



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CONFIDENCIAL

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE
Núcleo de Águas Subterrâneas

Proc. 0607/1/17171

ANÁLISE E PARECER SOBRE A SITUAÇÃO AMBIENTAL NAS ÁREAS DE CAPTAÇÃO DOS FUROS DE ABASTECIMENTO DO CONCELHO DE PRAIA DA VITÓRIA – AÇORES

Relatório final das águas subterrâneas

Estudo realizado para a Câmara Municipal
da Praia da Vitória.

Lisboa • Dezembro de 2010

I&D HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO 424/2010 – NAS

Análise e Parecer sobre a Situação Ambiental nas Áreas de Captação dos Furos de Abastecimento do Concelho de Praia da Vitória – Açores

Relatório Final da Avaliação das Águas Subterrâneas

RESUMO

O presente Estudo foi desenvolvido para a Câmara Municipal da Praia da Vitória pelos Departamentos de Hidráulica e Ambiente e de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), entre Maio de 2009 e Dezembro de 2010.

Este Relatório Final é relativo às águas subterrâneas. Apresentam-se as conclusões do Estudo nessa vertente, nele se definindo o estado actual da qualidade e da quantidade das águas subterrâneas e perspectivas de evolução futura, interligando-os com os resultados e as conclusões dos relatórios finais da avaliação da qualidade dos solos e da prospecção geofísica.

Este relatório foi estruturado no seguinte conjunto de capítulos: (1) Objectivos e âmbito do estudo, (2) Área de estudo; (3) Clima; (4) Orografia; (5) Coberto vegetal; (6) Geologia; (7) Hidrografia; (8) Hidrogeologia; (9) Focos de poluição na área de estudo; (10) Modelação numérica do escoamento de águas subterrâneas; (11) Vulnerabilidade dos aquíferos à poluição; (12) Qualidade das águas subterrâneas; (13) Conclusões e recomendações.

Os trabalhos de caracterização da situação ambiental na área do concelho de Praia da Vitória, agora apresentados, tiveram por base a análise e a interpretação de um vasto conjunto de nova informação recolhida ao longo de um ano e meio de intenso trabalho, incluindo novos dados de caracterização litológica de logs (com seis novos furos no aquífero basal e dez novos piezómetros), de prospecção geofísica (40 perfis de resistividade eléctrica em 32 alinhamentos), de medição de características hidráulicas (sete ensaios de caudal e centenas de medições do nível piezométrico) e de qualidade das águas subterrâneas (11 610 análises químicas efectuadas em 54 pontos de água em diversos períodos). A informação foi ainda trabalhada num modelo numérico de escoamento para permitir compreender e justificar os resultados obtidos e para analisar possíveis cenários de evolução da situação actual.

A caracterização do estado ambiental das áreas estudadas permitiu analisar as situações principais de risco, com vista a virem a ser definidas, num futuro estudo, medidas de mitigação e de recuperação apropriadas.

Analysis and Technical Report about the Environmental Situation of *Praia da Vitória* County Supply Wells, Terceira Island, Azores

Final Report

ABSTRACT

This Study was developed for Câmara Municipal da Praia da Vitória by the Hydraulics and Environment Department together with the Geotechnique Department of the Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC (National Laboratory for Civil Engineering) between May 2009 and December 2010.

This Final Report is focused on the groundwater situation, presenting the conclusions of the Study, namely the present groundwater quality and quantity status, and their prospective future evolutions, under an integrative framework that incorporates the results and conclusions presented on the final reports dealing with the evaluation of soil quality and geophysical prospection studies.

This report has the following structure: (1) Objectives and scope of the study, (2) Location of the study area, (3) Climate, (4) Orography, (5) Vegetation and land cover, (6) Geology (7) Hydrography, (8) Hydrogeology, (9) Pollution sources in the study area, (10) Mathematical modeling concerning groundwater flow, (11) Aquifer vulnerability to pollution, (12) Groundwater quality, (13) Conclusions and recommendations.

The characterization of Praia da Vitoria municipality environmental conditions, here presented, was built upon the analysis of a wide array of new information, including new data from the lithological interpretation of logs (pertaining to 6 new wells in the basal aquifer and 10 new piezometers), data from the geophysical prospection (40 resistivity profiles in 32 alignments), data from measurements of hydraulic characteristics (7 pumping tests and hundreds of piezometric level measurements) and data concerning groundwater quality (11 610 chemical analysis on 54 monitoring points, spanning over one year time period). The information gathered was also integrated into a numerical groundwater flow model, and interpreted, in order to understand and to validate the field data, and evaluate possible evolution scenarios for the present situation.

The characterization of the environmental conditions of the studied area allowed the analysis of the main risk situations, in order to ascertain, in a future study, the adequate mitigation and recovery measures.

Analyse et Avis Technique sur la Situation Environnementale des Puits de Bombage de la Municipalité de *Praia da Vitória*, Île Terceira, Azores

Rapport Final de l'Évaluation des Eaux Souterraines

SOMMAIRE

Cette étude a été développée pour la Mairie de *Praia da Vitória* par les Départements d'Hydraulique et Environnement et de Geotechnie du Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), entre mai 2009 et Décembre 2010.

Ce Rapport Final concerne les eaux souterraines. Il présente les conclusions de l'étude le long de ces lignes, en définissant l'état actuel de la qualité et la quantité des eaux souterraines et les perspectives de développements futurs, en les reliant avec les résultats et les conclusions des rapports finals de l'évaluation de la qualité des sols et de la prospection géophysique.

Ce rapport a été structuré de l'ensemble de chapitres suivantes: (1) Objectifs et portée de l'étude, (2) Zone d'étude, (3) Météo (4); Orographie, (5) Couvert végétal, (6) Géologie, (7) Hydrographie; (8) Hydrogéologie, (9) Aires de pollution dans la zone d'étude (10) Modélisation numérique de l'écoulement des eaux souterraines; (11) Vulnérabilité des aquifères à la pollution; (12) Qualité des eaux souterraines; (13) Conclusions et recommandations.

Les travaux sur la caractérisation de la situation environnementale dans le domaine de la municipalité de Praia da Vitoria, aujourd'hui présenté, étaient fondées sur l'analyse et l'interprétation d'un large éventail de nouvelles informations recueillies au cours d'une année et demi de travail intense, y compris les données de caractérisation de nouveaux lithologiques journaux (avec six nouveaux trous dans l'aquifère de fond et des piézomètres dix), la prospection géophysique (40 profils de résistivité électrique en 32 alignements), la mesure des caractéristiques hydrauliques (sept essais de pompage et des centaines de mesures du niveau piezometric) et qualité des eaux souterraines (11 610 analyses chimiques effectuées dans 54 points d'eau à différentes périodes). Ces informations ont également été mélangées dans un modèle numérique pour l'écoulement qui a permis de comprendre et de justifier les résultats et d'analyser les scénarios possibles pour l'évolution de la situation actuelle.

La caractérisation de l'état écologique des zones étudiées ont permis d'analyser les principales zones de risque afin d'en arriver à définir dans une future étude, les mesures d'atténuation et de récupération appropriées.

NOTA TÉCNICA

O presente relatório faz parte integrante de um conjunto de documentos elaborados para a Câmara Municipal da Praia da Vitória no âmbito do Estudo intitulado "Análise e Parecer Sobre a Situação Ambiental nas Áreas de Captação dos Furos de Abastecimento do Concelho de Praia da Vitória – Açores", desenvolvido pelos Departamentos de Hidráulica e Ambiente e de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), entre Maio de 2009 e Dezembro de 2010.

De acordo com o Plano de Trabalhos foram desenvolvidas diversas componentes tendo sido elaborados o seguinte conjunto de relatórios finais:

1. "Análise e Parecer Sobre a Situação Ambiental nas Áreas de Captação dos Furos de Abastecimento do Concelho de Praia da Vitória – Açores - Relatório Final da Avaliação das Águas Subterrâneas" (o presente Relatório).
2. "Prospecção Geofísica, pelo Método da Resistividade Eléctrica, no Concelho de Praia da Vitória, Açores" (R. Mota e M.E. Novo, 2010).
3. "Análise e Parecer Sobre a Situação Ambiental nas Áreas de Captação dos Furos de Abastecimento do Concelho de Praia da Vitória – Açores - Avaliação da Caracterização da Contaminação de Solos Junto a Potenciais Focos de Poluição" (C. Jorge, 2010).

São, ainda, parte integrante dos documentos finais os seguintes anexos:

- **Anexo 1** – Novo, M.E. (2010) - "Descrição Geológica Detalhada das Colunas Litológicas obtidas nas Carotes dos Novos Piezómetros", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, NAS/DHA, 113 p.
- **Anexo 2** – Oliveira, N.P. (2010) - "Realização de Sondagens para Recolha de Amostras de Solos e Posterior Instalação de Piezómetros no Aquífero Superficial da Região do Graben das Lajes - Concelho de Praia da Vitória, Ilha Terceira – Açores". Direcção de Fundações e Geotecnia da Mota-Engil, 91 p.
- **Anexo 3** – Morais, J. (2010a) - "Relatório de Ensaios – Amostragem e Análise de Águas Subterrâneas". AmbiPar Control, L^{da}., 254 p.
- **Anexo 4** – Morais, J. (2010b) - "Relatório de Ensaios – Amostragem e Análise de Solos". AmbiPar Control, L^{da}., 88 p.
- **Anexo 5** – Aqualis (2010) – "Instalação de Furos e Piezómetros no Concelho de Praia da Vitória, Ilha Terceira – Açores". Aqualis L^{da}.

O trabalho foi desenvolvido em articulação com as diferentes equipas de trabalho e contou com o excelente apoio da Câmara Municipal de Praia da Vitória, nas pessoas do seu Presidente Dr. Roberto Monteiro e Vereador Paulo Messias, com a Força Aérea Portuguesa da Base das Lajes, através dos Senhores Tenente-Coronel Sousa Mendes e Capitão Pêva Soares e das Forças Aéreas Americanas da Base, em especial a Eng.^a Susana Simões e o Senhor Twidwell, a quem se agradece.

J.P. Lobo Ferreira
(Coordenador do Projecto)

ÍNDICE DO TEXTO

1. OBJECTIVOS E ÂMBITO DO ESTUDO	1
2. ÁREA DE ESTUDO	3
3. CLIMA	8
4. OROGRAFIA	10
5. COBERTO VEGETAL	11
6. GEOLOGIA	12
6.1 Introdução	12
6.2 Caracterização geral	12
6.3 Interpretação geológica dos logs de furos na área de estudo	23
6.4 Tectónica	33
7. HIDROGRAFIA	38
7.1 Hidrografia superficial	38
7.2 Hidrografia subterrânea	39
8. HIDROGEOLOGIA	39
8.1 Introdução	39
8.2 Hidrogeologia do Graben das Lajes	40
8.2.1 Modelo conceptual global	40
8.2.2 Formações hidrogeológicas superficiais	43
8.2.3 Formações hidrogeológicas intermédias	45
8.2.4 Sistema aquífero de base	46
8.3 Pontos de Água	48
8.4 Propriedades hidráulicas e produtividades dos sistemas aquíferos	57
8.4.1 Revisão bibliográfica	57
8.4.2 Nova avaliação das transmissividades da área em estudo por interpretação dos ensaios de caudal	64
8.4.3 Recarga e descargas do aquífero basal	66
8.4.4 Influência da maré	69
9. FOCOS DE POLUIÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO	77
9.1 Considerações gerais	77
9.2 Áreas associadas às infra-estruturas da Base das Lajes	77
9.2.1 Principais áreas identificadas	77
9.2.2 Locais referidos como contaminados	81
9.2.2.1 <i>South Tank Farm/Site 5001/AOC-1</i>	81
9.2.2.2 <i>Main Gate/Site 3001</i>	83
9.2.2.3 <i>Fire Training Pit/Site 3002</i>	85
9.2.2.4 <i>Cinder Pit (Cova das Cinzas) Fuel Tanks/Site 5002/AOC-26</i>	86
9.2.2.5 <i>Cabrito Fuel Tank Area/AOC-17</i>	87
9.2.3 Locais referidos como muito provavelmente contaminados	88
9.2.3.1 <i>Military Highway Spill/Site 5013</i>	88
9.2.3.2 <i>Cabrito Pipeline/Site 5012</i>	88
9.2.3.3 <i>Cinder Pit Pipeline/Site 5011</i>	89

