico) e da galeria da Fajã da Ama foram encontradas, associadas a falhas, saídas de águas termais contendo teores elevados de CO₂ livre. A persistência dos gases parece indicar não se tratar de gases acumulados nas rochas, mas sim de manifestações secundárias de vulcanismo.

Apesar de insuficiente para explicar a totalidade da variabilidade espacial da precipitação, a altitude é o primeiro parâmetro a considerar, tendo-se constatado que a variação da precipitação com a altitude não era linear e que dependia da orientação das vertentes.

Propõe-se a decomposição do escoamento que ocorre em cada secção da rede hidrográfica em duas parcelas: uma que afluí à rede hidrográfica em consequência directa da precipitação ocorrida sobre a bacia hidrográfica e que se desloca à superfície do terreno; outra proveniente das reservas subterrâneas e do escoamento hipodérmico contribuindo também para o escoamento observado naquela secção.

A partir dos ensaios de bombeamento realizados nos furos de captação, que permitiram conhecer o domínio litoral da ilha, dos registos dos caudais das galerias e nascentes, que possibilitaram analisar o hidrodinamismo do domínio de altitude, dos dados hidroquímicos e isotópicos obtidos, elaborou-se o seguinte modelo hidrogeológico para a ilha da Madeira:

1- Existência de aquíferos suspensos em altitude, relacionados com níveis impermeáveis, do tipo tufos, escoadas argilificadas, níveis de cozimento em paleossolos ou basaltos alterados e depósitos freatomagmáticos, caracterizados por águas mais frias, pouco mineralizadas, com pH ácidos e fácies frequentemente cloretadas. São muito vulneráveis às variações do clima, variando os seus caudais ao longo do ano hidrológico, consoante a recarga, chegando mesmo, alguns deles, a esgotar.

2 – Existência de um nível de saturação regional ou aquífero de base. Este aquífero possui características distintas, consoante a formação vulcânica. Assim, em materiais do Complexo Principal, o aquífero caracteriza-se por fortes transmissividades, gradientes piezométricos baixos e águas medianamente mineralizadas. Por outro lado, em formações do Complexo Antigo, na maioria, muito alteradas, onde se encontram basaltos já argilificados e piroclastos transformados em tufos, o aquífero caracteriza-se por transmissividades mais baixas, águas mais mineralizadas e gradientes piezométricos mais elevados.

3 – Existência de aquíferos compartimentados. Em virtude do vulcanismo na Madeira ser essencialmente do tipo fissural, todo o edifício vulcânico está intensamente cortado por filões subverticais que compartimentam o aquífero de base. Daí resulta que o nível de saturação geral da ilha não seja uma linha contínua, mas, sim, quebrada pelos filões, com variações bruscas de potencial entre alguns compartimentos contíguos.

A maior parte das águas são águas frias, existindo um grupo de cinco águas termais emergentes em falhas, no Complexo Antigo, com características muito próprias, bastante distintas das restantes.

A distribuição espacial da condutividade revela um aumento da mineralização das águas com a profundidade e proximidade do mar, reflectindo, a crescente influência dos principais mecanismos mineralizadores das águas, a hidrólise dos minerais silicatados das rochas e a contaminação por sais de origem marinha. Caracterizam-se, em geral, por baixas mineralizações, com condutividades eléctricas que vão desde os 33 até aos 501 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sendo as águas termais bastante mais mineralizadas, com condutividades eléctricas que vão desde os 594 aos 3300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Quanto à qualidade da água para consumo humano, verifica-se que a generalidade das águas subterrâneas amostradas são, em relação aos elementos maiores, de boa qualidade para consumo humano (dentro do VMR).

A avaliação das disponibilidades hídricas subterrâneas mostra claramente que a recarga se encontra subavaliada dado não ter sido considerada a contribuição da precipitação oculta. A parcela de recarga proveniente da chuva não é suficiente para manter as condições de equilíbrio entre a recarga e a descarga observadas no aquífero de base, sendo a recarga complementada por água proveniente dos nevoeiros e retida pela vegetação. Pela sua importância, sugere-se que sejam dedicados à precipitação oculta estudos mais aprofundados com vista à sua integração num futuro balanço hídrico permitindo assim avaliar com maior rigor as reservas hídricas da ilha da Madeira.