9.2.3.4	Tacan Annex Number EYNH/Site 5009	89
9.2.3.5	Cinco Picos Globe Com Annex Number XYNJ/Site 5008	89
9.2.3.6	North Storm Sewer Drainage Outfall/Site 5003	90
9.2.3.7	Asbestos Dump Site/Site 3012	90
9.2.3.8	18 Hydrants Area/Site 3007	90
9.2.3.9	7 Hydrants Area/Site 3005	90
9.2.3.10	Main Power Plant/Site 3003	90
9.2.3.11	BX Gas Station/Site 2005	90
9.2.3.12	DRMO/Manny's Garage/Site 2007	91
9.2.3.13	Old Pesticide Shop/Site 2008	91
9.2.3.14	Transformer Yard/Site 2009	91
9.2.4	Locais referidos como fontes históricas de contaminação ou potencialmente contaminados	91
9.2.4.1	Praia Dump/Site 5004	91
9.2.4.2	EOD Area/Site 5005	91
9.2.4.3	Vila Nova Power Plant/Site 5006	92
9.2.4.4	Medium Port Command Maintenance Shop/Site 5010	92
9.2.4.5	Old Running Track/Site 5014	92
9.2.4.6	Outros Locais	92
10.	MODELAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	93
10.1	Introdução	93
10.2	Conceptualização	93
10.2.1	Considerações iniciais	93
10.2.2	Configuração dos modelos (base e topo)	94
10.2.3	Recarga	94
10.2.4	Condutividade hidráulica	94
10.3	Modelo matemático	95
10.3.1	Considerações gerais	95
10.3.2	Formações hidrogeológicas suspensas	96
10.3.2.1	Limite do modelo matemático	96
10.3.2.2	Dados de entrada	97
10.3.2.3	Resultados	98
10.3.3	Sistema aquífero basal	102
10.3.3.1	Limite do modelo matemático	102
10.3.3.2	Dados de entrada	106
10.3.3.3	Resultados	107
11.	VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS À POLUIÇÃO	110
11.1	Metodologia dos critérios geológicos e estruturais	110
11.2	Metodologia DRASTIC	116
12.	QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	131
12.1	Considerações gerais	131
12.2	Elementos consultados	133
12.3	Caracterização da qualidade das águas subterrâneas nos aquíferos suspensos	135
12.3.1	Porta de Armas (Main Gate, DISCO Site 3001)	135
12.3.2	Poços localizados no concelho de Praia da Vitória	145
12.3.3	Cabrito Fuel Tank Area/AOC-17	151
12.3.4	Cinder Pit Fuel Tanks/Site 5002/AOC-26	151
12.4	Caracterização da qualidade das águas subterrâneas no aquífero basal	152
12.4.1	Furos de captação para abastecimento ao concelho de Praia da Vitória	152
12.4.2	Furos de captação para abastecimento da Base das Lajes	160
12.4.3	South Tank Farm/Site 5001/AOC-1	164
12.4.4	Furos e piezómetros LNEC_Aqualis e restante conjunto de furos no aquífero basal	175

12.4.5	Síntese da informação do aquífero basal	181
13.	SÍNTESE, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	185
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	192

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Localização da área de estudo	4
Fig. 2 – Localização das zonas de estudo de pormenor, amostragem e ensaios	5
Fig. 3 – Vista aérea da área de estudo (http://pt.wikipedia.org/wiki/Base_Aérea_das_Lajes)	7
Fig. 4 – Distribuição em área da precipitação na ilha Terceira	10
Fig. 5 – Geologia da ilha Terceira (adaptado de Lloyd e Colis, 1981).....	13
Fig. 6 – Afloramento de traquibasaltos dos Cinco Picos na região das Fontinhas.....	17
Fig. 7 – Pormenor de afloramento de lavas traquibasálticas dos Cinco Picos (note-se os vacúolos)	17
Fig. 8 – Unidades piroclásticas na formação dos Traquibasaltos dos Cinco Picos (sector de Santa Rita)	17
Fig. 9 – Níveis piroclásticos e de alteração dos Traquibasaltos dos Cinco Picos (sector de Santa Rita).....	17
Fig. 10 – Pormenor dos níveis piroclásticos e de alteração dos Traquibasaltos dos Cinco Picos (sector de Santa Rita).....	18
Fig. 11 – Depressão da Caldeira das Lajes sendo visível a escarpa envolvente.....	18
Fig. 12 – Fundo da caldeira das Lajes e muros de pedra basáltica das formações que afloram no seu interior.....	18
Fig. 13 – Pormenor das formações ignimbríticas na arriba da Caldeira das Lajes	20
Fig. 14 – Formações dos Ignimbritos das Lajes (sector das Lajes)	20
Fig. 15 – Ignimbritos das Lajes (Caldeira das Lajes)	20
Fig. 16 – Formações dos Ignimbritos das Lajes (pormenor; sector das Lajes)	20
Fig. 17 – Lavas da formação dos Basaltos Superiores (Cruz do Pico/Pico Celeiro; pormenor).....	22
Fig. 18 – Lavas da formação dos Basaltos Superiores (Cruz do Pico/Pico Celeiro) e sua relação com escoada piroclástica subjacente	22
Fig. 19 – Piroclastos subjacentes às lavas dos Basaltos Superiores de Cruz do Pico/Pico Celeiro	22
Fig. 20 – Piroclastos subjacentes às lavas dos Basaltos Superiores de Cruz do Pico/Pico Celeiro (pormenor de sucessão de níveis com diferentes granulometrias).....	22
Fig. 21 – Escarpa de falha de Santiago e areias de praia (Praia da Vitória).....	23
Fig. 22 – Praia de calhau (litoral a NE de Caldeira das Lajes).....	23
Fig. 23 – Visão oblíqua e geral das colunas litológicas dos furos Well 1, Well 2, Well 3, Canada das Covas e Canada Barreiro	28
Fig. 24 – Coluna litológica do furo de Vila Nova	29
Fig. 25 – Colunas litológicas simplificadas em corte oblíquo (sobreelevação vertical de 10 vezes) - o furo “pJuncal” corresponde ao piezómetro FP4	30
Fig. 26 - Pormenor das colunas litológicas (sobreelevação vertical de 10 vezes)	31
Fig. 27 - Planta e perfis geológicos oblíquos simplificados (sobreelevação vertical de 10 vezes).....	32
Fig. 28 - Planta e perfil geológico oblíquo simplificado (sobreelevação vertical de 10x).....	33
Fig. 29 – Localização da micro-placa dos Açores e respectivo enquadramento tectónico.....	34
Fig. 30 – Tectónica geral da ilha Terceira	35
Fig. 31 – Mapa de falhas do graben das Lajes (adaptado de Lloyd e Collis, 1981)	36
Fig. 32 – Depressão do graben e falha de Santiago na bordadura de Praia da Vitória	37
Fig. 33 – Graben e falha das Fontinhas na bordadura norte do graben.....	37
Fig. 34 – Em afastamento progressivo: plataforma das Fontinhas, falha das Fontinhas, depressão do graben das Lajes, falha de Santiago e Serra de Santiago.....	37
Fig. 35 – Escarpa de falha de Santiago (zona de Praia da Vitória).....	37
Fig. 36 – Expressão geomorfológica da falha de Santiago	37
Fig. 37 – Escarpa da falha das Fontinhas e, em fundo, Serra do Cume.....	37

Fig. 38 – Formações hidrogeológicas na região do graben das Lajes e zonas envolventes	42
Fig. 39 – Esboço do posicionamento das formações hidrogeológicas suspensas e do aquífero basal face ao nível do mar	43
Fig. 40 – Profundidade ao nível piezométrico, determinada nas campanhas de monitorização nas formações (1) superficial e (2) intermédia, na envolvente da Base das Lajes	45
Fig. 41 – Cotas de níveis piezométricos no aquífero de base.....	47
Fig. 42 – Localização dos pontos de amostragem de águas subterrâneas	51
Fig. 43 – Pontos de água: a) Furo do Areeiro; b) Furo de Barreiro/Fontinhas; c) Furos do Juncal; d) Nascente da Caldeira das Lajes	56
Fig. 44 – Profundidade ao nível registada no piezómetro FP6B e precipitação diária registada em Praia da Vitória.....	68
Fig. 45 – Profundidade ao nível registada no piezómetro FP6A e precipitação diária registada em Praia da Vitória.....	68
Fig. 46 – Zonamento do potencial hidrogeológico do graben das Lajes (incluindo zonas de sobreexploração)	70
Fig. 47 - Amplitude de maré registada nos diferentes piezómetros (exemplo do período de 10-08-2010 a 14-08-2010 - Lua Nova).....	70
Fig. 48 - Furos onde foram registadas as oscilações provocadas pela maré	71
Fig. 49 - Atraso temporal médio em relação à baixa-mar ou preia-mar versus distância à costa SE (período de registo de Julho a Agosto).....	73
Fig. 50 - Atraso temporal médio em relação à baixa-mar ou preia-mar versus distância à costa SE (período de registo de Setembro a Outubro)	73
Fig. 51 - Variação do nível piezométrico (Max-Med) versus distância à costa SE (período de registo de Julho a Agosto).....	74
Fig. 52 - Variação do nível piezométrico (Max-Med) versus distância à costa SE (período de registo de Setembro a Outubro)	74
Fig. 53 - Falhas que atravessam a zona de estudo	75
Fig. 54 – Relação entre as precipitações e as oscilações do nível piezométrico (altitude) no aquífero de base.....	76
Fig. 55 – Localização dos locais contaminados e potencialmente contaminados identificados pelo estudo DISCO de CH2M HILL	79
Fig. 56 – Localização dos tanques de combustível e depósitos de resíduos na área de <i>South Tank Farm</i>	82
Fig. 57 – Tanque separador de águas e de óleos na <i>South Tank Farm</i>	83
Fig. 58 – Vista geral do parque de estacionamento no <i>Main Gate</i>	84
Fig. 59 – Vista geral da área da Cova das Cinzas e trabalhos em curso.....	87
Fig. 60 – Pormenor dos depósitos antigos da área da Cova das Cinzas.....	87
Fig. 61 – Pormenor dos depósitos antigos enterrados da área envolvente à Cova das Cinzas.....	87
Fig. 62 – Pormenor do <i>pipeline</i> na Cova das Cinzas	87
Fig. 63 – Área militar envolvente à Cova das Cinzas.....	89
Fig. 64 – Pormenor de uma bóia de retenção de hidrocarbonetos à saída do <i>north storm sewer drainage outfall</i>	89
Fig. 65 – Modelo do sistema aquífero suspenso proposto por Oliveira <i>et al.</i> (2010).....	96
Fig. 66 – Limite do modelo dos sistemas aquíferos suspensos – valores para interpolação (em cota) da base considera para o modelo.....	97
Fig. 67 – Nível piezométrico após corrida do modelo e setas de fluxo (sistemas aquíferos suspensos).....	99
Fig. 68 – Relação entre os valores observados e os valores calculados pelo modelo (sistemas aquíferos suspensos)	100
Fig. 69 – Corrida do programa MODPATH para o trajecto de uma partícula que termina o seu percurso no Juncal (nas formações hidrogeológicas suspensas).....	101

Fig. 70 – Pormenor da Corrida do programa MODPATH para o trajecto de uma partícula que termina o seu percurso no Juncal (nas formações hidrogeológicas suspensas)	101
Fig. 71 – Limites gerais do modelo à escala regional	103
Fig. 72 – Vista em pormenor do limite na zona do Monte Capitão	104
Fig. 73 – Vista em pormenor do limite na zona do Pico da Cruz	105
Fig. 74 – Vista em pormenor do limite na Serra do Cume	105
Fig. 75 – Malha MODFLOW do modelo do sistema aquífero basal	106
Fig. 76 - Distribuição espacial da piezometria e dos vectores de fluxo da água subterrânea no sistema basal	108
Fig. 77 - Gráfico de calibração do modelo basal	109
Fig. 78 – Vulnerabilidade dos aquíferos da ilha Terceira à poluição segundo a metodologia dos critérios geológicos e estruturais	112
Fig. 79 – Zonamento do parâmetro D (profundidade ao nível de água) para as formações hidrogeológicas suspensas	123
Fig. 80 – Zonamento do parâmetro R (recarga) para as formações hidrogeológicas suspensas	123
Fig. 81 – Zonamento do parâmetro A (material do aquífero) para as formações hidrogeológicas suspensas	124
Fig. 82 – Zonamento do parâmetro S (natureza do solo) para as formações hidrogeológicas suspensas	124
Fig. 83 – Zonamento do parâmetro T (topografia) para as formações hidrogeológicas suspensas	125
Fig. 84 – Zonamento do parâmetro I (influência da zona vadosa) para as formações hidrogeológicas suspensas	125
Fig. 85 – Zonamento do parâmetro C (condutividade hidráulica) para as formações hidrogeológicas suspensas	126
Fig. 86 – Índice DRASTIC de vulnerabilidade à poluição para as formações hidrogeológicas suspensas	126
Fig. 87 – Zonamento do parâmetro D (profundidade ao nível de água) para o sistema aquífero de base	127
Fig. 88 – Zonamento do parâmetro R (recarga) para o sistema aquífero de base	127
Fig. 89 – Zonamento do parâmetro A (material do aquífero) para o sistema aquífero de base	128
Fig. 90 – Zonamento do parâmetro S (natureza do solo) para o sistema aquífero de base	128
Fig. 91 – Zonamento do parâmetro T (topografia) para o sistema aquífero de base	129
Fig. 92 – Zonamento do parâmetro I (influência da zona vadosa) para o sistema aquífero de base	129
Fig. 93 – Zonamento do parâmetro C (condutividade hidráulica) para o sistema aquífero de base	130
Fig. 94 – Índice DRASTIC de vulnerabilidade à poluição para o sistema aquífero de base	130
Fig. 95 – Localização dos pontos de amostragem de águas na área junto à Porta de Armas	135
Fig. 96 – Aspecto dos frascos de recolha de água do ponto FP6A, chegados ao laboratório em Dezembro de 2010	136
Fig. 97 – Concentração em hidrocarbonetos diversos em piezómetros superficiais localizados junto à área da Porta de Armas	139
Fig. 98 – Concentração em PAHs, TPH e BTEX em dez piezómetros localizados em aquíferos suspensos, na área junto à Porta de Armas	140
Fig. 99 – Concentração em PAHs, TPH e BTEX entre 2006 e 2010, em piezómetros na área junto à Porta de Armas	141
Fig. 100 – Localização dos poços amostrados na área de estudo	146
Fig. 101 – Diagrama de Piper para as águas de poços no concelho de Praia da Vitória	147
Fig. 102 – Ocupação agro-pecuária na ilha Terceira	151
Fig. 103 – Localização dos furos de abastecimento da CMPV	153
Fig. 104 – Distribuição da concentração do vanádio nos pontos de água amostrados	158
Fig. 105 – Diagrama de Piper para as águas de abastecimento público da CMPV	159

Fig. 106 – Concentração em PAHs e TPH nos furos de abastecimento e nos piezômetros da Porta de Armas	159
Fig. 107 – Localização dos pontos de monitorização na área junto à <i>South Tank Farm</i>	164
Fig. 108 – Recolha de amostra com recurso a uma bomba peristáltica de baixo caudal.....	165
Fig. 109 – Fotografia de LNAPL sobrenadante na água do ponto MW08.....	169
Fig. 110 - Concentração em PAHs, TPH e BTEX em 2010, em piezômetros na área junto à <i>South Tank Farm</i>	169
Fig. 111 – Concentração em PAHs, TPH e BTEX entre 1997 e 2010, em piezômetros na <i>South Tank Farm</i>	174
Fig. 112 – Localização dos seis furos e dez piezômetros instalados na área de estudo	176
Fig. 113 – Diagrama de Piper das águas do aquífero basal: furos da CMPV (triângulo preto); furos LNEC_Aqualis (bola vermelha); piezômetros LNEC_Aqualis (quadrado preto e azul) e FB6 e FP6 (losango verde).....	179
Fig. 114 – Concentração em hidrocarbonetos nos furos e nos piezômetros LNEC_Aqualis	180
Fig. 115 – Concentração em hidrocarbonetos nos furos e nos piezômetros do aquífero basal.....	181
Fig. 116 – Distribuição de cloretos nas águas subterrâneas do aquífero basal.....	183
Fig. 117 – Distribuição de nitratos nas águas subterrâneas do aquífero basal.....	183
Fig. 118 – Distribuição de magnésio nas águas subterrâneas do aquífero basal	184
Fig. 119 – Distribuição de potássio nas águas subterrâneas do aquífero basal	184

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos pontos de água utilizados no Estudo	53
Quadro 2 – Valores de transmissividades registadas no aquífero basal.....	58
Quadro 3 – Porosidades estimadas das formações da ilha Terceira	58
Quadro 4 – Caudais máximos e mínimos registados em furos da Base das Lajes.....	60
Quadro 5 – Alguns valores de caudais específicos.....	60
Quadro 6 – Medições do nível piezométrico nos novos furos e piezómetros ao longo do tempo	61
Quadro 7 – Medições do nível piezométrico em diversos pontos de água ao longo do tempo.....	62
Quadro 8 – Características sumárias dos ensaios de bombagem	64
Quadro 9 – Interpretação dos ensaios pelo método de Thiem	66
Quadro 10 – Valores de transmissividade por local ensaiado	66
Quadro 11 – Valores de recarga para a região das Lajes.....	67
Quadro 12 – Distância à costa Sudeste e à costa Nordeste de cada um dos furos monitorizados com sondas	71
Quadro 13 - Variação do nível piezométrico (Max-Med) para diferentes fases da Lua para a costa SE	71
Quadro 14 - Atraso temporal médio em relação à baixa-mar e preia-mar para a costa SE	72
Quadro 15 – Comparação da média absoluta entre os valores calculados nos diferentes modelos ...	108
Quadro 16 – Classes de Vulnerabilidade à Poluição por Critérios Geológicos e Estruturais	111
Quadro 17 – Classes de vulnerabilidade para o parâmetro condutividade hidráulica	116
Quadro 18 – Classes de vulnerabilidade para o parâmetro profundidade ao nível de água	116
Quadro 19 - Síntese das datas de amostragem e do tipo de amostra recolhida em cada local.....	132
Quadro 20 – Resultados das análises químicas efectuadas em cinco piezómetros AMEC e dois piezómetros LNEC_Mota-Engil junto à Porta de Armas (DISCO Site 3001)	137
Quadro 21 – Qualidade das águas subterrâneas na área da Main Gate entre 2006 e 2010 para hidrocarbonetos	143
Quadro 22 – Resultados das análises químicas efectuadas nos poços do concelho de Praia da Vitória	149
Quadro 23 – Resultados das análises químicas efectuadas nas águas furos de captação para abastecimento do Praia da Vitória	155
Quadro 24 – Concentrações hidroquímicas nos furos de abastecimento de água da CMPV	157
Quadro 25 – Valores das concentrações (em ppm) de cloretos nos furos da base das Lajes até 1990 (Allen e Hoshall, 1990)	160
Quadro 26 – Concentrações hidroquímicas nos furos de captação para abastecimento da Base das Lajes (extraído de CH2M HILL, 2004)	162
Quadro 27– Resultados das análises químicas efectuadas na área da <i>South Tank Farm</i> (DISCO Site 5001)	167
Quadro 28 – Concentrações hidroquímicas nos furos de monitorização da <i>South Tank Farm</i> (extraído de CH2M HILL, 2004).....	172
Quadro 29 – Resultados das análises químicas efectuadas nos furos e piezómetros LNEC_Aqualis	177
Quadro 30 – Valores médios, medianos, máximos e acima da norma (em mg/L) para metais pesados em águas do aquífero basal	182

Análise e Parecer sobre a Situação Ambiental nas Áreas de Captação dos Furos de Abastecimento do Concelho de Praia da Vitória – Açores

Relatório Final

1. Objectivos e Âmbito do Estudo

O presente relatório apresenta os trabalhos desenvolvidos e os resultados finais obtidos no Estudo intitulado "Análise e Parecer sobre a Situação Ambiental nas Áreas de Captação dos Furos de Abastecimentos do Concelho da Praia da Vitória", iniciado em Maio de 2009 e terminado em Dezembro de 2010, no que diz respeito à componente de águas subterrâneas.

O principal objectivo deste Estudo é a avaliação ambiental da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos ao longo de toda a área do concelho de Praia da Vitória onde existam captações que estejam a ser ou possam vir a ser afectadas por situações de poluição associadas às infra-estruturas da Base das Lajes, nelas se incluindo algumas importantes estruturas externas à área da base propriamente dita (ex.: *Cinder Pit Pipeline*, *Cinder Pit Fuel Tanks*, *South Tank Farm*). Este Estudo não se debruça, portanto, sobre outras eventuais origens de poluição que possam existir no Concelho.

Com vista a se atingir este objectivo, os trabalhos foram estruturados nas seguintes partes, incluindo componentes de âmbito mais abrangente que auxiliaram a enquadrar a avaliação ambiental da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos da área em estudo, bem como a prever a sua evolução:

1. Caracterização com recurso à prospecção geofísica das áreas onde pode ocorrer a migração da poluição para as águas subterrâneas – que incluiu:

- a. Localização das zonas poluídas associadas às estruturas de apoio à actividade da Base das Lajes.
- b. Contribuição para a caracterização das falhas das Fontinhas e de Santiago.
- c. Identificação de eventuais zonas impermeáveis, que poderão funcionar como barreiras de aquíferos suspensos.
- d. Contribuição, conjugando a informação necessária para atingir os objectivos anteriores, para a selecção dos locais para execução das sondagens de amostragem de solos e dos furos para instalação de piezómetros e dos ensaios de bombagem.

2. Avaliação da qualidade dos solos nas áreas focais da poluição – que incluiu:

- a. Análise de estudos anteriores realizados na área sobre a caracterização da qualidade dos solos.
- b. Acompanhamento da realização de novas sondagens de amostragem e da recolha de amostras de solos, a várias profundidades, para análise laboratorial.
- c. Análise da informação obtida e caracterização do presente estado de contaminação dos solos, a diversas profundidades.
- d. Localização de eventuais manchas de contaminação nos solos.

e. Determinação da sua profundidade, intensidade e tipo.

3. Avaliação da qualidade e quantidade das águas subterrâneas, com ênfase nas zonas de captação e nas áreas entre estas e os focos de poluição – que incluiu:

- a) Actualização do inventário dos pontos de água e identificação das infra-estruturas preexistentes com condições para monitorização de água.
- b) Acompanhamento parcial dos trabalhos de instalação dos novos piezómetros e dos furos de ensaio.
- c) Acompanhamento parcial dos ensaios de caudal realizados.
- d) Descrição da geologia atravessada pelas sondagens para instalação dos novos piezómetros com vista a identificar e caracterizar zonas preferenciais de migração dos poluentes entre os aquíferos superficiais e os mais profundos (ex.: falhas).
- e) Monitorização das águas subterrâneas em vários períodos diferentes, nas formações hidrogeológicas suspensas e no aquífero basal (acompanhamento com sondas e recolha manual de amostras de água).
- f) Análise da informação recolhida para localização das principais manchas de poluição nas águas subterrâneas e sua extensão.
- g) Caracterização dos tipos de contaminantes presentes nos solos e nas águas subterrâneas (com especial destaque para os provenientes de focos de poluição associados à Base das Lajes e suas infra-estruturas de armazenamento e transporte de hidrocarbonetos de petróleo).
- h) Caracterização do funcionamento hidráulico e principais características hidrodinâmicas das formações.

4. Modelação numérica das formações hidrogeológicas presentes – que incluiu:

- a) Análise de estudos hidrogeológicos anteriores realizados na área de estudo.
- b) Elaboração de um modelo de escoamento das formações hidrogeológicas suspensas e do aquífero basal, com incorporação das zonas preferenciais de ligação hidráulica (indiciadas pela prospecção geofísica e resultados das carotes obtidas pela instalação dos piezómetros).
- c) Calibração do modelo, em função dos dados conhecidos de estudos anteriores e dos dados obtidos neste estudo.
- d) Realização de simulações com vista a obter respostas às seguintes questões:
 - d.1) Análise da hidrodinâmica local e regional com vista à definição dos percursos preferenciais de migração da poluição e, assim, de cenários futuros de possíveis situações de risco.
 - d.2) Identificação de captações que possam estar actualmente em risco imediato de contaminação.
 - d.3) Previsão de cenários futuros de evolução e migração das plumas contaminantes para identificar possíveis situações de risco para os furos de abastecimento urbano.
 - d.4) Áreas de acção para a protecção de captações.
 - d.5) Definição de eventuais zonas a necessitar de reabilitação.

5. Estratégias de protecção das águas subterrâneas (eventualmente a desenvolver numa fase de estudo posterior) – que incluiu uma breve referência a:

- a) Definição de estratégias de protecção da qualidade das águas subterrâneas, nomeadamente de furos de captação.

- b) Referência à necessidade de acompanhamento da situação e da reabilitação de áreas específicas dentro das áreas militares poluídas.

As partes 1. e 2. foram tratadas nos dois documentos finais referidos na Nota Técnica (Mota e Novo, 2010 e Jorge, 2010) sendo aqui integrados os aspectos que auxiliam à compreensão e avaliação ambiental da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos.

2. Área de Estudo

A área de estudo localiza-se no sector oriental da ilha Terceira, Açores (Fig. 1), numa faixa orientada NW-SE, designada por Graben das Lajes, com cerca de 8,5 a 10 km de extensão e 3,5 a 4 km de largura, estendendo-se entre Praia da Vitória - Cabo da Praia, a sul, e Vila Nova, a norte. Este graben é uma depressão alongada, de origem tectónica, delimitada por duas escarpas de falha: (1) escarpa de Santiago, que delimita o sector da Serra de Santiago a Oeste, ao longo de uma direcção NW-SE e (2) a escarpa das Fontinhas - Pico Celeiro, que define o bordo nordeste da Serra do Cume. O graben das Lajes está assim compreendido entre a Serra de Santiago, a ENE, e a Serra do Cume, a WSW, e o mar respectivamente a norte e a sul.

O graben das Lajes, embora constituindo uma superfície grosseiramente aplanada, apresenta-se subdividido em diversos sectores, delimitados por escarpas de falha e dispostos aproximadamente em degraus, a que se associam microrelevos associados a escoadas recentes e pequenos cones adventícios.

A subdivisão mais importante deste graben é definida pelo eixo entre as povoações do Juncal e Santa Luzia, que define a separação entre o sector norte e o sector sul do graben. O sector sul tem um declive geral orientado para sudeste, e o sector norte tem um declive geral orientado para noroeste, ambos em direcção ao mar.

O Estudo incide sobre todo o graben, pese embora as análises de pormenor – em termos de caracterização dos solos e detecção de fontes poluentes, caracterização da qualidade das águas e eventual detecção de plumas contaminantes passíveis de constituir risco para as captações para abastecimento público – seja mais aprofundado em áreas específicas.

Inicialmente foram admitidas como áreas-alvo para caracterização de pormenor do estudo um conjunto de sete áreas situadas nas vizinhanças das captações de abastecimento do Areeiro, Pico Celeiro, Vale Farto, Canada da Saúde e Juncal (Fig. 2, a).

Alguns dos trabalhos de campo, como a campanha de geofísica (Mota e Novo, 2010), prolongaram-se para além destas áreas iniciais de estudo de pormenor, dada a necessidade de compreender (1) as estruturas geológicas existentes e seu comportamento hidrogeológico, (2) a contribuição de vários locais potencialmente poluentes para a contaminação de solos e águas e definir eventuais plumas de poluição que neles tenham tido origem, como é o caso por exemplo do *pipeline* do Cabrito ou dos locais dos antigos depósitos de combustível da zona de Pico Celeiro.

Com base nos resultados da campanha de prospecção geofísica, em conjunto com o levantamento dos furos de captação em actividade e desactivados, assim como de uma avaliação mais detalhada das potenciais fontes de poluição tendo em consideração os trabalhos referidos na secção 12.2, optou-se pelas sete áreas alvo conforme o indicado na Fig.