Bibliografia

- Almeida, C.; Romariz, C., Silva, M.O. (1984) Hidroquímica da ilha da Madeira. *Recursos Hídricos*, 5(13) 33-42.
- Azevedo E., Rodrigues, A., Diogo P., Rodrigues M. (2002) Infiltração e escoamento em pequenas ilhas vulcânicas. Aproximação genérica à quantificação da infiltração e do escoamento nas ilhas dos Açores. VI Congresso da Água. Porto 2002.

- Capelo, J., Sequeira, M., Jardim, R., Costa, J. C. 2004. Guia da Excursão Geobotânica dos V Encontros ALFA 2004 à Ilha da Madeira in Capelo, J. 2004. A paisagem vegetal da Ilha da Madeira; *Quercetea* 6: 5, 9 – 15.
- Cruz, J.V. (2001) Recursos Subterrâneos. Plano Regional da Água da Região Autónoma dos Açores. Relatório Técnico-Científico 03/DGUA/01, Centro de Geologia Ambiental, DG/UA, Ponta Delgada, 453 p.
- Ferreira A. (1955) O clima de Portugal. Açores e Madeira, INMG, Fasc VIII, 64pp.
- Ferreira M., Macedo, C. & Ferreira, J. (1988) K-Ar geochronology in the Selvagens, Porto Santo and Madeira islands (Eastern Central Atlantic): A 30 m.y. spectrum of submarine and subaerial volcanism.
- Fonseca P., Madeira J., Serralheiro A., Rodrigues C., Prada S. & Nogueira C. (2000) Dados geológicos preliminares sobre os alinhamentos tectónicos da ilha da Madeira. Actas das Comunicações apresentadas à 2ª Assembleia Luso Espanhola de Geodesia e Geofísica, Lagos, Fevereiro de 2000.
- Gaspar M. A. e Portela, M. M. (2002), "Contribuição para a caracterização dos recursos hídricos na ilha da Madeira. Modelos para avaliação do escoamento superficial". 6º Congresso da Água, Porto, 2002.
- Geldmacher J, P van den Bogaard, Hoernle, Schmincke (2000) Ar age dating of the Madeira Archipelago and hotspot track (eastern North Atlantic). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 1, paper number 1999GC000018, February 2000.
- Mata J., (1996) Petrologia e Geoquímica das lavas da ilha da Madeira: implicações para os modelos de evolução mantélica. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Geologia, Lisbon University, 471 pp.
- Paradela P. (1980) Hidrogeologia Geral das Ilhas Adjacentes. Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, Tomo 66, 241-256.
- Portela M. M., Gaspar M. A. e Hora, G. R. (2002) Avaliação do escoamento anual médio na ilha da Madeira, *Tecnologia da Água*, Edição II, 50-58.
- Prada S (2000) Geologia e Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Geologia. Universidade da Madeira: 351 pp.
- Prada S & Serralheiro A (2000) Stratigraphy and Evolutionary Model of Madeira Island. *Bocagiana* 200: 13 pp. Museu Municipal Funchal (Madeira).
- Prada S & Silva M (2001) Fog Precipitation on the Island of Madeira (Portugal). *Environmental Geology* 41 (3-4), 384 - 389.
- Prada S, Nunes A, Perestrelo A, (2004) Impacto da agricultura na qualidade das águas subterrâneas da ilha da Madeira. Póster apresentado no IV Congresso Ibérico de Gestão e Planificação da Água. 8 a 12 de Dezembro, Tortosa.
- Prada S, Figueira C, Perestrelo A, (2004) Importância de uma adequada gestão florestal no incremento dos recurso hídricos subterrâneos da ilha da Madeira. Póster apresentado no IV Congresso Ibérico de Gestão e Planificação da Água. 8 a 12 de Dezembro, Tortosa.
- Prada S, Silva MO, Cruz JV (2005) Groundwater behaviour in Madeira, volcanic island (Portugal). *Hidrogeology Journal*
- Schminke H.-U. (1982) Volcanic and chemical evolution of the Canary islands. In: *Rad, U. Von et al. eds: Geology of the northwest african continental margin: 273-305. Springer-Verlag.*