2 b). Informação posterior recolhida durante as diferentes campanhas de monitorização química e piezométrica e durante os trabalhos de sondagem para instalação de piezómetros e furos de ensaio, levou a reajustamentos, face à distribuição das áreas-alvo indicadas na Fig. 2 b). Assim, instalou-se um conjunto de três piezómetros e um furo para ensaio de bombagem na área imediatamente a S da entrada da Base Aérea (zona FP6 na Fig. 2 c) e um piezómetro na proximidade imediata dos furos do Juncal, tendo-se prescindido da localização "Furo 4" (Fig. 2 c).



Fig. 1 – Localização da área de estudo

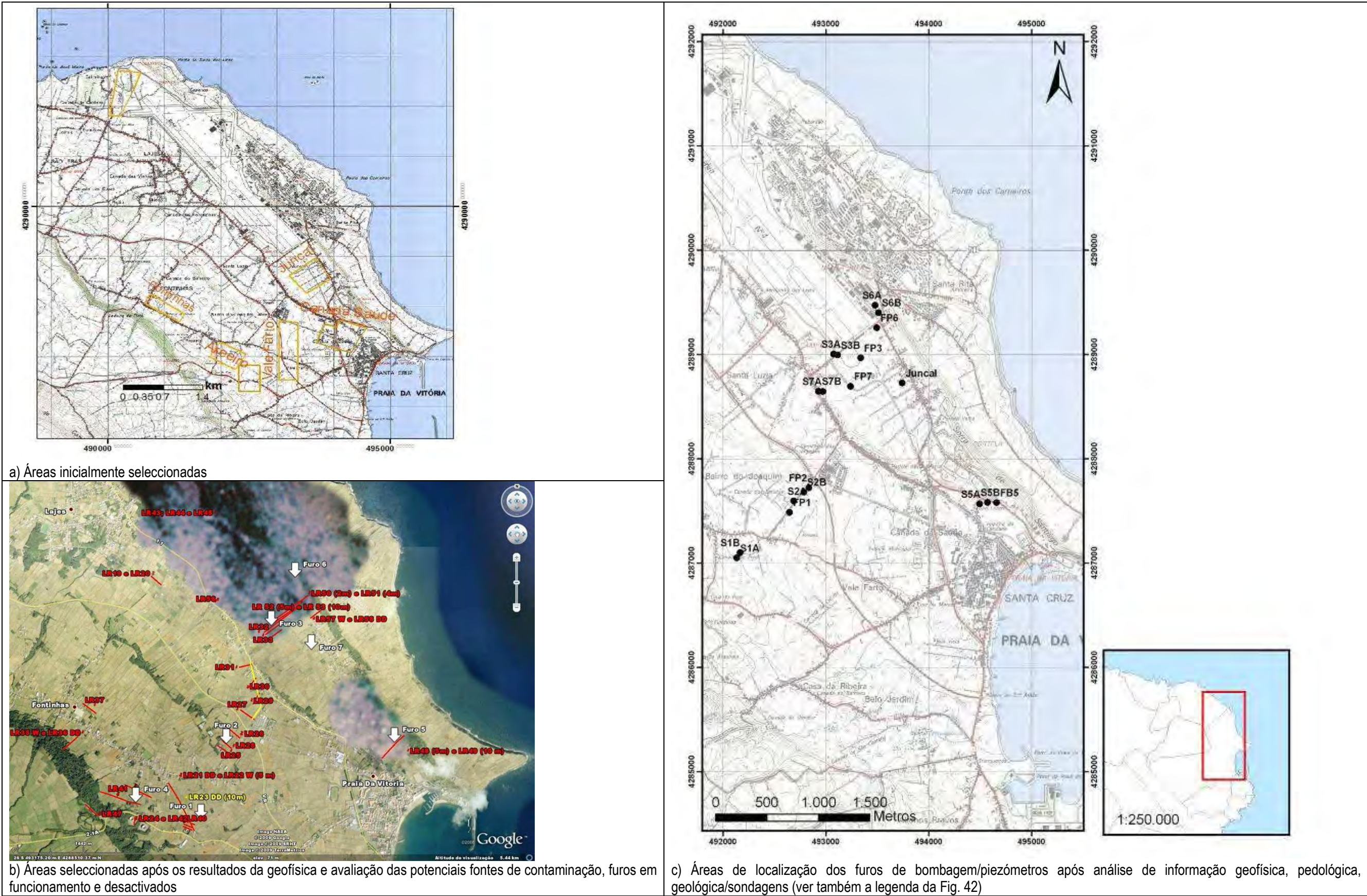


Fig. 2 – Localização das zonas de estudo de pormenor, amostragem e ensaios

O principal foco de interesse da área de estudo, enquanto origem das potenciais fontes de poluição, é a Base Aérea das Lajes. Esta é uma grande infra-estrutura aeronáutica da Força Aérea Portuguesa, dependente do Comando da Zona Aérea dos Açores. Localiza-se na parte nordeste da ilha Terceira, arquipélago dos Açores, próximo da povoação das Lajes (Fig. 3). Tem uma área de cerca de 10 km² e situa-se a cerca de 55 metros de altitude, a 38°45'42.63" N e a 027°05'26.87" W.



Fig. 3 – Vista aérea da área de estudo (http://pt.wikipedia.org/wiki/Base_Aérea_das_Lajes)

Além das pistas de aterragem e das áreas de estacionamento, faz também parte da base o molhe norte do porto da Praia da Vitória, um porto militar. Ainda associado ao funcionamento da base há diversas instalações de telecomunicações e de armazenamento de combustíveis dispersas pela ilha que estão na base das preocupações ambientais analisadas neste relatório.

Em termos históricos, a base das Lajes foi criada em 1941, durante a 2.^a Guerra Mundial, pelo Governo de Portugal para dissuadir as tentativas de ocupação da área pelas forças aliadas ou alemãs, o que quebraria a intenção de neutralidade portuguesa. À época foram enviados fortes contingentes militares para as ilhas.

Contudo, em 1943, ainda durante a guerra, o Governo Britânico solicitou ao Governo Português, ao abrigo do Tratado de Aliança Luso-Britânico, o uso da Base das Lajes pela Real Força Aérea Britânica, o que foi concedido. Os britânicos saíram do local em 1946.

Ainda antes do fim da Guerra, a base começou também a ser utilizada pela Força Aérea dos Estados Unidos (USAF). Desde então, a base tem sido usada pelas Forças Armadas Americanas como ponto de apoio estratégico no meio do Oceano Atlântico, nomeadamente para servir de apoio às aeronaves que têm vindo a participar ou dar apoio a operações na Europa e no Médio Oriente. O primeiro acordo formal entre os dois países foi assinado em 1948.

Actualmente a base tem funções de transporte aéreo civil, busca e salvamento, reconhecimento meteorológico e transporte aéreo militar, nomeadamente ao nível de suporte dos EUA e forças aliadas do Atlântico Norte (NATO). Está, ainda, preparada para receber vaivéns espaciais em caso de emergência extrema.

Existe um conjunto de infra-estruturas associadas ao funcionamento da base das Lajes que são pontos de contaminação ou apresentam potencial para funcionarem como fontes de contaminação para o meio subterrâneo. Uma caracterização do estado actual do conhecimento em termos de contaminação destas diversas áreas de armazenamento e transporte de combustível é apresentada no Capítulo 9.

3. Clima

O clima da ilha Terceira é um clima oceânico, classificável em função dos valores de temperatura e de precipitação como moderado oceânico chuvoso, e é influenciado pela Corrente do Golfo; caracteriza-se por reduzidas amplitudes térmicas anuais e elevada precipitação anual. O clima é também controlado pela topografia, localização geográfica e distância ao mar, o que é expresso na distribuição espacial dos valores de temperatura, precipitação, de humidade relativa e de precipitação oculta. Apresenta também variações sazonais, definindo um período frio e chuvoso que decorre de Outubro a Março, e um período relativamente quente e húmido durante o resto do ano.

Na ilha Terceira a **temperatura** tem uma zonação por altitude, com um gradiente aproximado da ordem dos 0,6 °C por cada 100 m de altitude (Bettencourt, 1979 *in* Novo *et al.*, 2001), fortemente influenciado pela humidade atmosférica. Considerando a **região das Lajes**, os valores médios anuais são de cerca de 17 °C, sendo Agosto o mês mais quente (temperaturas médias de 21 °C e máximas de 29 °C) e o mais frio Fevereiro (temperaturas médias de 14 °C e mínimas de 11 °C) (Novo *et al.*, 2001).

A **precipitação** na ilha Terceira ocorre ao longo de todo o ano, incluindo o período de Verão, mas é mais significativa durante o período de Outubro a Março, onde ocorre cerca de 65% de toda a precipitação (Azevedo, 1996). O período de precipitação mínima ocorre entre Maio e Agosto, tendo-se verificado que Julho é o mês mais seco em três áreas do graben das Lajes (Rodrigues, 2002).

A precipitação na ilha apresenta também um zonamento por quadrante geográfico (Azevedo, 1996), observando-se: (1) um aumento da precipitação de leste para oeste; (2) um aumento no quadrante norte face ao registado no quadrante sul da ilha, sendo as precipitações na zona norte 20 a 25% mais elevadas do que na zona sul, para pontos de igual altitude.

O zonamento de precipitação mais significativo é o que se regista com a altitude e que segundo Agostinho (1942, *in* Rodrigues, 1993) define um aumento de precipitação de 25% por cada 100 m até aos 600 m de altitude, sendo o incremento de precipitação superior a partir desse limiar. Bettencourt (1977) define este zonamento pela expressão (Eq. 1):

$$P = 2,18 \times A + 961$$

Equação 1

Onde:

P = precipitação média anual (em mm)

A = altitude (em m)

A distribuição da precipitação varia também com a distância ao mar. Rodrigues (1995) define o zonamento da precipitação considerando os factores altitude, distância ao mar e outros aspectos topográficos pela expressão (Eq. 2):

$$P = a_1 \times Z \times a_2 + b_1 \times L_1 + c_1 \times S_0 \times f_1 + d_1 \times Z_{\text{máx}}$$

Equação 2

Onde:

P = precipitação média anual (em mm)

a_1 , a_2 , b_1 , c_1 , d_1 = coeficientes determináveis por calibrações locais

Z = altitude (em m)

S_0 = o declive da área (em %)

L_1 = distância ao mar (em m)

f_1 = grau de depressão topográfica

$Z_{\text{máx}}$ = a altitude da principal barreira às massas de ar oceânico provenientes de SW

Na zona das Lajes a precipitação média anual varia entre 810 e 1 210 mm/ano, de acordo com o modelo CIELO desenvolvido por Azevedo (1996), registando uma heterogeneidade espacial, que é reflectida pelo seguinte zonamento das precipitações (Azevedo, 1996; Rodrigues, 2002; cf. Fig. 4):

- ◇ Serra de Santa Rita – 1 000 mm/ano,
- ◇ Sector N, E e S do graben – 910 mm/ano,
- ◇ Sector Central do graben – 1 100 mm/ano,
- ◇ Bordadura SE da falha das Fontinhas – 1 300 mm/ano.

Em função dos valores de Rodrigues (2002), admite-se que o valor de 1 000 mm/ano pode ser representativo para toda a depressão das Lajes, valor que é também concordante com os resultados de Novo *et al.* (2001).

Na ilha Terceira registam-se ainda elevados índices de humidade relativa do ar e um regime de ventos persistentes. Os valores médios anuais de humidade relativa são superiores a 77%, ocorrendo os valores mais baixos entre Julho e Outubro e os maiores no Inverno. A humidade relativa aumenta também regularmente com a altitude.

A **precipitação oculta** está associada à humidade do ar e nevoeiros, especialmente os desenvolvidos em altitude, e nas áreas elevadas da ilha constitui uma importante componente do ciclo hidrológico, constituindo-se numa significativa fonte de recarga para o solo nestas regiões. Em termos de variação anual da precipitação oculta, o mês de Junho é o que regista maior precipitação deste tipo (Pereira, 1991, *in* Rodrigues, 1993). Admite-se que na **área do graben das Lajes**, dada a sua baixa altitude, a precipitação oculta possa ter uma presença reduzida, com a eventual excepção da zona de bordadura correspondente à Serra do Cume.

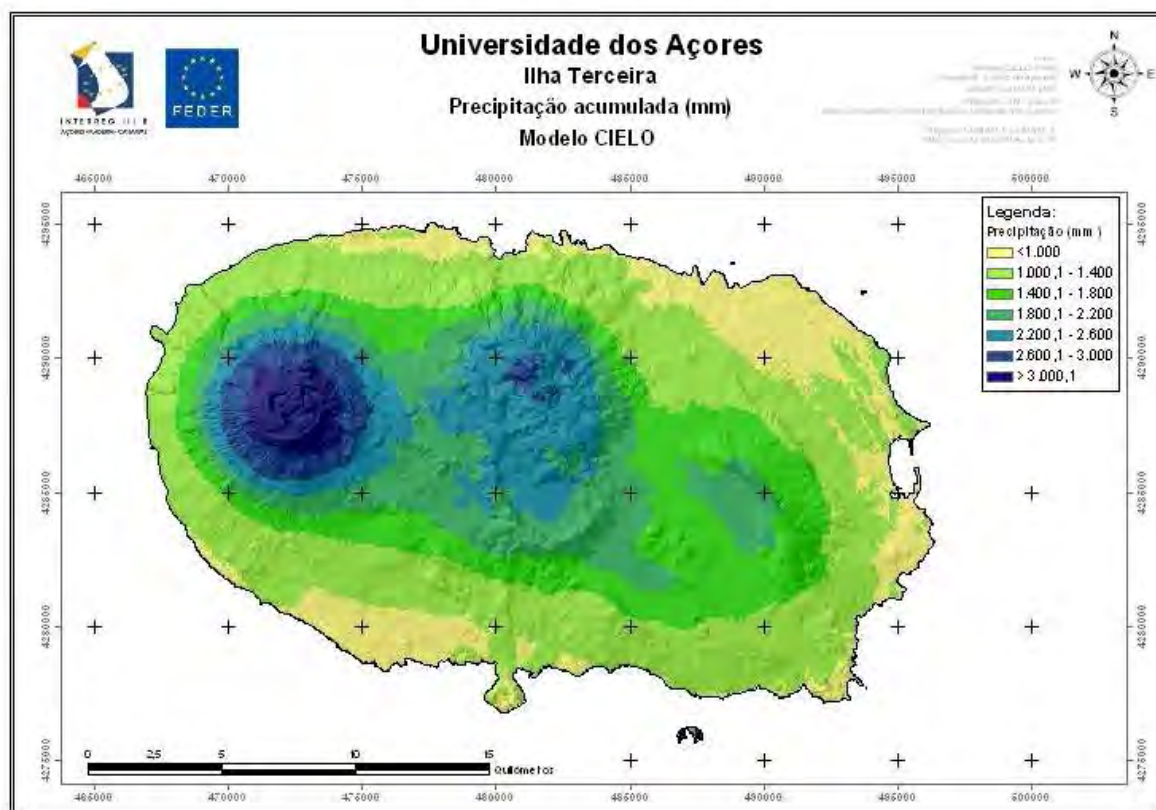


Fig. 4 – Distribuição em área da precipitação na ilha Terceira

Fonte: Azevedo (1996) e <http://www.climaat.angra.uac.pt/>

As simulações do modelo CIELO calculam para a depressão do graben das Lajes uma **evapotranspiração** entre 636 mm a 791 mm, definindo o seguinte zonamento espacial (Rodrigues, 2002): (1) sector SE de valores médios de 750 mm/ano e (2) restante área das Lajes com valores médios de 660 mm/ano. Os balanços hídricos indicam que nas Lajes o défice hídrico pode iniciar-se em Abril (Rodrigues, 1993).

4. Orografia

O relevo da ilha Terceira é dominado pelos vigorosos aparelhos vulcânicos que estiveram na sua génese e continuam ainda a modelá-la. Esta ilha situa-se numa plataforma grosseiramente triangular definida pela batimétrica dos 2 000 m e limitada a ocidente pela Dorsal Médio-Atlântica. Estruturalmente pode dividir-se a ilha em três sectores:

- Maciço dos Cinco Picos – associado ao maciço vulcânico dos Cinco Picos, o mais antigo da ilha, que incorpora a Serra de Santiago, o graben das Lajes, a Serra do Cume e a plataforma dos Cinco Picos.
- Maciço de Guilherme Moniz/Pico Alto – associado ao maciço vulcânico do Pico Alto, que incorpora as zonas da Serra do Morrião, as regiões elevadas de Terra Brava e do Pico Alto, a zona aplanada da Caldeira de Guilherme Moniz, a área da Zona de Transição e no litoral a estrutura do Monte Brasil.

- Maciço de Santa Bárbara – associado ao maciço vulcânico de Santa Bárbara, o mais recente da ilha, define o troço ocidental da ilha e corresponde à estrutura da Serra de Santa Bárbara.

O graben das Lajes está delimitado a leste pela Serra de Santiago, a norte pela arriba litoral que se estende entre a Caldeira das Lajes e a Ponta da Forcada, a oeste pela Serra do Cume e a sul pelo litoral de praia da região entre Praia da Vitória e Cabo da Praia.

A serra de Santiago é uma estrutura alongada na direcção NW-SE, delimitada a oeste pela falha de Santiago, com orientação NW-SE. Esta serra é caracterizada por uma topografia aplanada ao longo de todo o seu topo, inclinada para NE na direcção do mar; tem cotas que variam entre cerca de 100-120 m no sector entre Portela e Santa Rita, e cotas predominantemente entre os 50 e os 70 m na plataforma entre Santa Rita e Caparica; para sul de Portela as cotas descem suavemente dos 120 até aos cerca de 28 m (Ponta do Facho). A falha de Santiago define uma vertente abrupta, inclinada para SW que faz a transição entre as cotas mais elevadas da Serra do Cume (entre os 100 e 120 m) e a planura do graben das Lajes.

O graben das Lajes é uma zona planar deprimida e alongada, de direcção NW-SE, delimitada a leste e oeste pelas falhas de Santiago e das Fontinhas. As cotas médias do graben situam-se entre os 50 e os 70 m de altitude, com cotas na ordem dos 100 m na zona da base da falha das Fontinhas. Esta superfície aplanada inclina divergentemente para N e para S, até atingir o nível do mar no litoral, fazendo-se essa divergência ao longo de um eixo aproximadamente NE-SW que passa na área entre o Juncal e Santa Luzia.

Neste graben há a destacar a área abatida da Caldeira das Lajes, que define um pequeno compartimento aproximadamente quadrangular, de cotas entre os 5 e os 7 m, e delimitado por arribas com um desnível entre os 20 e 30 m de altura.

A Serra do Cume delimita o graben das Lajes na sua bordadura ocidental através da falha das Fontinhas, orientada NW-SE. O topo da Serra do Cume tem cotas variando entre os 450 e os cerca de 500 m ao longo de uma cornija apertada, descendo para o graben por uma vertente abrupta até aos 300 m, definindo a partir daí uma zona mais aplanada até aos cerca de 200 a 250 m, cotas estas que definem o bordo da escarpa da falha das Fontinhas. Esta escarpa é abrupta, inclinada para NW, vencendo um desnível de cerca de 50 a 100 m, passando a sua base aproximadamente aos 150 m de altitude.

O litoral norte do graben é dominado por um litoral de arriba, com pequenas baías ocupadas por praias de calhau; o litoral sul é essencialmente um litoral de praia, predominantemente de areia.

5. Coberto Vegetal

O coberto vegetal da região do graben das Lajes é dominado por pastagens (cerca de 70% da área) e terrenos com ocupação agrícola (20% da área, com predomínio de campos de milho), a que se associam, nas proximidades das áreas habitacionais pequenas áreas hortícolas e vinhas (6% da área). Os restantes 4 % são ocupados por floresta, em geral nas zonas de fluxos de lavas recentes (biscoito das Fontinhas e Caldeira das Lajes) assim como na bordadura do graben, nas zonas de vertente da Serra de Santiago e da escarpa das Fontinhas. Nas lavas recentes a vegetação tende a ser representada pelas comunidades arbustivo-arbóreas de

“incenso”, dominadas por *Pittosporum undulatum*, faias, acácias e louro (Dias, 1989, *in* Novo *et al.*, 2001). A vegetação de eucalipto também se concentra nos derrames lávicos recentes ou nas vertentes de cones vulcânicos secundários, ocorrendo normalmente acima dos 100 m de altitude.

A vegetação natural, residualmente representada, está acantonada a zonas de vertente e derrames lávicos recentes, representando-se, segundo Sjörgen (1973, *in* Rodrigues, 1933) pelas seguintes associações:

- Zona de *Festuca petrea*/*Euphorbia azorica* – entre os 0 e os 100 m de altitude;
- Zona de *Myrica faya*/*Pittosporum undulatum*/*Mercurialis annua* – acima dos 100 m de altitude¹.

6. Geologia

6.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma caracterização geológica da área de estudo. A vasta informação geológica disponível em trabalhos anteriores, que se referem, incluindo a análise dos dados de sondagens dos furos de captação para abastecimento domiciliário, foi complementada com os resultados dos trabalhos de perfuração levados a cabo durante o presente Estudo, nomeadamente os 10 piezómetros com carotagem contínua até ao aquífero basal e as 14 sondagens para recolha de amostras de solos. Estes elementos são apresentados em Aqualis (2010) e a sua interpretação detalhada em Novo (2010), ambos anexos do presente Estudo.

6.2 Caracterização geral

A Terceira é uma ilha vulcânica recente formada pela actividade de três centros vulcânicos principais: (1) o maciço vulcânico dos Cinco Picos, (2) o maciço vulcânico de Guilherme Moniz-Pico Alto e (3) o maciço vulcânico de Santa Bárbara. É assim uma ilha constituída quase exclusivamente por:

- **Materiais vulcânicos de natureza efusiva** – escoadas de lavas.
- **Materiais vulcânicos de natureza explosiva** – ignimbritos, lapilli e bagacinas, bombas, cones de escórias, depósitos freatomagmáticos, etc.
- **Depósitos termais** – precipitados siliciosos e depósitos fumarolianos da Furna do Enxofre (Zbyszewski *et al.*, 1971); são formações com uma representação muito secundária.
- **Formações sedimentares** – aluviões, cascalheiras, dunas e depósitos de praia (Zbyszewski *et al.*, 1971); são formações com representação muito secundária.

As formações da ilha Terceira estruturam-se nos seguintes grandes grupos, tal como mostra a Fig. 5 (Self, 1974; Self, 1986; Self e Gunn, 1976; Lloyd e Collis, 1981; Rodrigues, 1993):

¹ Esta associação vegetal ocorre na ilha Terceira a altitudes entre os 100 e os 500 m; no graben das Lajes as cotas mais elevadas (inferiores a 500 m) situam-se na sua bordadura, na vizinhança da Serra do Cume.

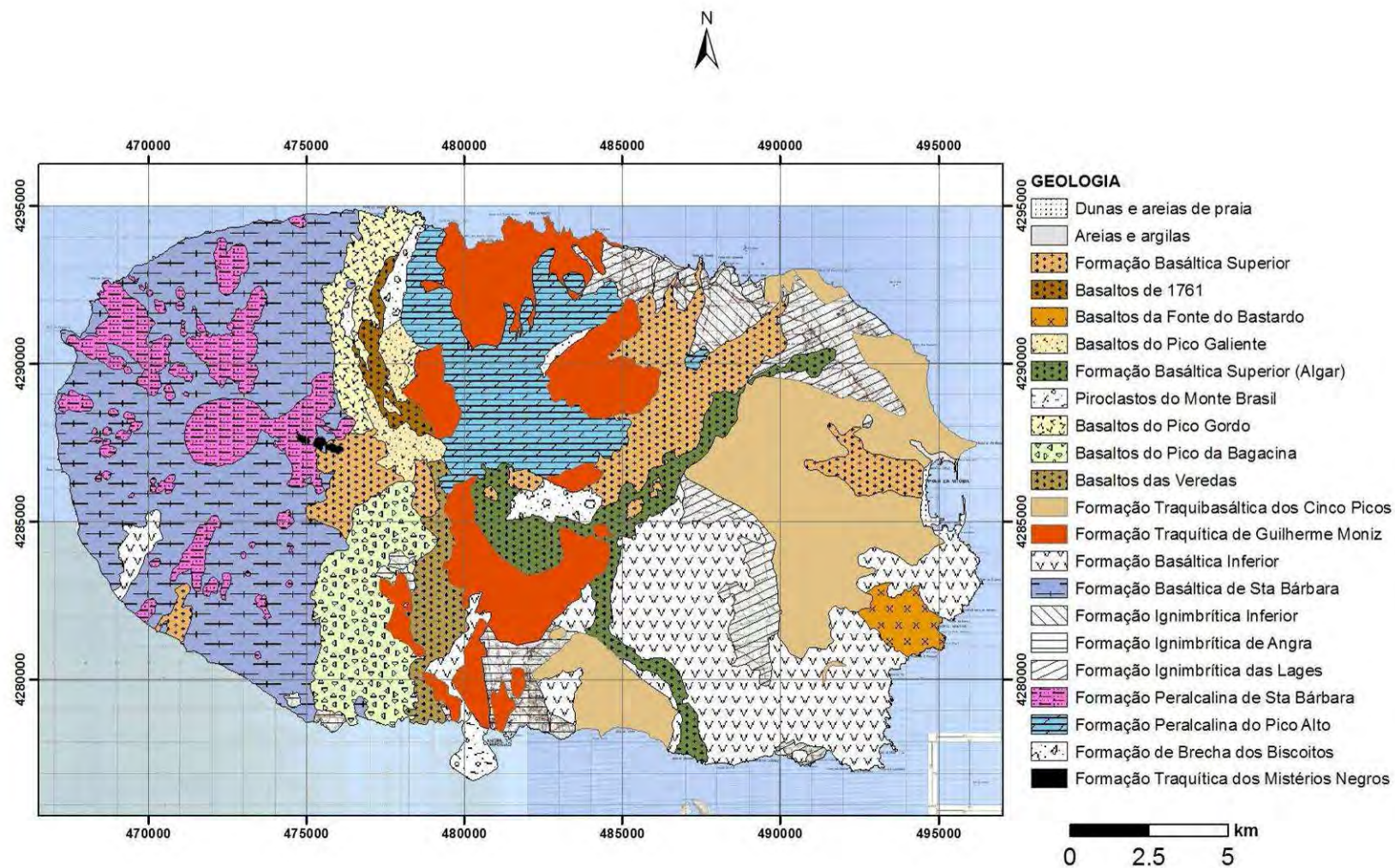


Fig. 5 – Geologia da ilha Terceira (adaptado de Lloyd e Colis, 1981)

- **Grupo Inferior da Terceira** – de idades superiores a 23 000 anos, dominado por formações lávicas mas onde surgem também formações piroclásticas; o seu topo é marcado por um importante evento explosivo, definido pelas Formações Ignimbríticas Inferiores:
 - **Formação Traquibasáltica dos Cinco Picos** – constituída sobretudo por escoadas lávicas basálticas a traquíticas, com raros níveis de piroclastos intercalados, que podem contudo ser de grande espessura. Associada à actividade do aparelho vulcânico dos Cinco Picos.
 - **Formações Traquíticas de Guilherme Moniz** – constituída por materiais essencialmente traquíticos, associados à actividade do aparelho vulcânico de Guilherme Moniz.
 - **Formação Basáltica de Santa Bárbara** – constituída por lavas basálticas, materiais de projecção (piroclastos de queda e escórias) e diversos cones adventícios. De idades acima dos 25 000 anos, está associada à actividade do aparelho vulcânico de Santa Bárbara.
 - **Formações Basálticas Inferiores da Terceira** – constituídas sobretudo por escoadas lávicas basálticas resultantes de erupções nos flancos dos vulcões de Guilherme Moniz, Cinco Picos e zona fissural, assim como, pontualmente, por pequenos cones vulcânicos nos flancos do maciço de Santa Bárbara. Apresentam-se em geral muito fracturadas, com domínio das fracturas verticais. Possuem níveis de brechas de base que em regra constituem um pouco menos de 25% do volume total das escoadas. Localmente podem também apresentar cavidades. O grau de alteração é variável e podem estar associadas a piroclastos, que tendem a apresentar-se mais alterados, podendo esta alteração ser elevada nos níveis mais antigos. Os cones de escórias associados a estes depósitos possuem calibração e granulometria diferencial, ocorrendo um aumento da calibração e uma diminuição da granulometria dos clastos na direcção das áreas distais da erupção.
 - **Formações Ignimbríticas Inferiores da Terceira** – constituídas por depósitos ignimbríticos, em regra pouco consolidados e muito alterados, mais antigos que as formações ignimbríticas de Angra. Estes depósitos são compostos por pomitos, cinzas, elementos líticos e blocos traquíticos.
- **Grupo Superior da Terceira** – formações de idade igual ou inferior a 23 000 anos, dominadas por depósitos de natureza piroclástica, a que se associam, sobretudo nas formações mais recentes, uma importante componente lávica. O topo desta sequência é caracterizado por episódios de escoadas lávicas, muitos de idade histórica, assinalando eventos associados a erupções relativamente pequenas, originadas em cones desenvolvidos nos flancos dos principais aparelhos vulcânicos, em especial Pico Alto.
 - **Formação Ignimbrítica de Angra** – constituída por materiais pomíticos pouco soldados, de natureza traquítico-comendítica, clastos cinzento escuros e detritos líticos, numa espessura que não excede os 12 m; na sua base é comum ocorrerem fósseis de vegetação carbonizada. A dimensão dos clastos e o grau

de soldadura é muito variável; o grau de soldadura tende a ser máximo na base das escoadas. Os clastos maiores tendem a ocorrer nas zonas centrais e basais das escoadas. As partes consolidadas das escoadas estão muito fracturadas mas grande parte das fracturas encontram-se preenchidas com materiais de alteração. Nas escoadas menos espessas existe em geral uma baixa consolidação dos materiais mas, nas escoadas que preenchem depressões, até cerca de 70% da espessura da escoada pode apresentar-se consolidada. Em termos de espessuras, estas podem ultrapassar os 15 m, na área entre Caldeira das Lajes e Vila Nova, registando-se uma amplitude de valores entre 0,5 m nalgumas zonas de maior altitude e mais de 20 m nalgumas áreas baixas do litoral. No resto do graben as espessuras parecem variar entre os 10 e os 15 m, em média. A origem dos materiais desta formação situa-se no centro vulcânico do Pico Alto e tem idades registadas de 23 000 a 23 100 anos.

- o **Formação Ignimbrítica das Lajes** – constituída por materiais pomíticos, de natureza traquítica, clastos e detritos líticos, com um grau de soldagem variável e espessuras frequentemente superiores a 10 m, está associada às erupções plinianas do Pico Alto. Tem idades da ordem dos 19 000 a 19 700 anos, sendo as mais recentes formações ignimbríticas da ilha.
- o **Formações Peralcalinas de Pico Alto e Santa Bárbara** – são formações de natureza predominantemente traquítica, constituídas por escoadas traquíticas e traquibasálticas, estando associadas ao vulcanismo pós-abatimento das caldeiras dos vulcões de Guilherme Moniz e Santa Bárbara.
- o **Formação da Brecha dos Biscoitos** – constituída por escoadas piroclásticas pouco diferenciadas e lahares, estando os materiais em geral pouco soldados e pouco alterados. Estão associadas às zonas de bordadura das escoadas Peralcalinas de Pico Alto.
- o **Formações Basálticas Superiores da Terceira** – dominadas por lavas de natureza basáltica, a que se associam piroclastos, essencialmente do tipo tufo. Podem dividir-se em oito unidades: (1) Tufos do Monte Brasil, (2) Basaltos do Pico Gordo, (3) Basaltos do Pico do Galiarte I, (4) Basaltos do Algar do Carvão, (5) Basaltos da Fonte do Bastardo, (6) Basaltos do Pico da Bagacina, (7) Basaltos das Vareiras, (8) Basaltos da erupção de 1761.
- **Formações sedimentares** – de idade Plistocénica a recente, são constituídas por aluviões, cascalheiras, dunas e depósitos de praia, estando estas duas últimas especialmente representadas na região de Praia da Vitória.

O graben das Lajes, especificamente, é constituído pelas formações abaixo descritas de modo mais pormenorizado, de acordo com Lloyd e Collis (1981) e Rodrigues (1993):

Formação Traquibasáltica dos Cinco Picos – formação que constitui a base do estratovulcão dos Cinco Picos (e por consequência a base do sector das Lajes), engloba escoadas lávicas e piroclastos de natureza globalmente traquibasáltica, sendo as unidades piroclásticas em geral pouco espessas. As escoadas lávicas são basaltos ankaramíticos, havaítos e traquitos insaturados, emitidos de um aparelho central antes do seu colapso e consequente formação da caldeira dos Cinco Picos. Algumas escoadas foram também emitidas a partir de cones

adventícios nos flancos deste estratovulcão, em actividade de tipo estromboliana. As escoadas lávicas costumam possuir níveis de escórias de base que podem perfazer até 10% da espessura total do derrame (e no caso das escoadas terem uma natureza mais ácida, surgem também níveis de escórias de topo). Algumas escoadas são muito vacuolares e, no caso dos níveis lávicos mais compactos, tende a registar-se grande fracturação vertical nas zonas centrais, com um espaçamento médio entre as fracturas variando de 1 a 3 m (passando a valores entre 0,2 e 1 m na proximidade de zonas de falha). As aberturas destas fracturas variam de alguns milímetros, nas escoadas mais espessas, até 0,5 m nas escoadas menos espessas e/ou nas proximidades das zonas de falha.

Os piroclastos, predominantemente de natureza basáltica, são principalmente depósitos de queda constituídos por bombas, lapilli e, junto dos centros de emissão, escórias; tipicamente têm espessuras muito inferiores às escoadas lávicas e tendem a apresentar-se muito alterados e compactados pelo peso das formações sobrejacentes. Com frequência, o topo destes níveis piroclásticos apresenta-se almagrizado na zona de contacto directo com escoadas de lavas. Intercalados entre as escoadas surgem por vezes paleossolos, com um grau variável de alteração térmica causado pelas escoadas sobrejacentes; estes paleossolos podem por vezes ter extensões entre 0,5 e 3 km, e espessuras entre 0,3 e 1,7 m, correspondendo em geral a níveis piroclásticos muito alterados. Além de formar o substrato do graben das Lajes, esta formação aflora nas escarpas de falha das Fontinhas, Barreiro, Boavista, S. Lázaro, Santiago, nas arribas litorais entre a Caldeira das Lajes e o Forte do Espírito Santo e nas arribas entre Poço da Areia e Cabo da Praia.

Um corte típico desta formação (visível na arriba costeira NE da Serra de Santiago) tem espessuras de cerca de 90 m e é formado por sete fluxos lávicos, intercalados com depósitos piroclásticos de queda constituídos por bombas, escórias e lapilli, a que se associam frequentes paleossolos soterrados por eventos vulcânicos posteriores (atestando a existência de períodos de quiescência vulcânica). Na área de Praia da Vitória e Caldeira das Lajes a espessura total da formação é em geral superior a 50 m. As espessuras das escoadas lávicas individuais variam entre 3 a 20 m e os níveis piroclásticos tendem em geral a ser pouco espessos. As Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 e Fig. 10 ilustram alguns aspectos desta formação geológica.



Fig. 6 – Afloramento de traquibasaltos dos Cinco Picos na região das Fontinhas



Fig. 7 – Pormenor de afloramento de lavas traquibasálticas dos Cinco Picos (note-se os vacúolos)



Fig. 8 – Unidades piroclásticas na formação dos Traquibasaltos dos Cinco Picos (sector de Santa Rita)



Fig. 9 – Níveis piroclásticos e de alteração dos Traquibasaltos dos Cinco Picos (sector de Santa Rita)



Fig. 10 – Pormenor dos níveis piroclásticos e de alteração dos Traquibasaltos dos Cinco Picos (sector de Santa Rita)



Fig. 11 – Depressão da Caldeira das Lajes sendo visível a escarpa envolvente



Fig. 12 – Fundo da caldeira das Lajes e muros de pedra basáltica das formações que afloram no seu interior

- **Formações Basálticas Inferiores da Terceira** – constituídas por lavas basálticas de natureza ankaramítica-olivínica e havaítica e por depósitos piroclásticos. Os piroclastos são depósitos de queda – bombas, lapilli e, nas proximidades dos centros emissores, escórias – e contribuem com uma quantidade inferior de material para estas formações. As escoadas (lávicas e piroclásticas) destas formações foram expelidas a partir da zona central de fissura e dos cones vulcânicos dos flancos dos vulcões de Guilherme Moniz e Cinco Picos, estando sobrejacentes à Formação Traquibasáltica dos Cinco Picos. Na zona de estudo ocorrem no fundo da Caldeira das Lajes e na zona de Cabo da Praia. As Fig. 11 e Fig. 12 ilustram alguns aspectos desta formação.
- **Formação Ignimbrítica das Lajes** – são os depósitos ignimbríticos mais recentes, com idades entre 19 000 a 19 680 anos (Shotton *et al.*, 1984, *in* Schaller *et al.*, 2005), e foram emitidos a partir do aparelho vulcânico do Pico Alto. São constituídos por

ignimbritos de composição comendeítica-traquítica, formados por depósitos de vidro vulcânico negro, com abundantes inclusões líticas de traquitos e basaltos. A granulometria dos clastos e o seu grau de soldadura varia ao longo da escoada de acordo com: (1) a dimensão tende a diminuir em direcção ao topo da escoada e (2) a soldadura é em geral elevada (com os clastos fortemente soldados) na base, reduzindo-se progressivamente em direcção o topo da escoada. As zonas superiores são em geral moderadamente compactadas, por vezes com indícios de meteorização em pequenas áreas. As escoadas menos espessas podem possuir reduzido grau de consolidação; quando as escoadas preenchem zonas de depressão cerca de 70% da espessura das escoadas está soldada (Rodrigues, 1993). Em termos de distribuição em área, a granulometria também não é uniforme, tendendo os clastos de maiores dimensões a ocorrer nas zonas centrais das escoadas e as granulometrias progressivamente mais finas nas zonas sucessivamente mais distais. Na base das escoadas podem ocorrer níveis de brecha, de espessuras raramente acima de 0,5 m. Entre a ribeira de Agualva e a Caldeira das Lajes esta formação está representada por tufo cujo tamanho dos clastos aumenta para o topo da escoada e cuja base é fortemente soldada, diminuindo o grau de soldadura para o topo da escoada, (Lloyd e Collis, 1981). No graben das Lajes, entre Santa Luzia e Caldeira das Lajes, estes depósitos recobrem a Formação Traquibasáltica dos Cinco Picos e um extenso paleossolo². No troço NE da Serra de Santiago cobrem a Formação Traquibasáltica dos Cinco Picos. Nas vertentes NE da Caldeira das Lajes, nas arribas costeiras entre Ponta de José Vieira e Vila Nova esta formação atinge os 15 m de espessura. As Fig. 13, Fig. 15, Fig. 14 e Fig. 16 ilustram alguns aspectos desta formação geológica.

² Este paleossolo possui uma espessura média de 0,5 m; a sua espessura máxima atinge os 1,3 m e a espessura mínima os 0,30 m.



Fig. 13 – Pormenor das formações ignimbríticas na arriba da Caldeira das Lajes



Fig. 14 – Formações dos Ignimbritos das Lajes (sector das Lajes)



Fig. 15 – Ignimbritos das Lajes (Caldeira das Lajes)



Fig. 16 – Formações dos Ignimbritos das Lajes (pormenor; sector das Lajes)

- **Formações Basálticas Superiores da Terceira** – formações extruídas nos últimos 23 100 anos (cf. Rodrigues, 1993), constituídas por basaltos alcalino-olivínicos a mugearíticos, com depósitos piroclásticos de queda associados (bombas, lapilli e

escórias). As escoadas de lavas, em claro predomínio, são geralmente pouco espessas (em geral não excedem os 5 m de espessura) e em regra do tipo *aa*, muito fluidas, muito vacuolares e muito extensas; costumam possuir níveis escoriáceos de espessuras entre 0,3 e 1 m (sobretudo na base da escoada) e estão associadas a fontes de emissão na zona de fissura da ilha e em cones adventícios situados nas vertentes da Serra do Cume (Pico Celeiro e Fonte do Bastardo). Nas zonas de maior declive têm importantes cavidades e tubos de lava (Rodrigues, 1993). A densidade de fracturação é muito alta, de espaçamento, no caso das fracturas verticais, não superiores a 2,5 m, com aberturas entre alguns milímetros e 0,5 m, em regra sem qualquer preenchimento; a fracturação horizontal é muito menos importante, tendo as fracturas aberturas pequenas (Rodrigues, 1993). No graben das Lajes associam-se especificamente aos centros emissores de Pico Celeiro, situado directamente sobre a falha das Fontinhas, e ao Algar do Carvão. Os basaltos associados às emissões do Pico Celeiro situam-se entre este pico e a zona ocidental de Praia da Vitória (Poço da Areia-Belo Jardim), recobrimo os Traquibasaltos dos Cinco Picos; os basaltos associados às emissões do Algar do Carvão situam-se a oeste da vila das Lajes, cobrindo os Ignimbritos das Lajes e também os Traquibasaltos dos Cinco Picos. As Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19 e Fig. 20 ilustram alguns aspectos desta formação. Os piroclastos afloram intercalados entre lavas ou formam cones vulcânicos; têm em geral reduzida continuidade espacial e a percentagem de vazios entre os clastos é elevada devido à pequena alteração e compactação dos depósitos (Schaller *et al.*, 2005; Rodrigues, 1993). De acordo ainda com os mesmos autores, nos cones vulcânicos ocorre importante diferenciação granulométrica dos clastos. Na zona do Pico Celeiro a escoada que se estende até ao litoral de Praia da Vitória é basáltica, tendo-se registado na visita de campo de Maio de 2009, na região de Cruz do Pico, a ocorrência de um depósito de piroclastos (tipo bagacina, friáveis, soltos, de granulometria algo grosseira, de aspecto muito permeável) subjacente à escoada lávica (Fig. 19 e Fig. 20).



Fig. 17 – Lavas da formação dos Basaltos Superiores (Cruz do Pico/Pico Celeiro; pormenor)



Fig. 18 – Lavas da formação dos Basaltos Superiores (Cruz do Pico/Pico Celeiro) e sua relação com escoada piroclástica subjacente



Fig. 19 – Piroclastos subjacentes às lavas dos Basaltos Superiores de Cruz do Pico/Pico Celeiro



Fig. 20 – Piroclastos subjacentes às lavas dos Basaltos Superiores de Cruz do Pico/Pico Celeiro (pormenor de sucessão de níveis com diferentes granulometrias)

- **Formações sedimentares** – estas formações estão representadas por dunas, areias de praia e acumulações de materiais piroclásticos alterados. As areias de praia e dunas surgem na região de Praia da Vitória. Alguns depósitos de cascalheiras de praia ocorrem na Caldeira das Lajes, Baía da Caldeirinha e na base das arribas da Serra de Santiago (Baía do Zimbral e entre Ponta da Má Merenda e Forte do Espírito Santo). Depósitos de cascalheiras com clastos arredondados, referenciados no

passado como localizados atrás das dunas de Praia da Vitória (Berthois, 1951 *in* Schaller *et al.*, 2005), surgem nos furos de Cabo da Praia e Praia da Vitória/Boavista (Rodrigues, 1995) e nas margens da Ribeira de Santo Antão. É relatada por Lloyd e Collis (1981 *in* Schaller *et al.*, 2005) a existência de cascalheiras de blastos de basalto arredondados, a 10 m de altitude sobre as lavas *pahoehoe* que recobrem o fundo da Caldeira das Lajes, e que podem ser possivelmente antigos níveis de praia. Nas escarpas de falha do graben das Lajes, em particular nas das Fontinhas e de Santiago, surgem depósitos de tefritos alterados e cascalheiras. As Fig. 21 e Fig. 22 ilustram algumas destas formações.



Fig. 21 – Escarpa de falha de Santiago e areias de praia (Praia da Vitória)



Fig. 22 – Praia de calhau (litoral a NE de Caldeira das Lajes)

6.3 Interpretação geológica dos logs de furos na área de estudo

Numa análise de pormenor, focada sobre as formações geológicas interceptadas pelos furos de abastecimento – refira-se que não se conseguiu obter informação sobre as litologias atravessadas pelos furos de Canada da Saúde, Juncal 1, Juncal 2, Vale Farto, Pico Celeiro – tem-se que:

- ◇ **Furo de São Brás – Quatro Canadas:** atravessa sucessivamente uma camada de 12 m de solo e material alterado, a que se seguem basaltos (16 m de espessura), escórias (cerca de 16 m de espessura), areias e clastos que serão provável nível piroclástico (6 m de espessura). Segue-se uma sucessão de camadas de basaltos compactos, alterados e piroclastos (espessura superior a 20 m), passando a uma sequência de camadas de basaltos compactos e por fim, abaixo dos 133 m de profundidade, a basaltos fracturados.
- ◇ **Furo de São Brás – Canada das Covas:** atravessa sucessivamente escoadas de lavas (10 m de espessura), lavas alteradas e desagregadas, por vezes argilificadas (6 m de espessura), lavas compactas (8 m de espessura), lavas com argilificação (2 m), lavas com níveis piroclásticos (14 m de espessura), alternâncias de lavas compactas e lavas alteradas com eventuais níveis piroclásticos (10 m de espessura), lavas compactas (18 m de espessura). A partir dos 66 m e até pelo menos 112 m de profundidade (ponto em que terminou a sondagem) sucede-se

uma sequência de basaltos compactos fracturados.

- ◇ **Furo do Areeiro:** atravessa sucessivamente 5 m de espessura de solos, a que se segue uma alternância de basaltos e escórias (espessura de 33 m), depois uma sucessão de camadas de lavas basálticas (espessura total de 50 m). Abaixo dos 88 m e até pelo menos aos 102 m de profundidade ocorre uma sucessão de escórias vermelhas e basaltos escoriáceos.
- ◇ **Furo das Fontinhas – Canada dos Barreiros:** atravessa sucessivamente lavas compactas com eventuais níveis piroclásticos (8 m de espessura), lavas alteradas (10 m de espessura), lavas negras compactas (16 m de espessura), lavas alteradas com possíveis níveis piroclásticos (14 m de espessura), lavas compactas avermelhadas (4 m de espessura), lavas negras compactas (48 m de espessura) e por fim basaltos fracturados (espessura de pelo menos 37 m), entre os 100 e os 137 m (profundidade a que terminou a sondagem).
- ◇ **Furos de abastecimento doméstico à Base das Lajes:** segundo o relatório de 1990, a geologia da região onde estão instalados a maioria dos furos de abastecimento à base pode caracterizar-se por depósitos de tufos-brechas fracturados, escoadas basálticas, escórias, tufos e pomitos, dispostos em sucessões aproximadamente horizontais ao longo dos blocos definidos e delimitados pelas numerosas falhas que atravessam o graben. São também detectados materiais de baixa permeabilidade e materiais não consolidados, sobrejacentes a uma fina mas compacta escoada de lava, que podem dar origem a um aquífero suspenso onde ocorrem nascentes e poços. Admite-se que as falhas possam funcionar como (1) zonas de infiltração para os níveis aquíferos profundos ou (2) como barreiras, definindo diferentes blocos onde os aquíferos ocorrem a cotas diferentes. As formações atravessadas pelos furos de abastecimento referidos nesse relatório são:
 - **Well 1** – atravessa uma sucessão de solo, cinzas de granulometria média, lavas basálticas compactas, piroclastos grosseiros, cinzas com elementos rochosos, lavas basálticas compactas, cinzas de granulometria fina, lavas basálticas compactas, cinzas com elementos rochosos, e por fim lavas basálticas compactas.
 - **Well Lajes 2** – atravessa uma sucessão de solo, cinzas de granulometria média a grosseira, cinzas de granulometria média, cinzas de granulometria fina, cinzas com elementos rochosos, lavas basálticas compactas, cinzas com elementos rochosos, lavas basálticas compactas, cinzas com elementos rochosos, e por fim lavas basálticas compactas.
 - **Well Lajes 3** – atravessa uma sucessão de solo, cinzas grosseiras, lavas basálticas compactas, cinzas de granulometria média, lavas basálticas compactas, cinzas de granulometria média e por fim lavas basálticas compactas.
 - **Well Vila Nova 2** – atravessa uma sucessão de solo, cinzas de granulometria média, lavas basálticas compactas, cinzas com

elementos rochosos, lavas basálticas compactas, cinzas grosseiras e por fim cinzas dimensão siltítica.

- **Well Cinco Picos 3** – atravessa uma sucessão de solo, basalto compacto, cinzas de granulometria fina, lavas basálticas compactas (sucessão de grande espessura), cinzas com elementos rochosos, basaltos compactos, um nível de escórias, cinzas com elementos rochosos, areias e cinzas de granulometria média, cinzas com elementos rochosos e por fim uma unidade de material argiloso.

Considerando agora a informação recolhida pelos novos furos de sondagem (cf. Aqualis, 2010 e Novo 2010), obtém-se o seguinte zonamento vertical de pormenor:

- ◇ **FP1** – atravessa uma sucessão de solo (1 m de espessura), argilas mais ou menos siltosas (11,5 m de espessura) com algumas intercalações de materiais basálticos vacuolares. Abaixo destes materiais, e até aos 85 m de profundidade (fim da sondagem), ocorre uma sucessão alternante de brechas e materiais basálticos/traquibasálticos vacuolares em geral fracturados e por vezes intensamente fracturados; ocasionalmente surgem intercalações de argilas (cf. Anexo 1).
- ◇ **FB1** – atravessa uma sucessão de solo (1 m de espessura) e argilas arenosas por vezes com intercalações basálticas/traquibasálticas (8 m de espessura, admissivelmente os 2 m finais serão sobretudo material basáltico que poderá corresponder a um tufo). A estes materiais sucedem-se até aos 88 m de profundidade materiais basáltico/traquibasálticos variavelmente alterados, com intercalações de níveis argilosos. Por vezes não há retorno de amostra (ex.: profundidades entre os 13 e os 15 m; cf. Anexo 1).
- ◇ **FP2** – atravessa uma sucessão de solo (1 m de espessura) e argilas arenosas/areias argilosas (17 m de espessura). A estes materiais sucedem-se alternâncias de brechas e materiais basálticos/traquibasálticos, vacuolares, fracturados a por vezes muito fracturados, com intercalações de alguns níveis de argila sobretudo abaixo dos 50 m de profundidade (espessura total da sequência da ordem dos 35 m). Dos 55 aos 63 m de profundidade predominam os níveis de materiais brechóides. Abaixo dos 63 m até ao final da sondagem (aos 77,35 m de profundidade) ocorrem sucessões de materiais basálticos/traquibasálticos pouco fracturados, com frequência pouco porosos, brechas e basaltos porosos em geral fracturados a muito fracturados.
- ◇ **FP3** – atravessa uma sucessão de solo (2 m de espessura) e argilas arenosas/areias argilosas (17 m de espessura). Abaixo destes materiais, e até aos 60,25 m de profundidade, ocorre uma alternância de brechas e materiais basálticos/traquibasálticos com grau variável de fracturação e de porosidade, sendo comum que os materiais menos porosos tendam a ser também os menos fracturados (cf. Anexo 1).
- ◇ **FP3A** – atravessa um solo com 2 m de espessura, a que se segue uma

sequência alternante de argilas arenosas areias finas argilosas até aos 16,50 m de profundidade (fim da sondagem).

- ◇ **FB3** – atravessa um solo com 2 m de espessura, a que se segue uma alternância de argilas arenosas e areias finas argilosas (espessura total de 17 m). Subjacentemente ocorre uma sucessão alternante de brechas e materiais basálticos/traquibasálticos vacuolares e/ou fracturados até ao final da sondagem (aos 65 m de profundidade).
- ◇ **FP4/J2F3** – atravessa um solo (2 m de espessura), a que se sucedem argilas arenosas (5 m de espessura). Segue-se até aos 60 m de profundidade (fim da sondagem) uma alternância de brechas e materiais basálticos/traquibasálticos, em regra vacuolares, por vezes fracturados. De assinalar que na secção entre os 10,65 e os 12,35 m de profundidade não houve recuperação do testemunho.
- ◇ **FP5** – atravessa um solo com 1 m de espessura, a que se segue uma sequência de areias finas, mais argilosas a partir dos 7 m de profundidade. A partir dos 11,5 m e até ao fim da sondagem (aos 12 m) ocorrem materiais basálticos/traquibasálticos pouco fracturados (cf. Anexo 1).
- ◇ **FB5** – atravessa um solo com 1 m de espessura, a que se segue uma areia fina argilosa (1 m de espessura), basaltos muito alterados (2 m de espessura), uma sucessão de argilas arenosas e areias argilosas (5 m de espessura). A partir dos 9 m de profundidade ocorrem materiais basálticos a traquibasálticos, por vezes porosos e/ou com intercalações argilosas.
- ◇ **FP6** – atravessa um solo (1 m de espessura), a que se sucede uma alternância de argilas arenosas, areias argilosas e argilas (cerca de 53 m de espessura). A partir dos 54,25 m de profundidade ocorrem materiais basálticos/traquibasálticos mais ou menos vacuolares, fracturados a pouco fracturados e um nível de brechas (que ocorre dos 58,85 m aos 60,35 m, profundidade a que termina a sondagem; cf. Anexo 1).
- ◇ **FP6A** – atravessa um solo com 2 m de espessura, a que se segue uma sucessão de argilas arenosas e areias finas argilosas até aos 41,65 m de profundidade (fim da sondagem; cf. Anexo 1).
- ◇ **FP6B** – atravessa um solo com 2 m de espessura, a que se seguem argilas arenosas e areias argilosas até aos 12 m de profundidade (fim da sondagem; cf. Anexo 1).
- ◇ **FB6** – atravessa um solo (1 m de espessura), a que se sucede uma alternância de argilas arenosas, areias argilosas e argilas até aos 54,25 m de profundidade (cerca de 53 m de espessura). Dos 54,25 m aos 65 m de profundidade (fim da sondagem) ocorrem materiais basálticos a traquibasálticos vacuolares.
- ◇ **FP7** – atravessa um solo com 2 m de espessura, a que se sucede uma alternância de brechas, materiais basálticos/traquibasálticos e ocasionalmente intercalações de níveis de argilas (cf. Anexo 1) até aos 67,50 m de profundidade (fim da sondagem). O nível mais profundo de

argilas ocorre entre os 38 e os 38,75 m de profundidade.

Com base na informação recolhida nos vários furos e piezómetros instalados no âmbito deste Estudo, assim como da integração da informação litológica dos furos utilizados por Schaller *et al.* (2005) e dos relatórios dos furos de abastecimento para o concelho de Praia Vitória – Açores, construiu-se um conjunto de imagens em três dimensões da geometria das unidades litológicas atravessadas nestas sondagens. Esta visualização resulta do tratamento dos dados acima referidos e consequente inserção em ferramentas gráficas dos programas *Groundwater Modeling System* (GMS) e *Visual MODFLOW*.

As Fig. 23 e Fig. 24 representam a visão oblíqua dos furos utilizados por Schaller *et al.* (2005) e posteriormente por Oliveira *et al.* (2010), permitindo uma visualização em três dimensões das colunas litológicas.

As Fig. 25 e Fig. 26 representam a visão oblíqua das colunas litológicas simplificadas de alguns furos obtidos no âmbito do estudo³.

³ Alguns furos (eg. FP6A) não foram representados devido à escala de representação não permitir uma adequada discretização e conveniente visualização da informação nas figuras aqui apresentadas. Esta informação foi contudo considerada para a elaboração do modelo matemático apresentado no Capítulo 10.

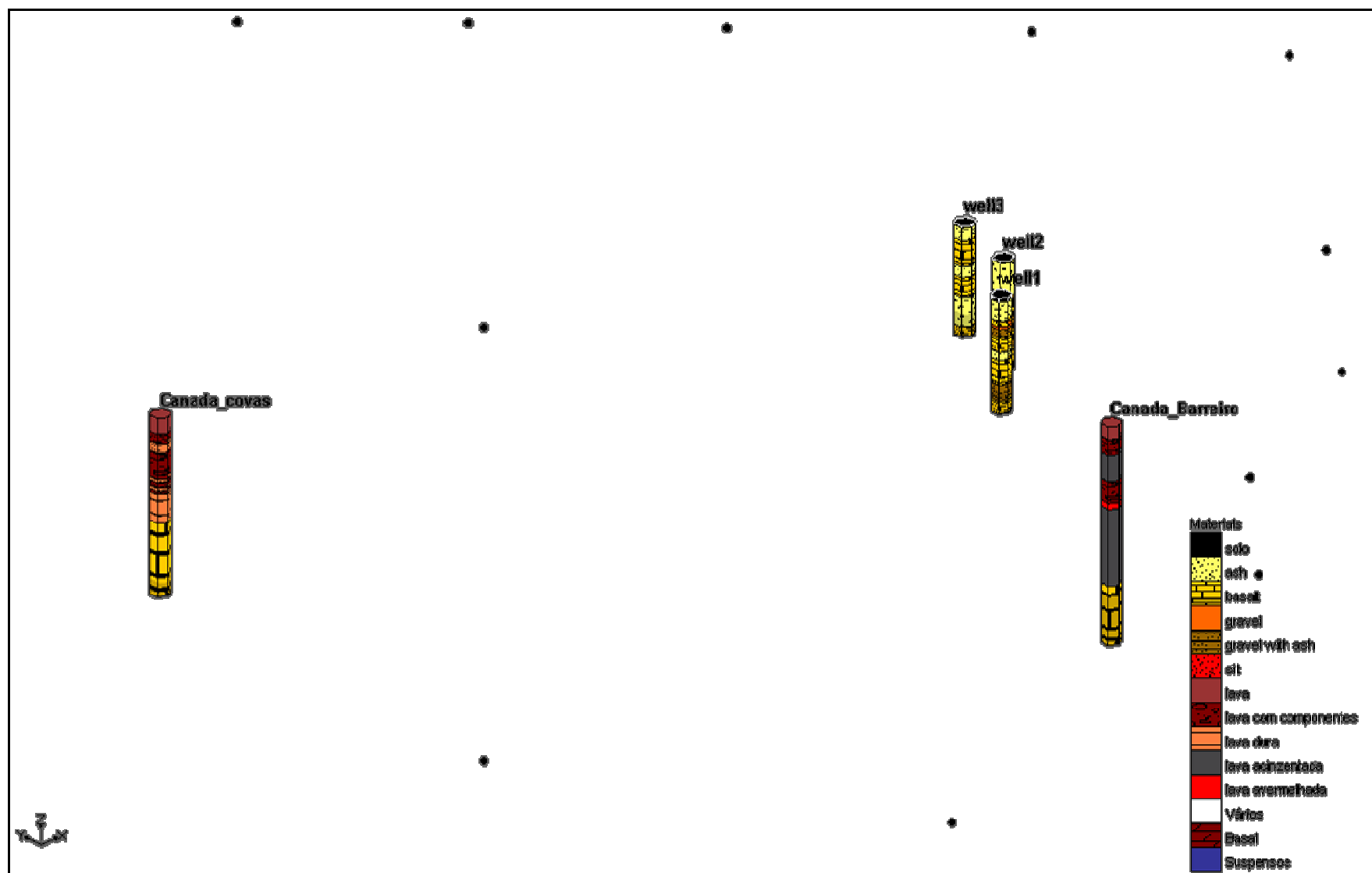


Fig. 23 – Visão oblíqua e geral das colunas litológicas dos furos Well 1, Well 2, Well 3, Canada das Covas e Canada Barreiro

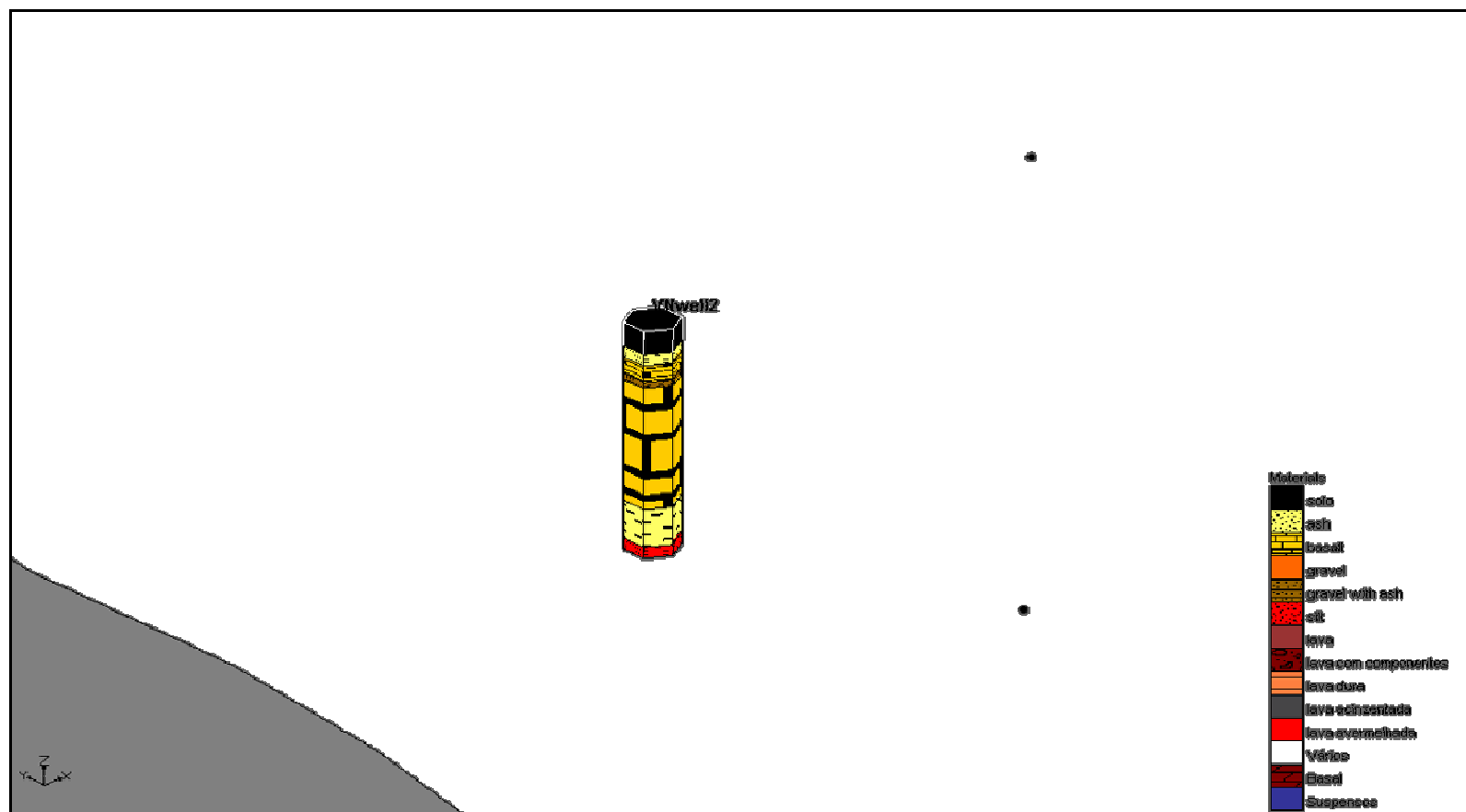


Fig. 24 – Coluna litológica do furo de Vila Nova

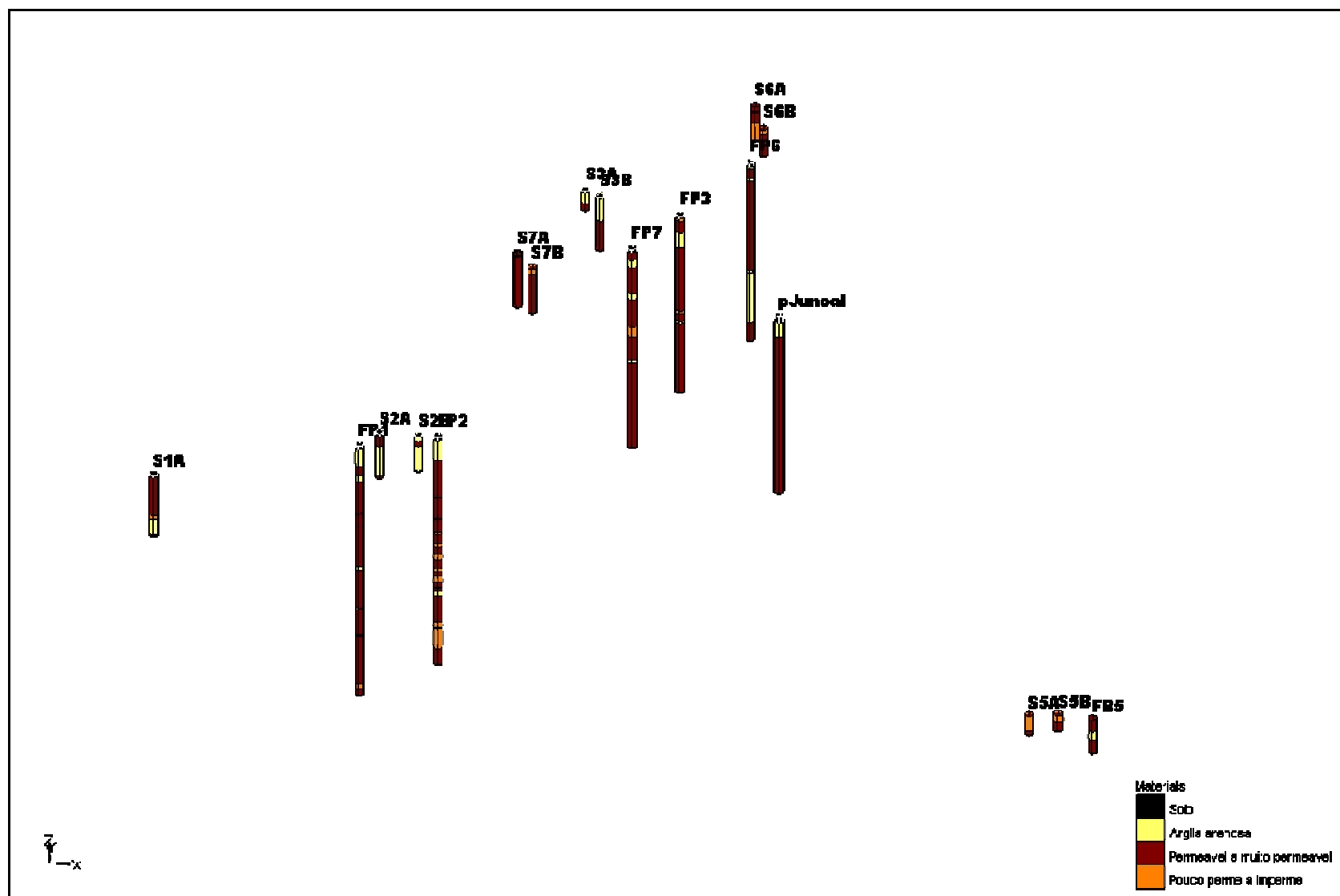


Fig. 25 - Colunas litológicas simplificadas em corte oblíquo (sobreelevação vertical de 10 vezes) - o furo "pJuncal" corresponde ao piezômetro FP4

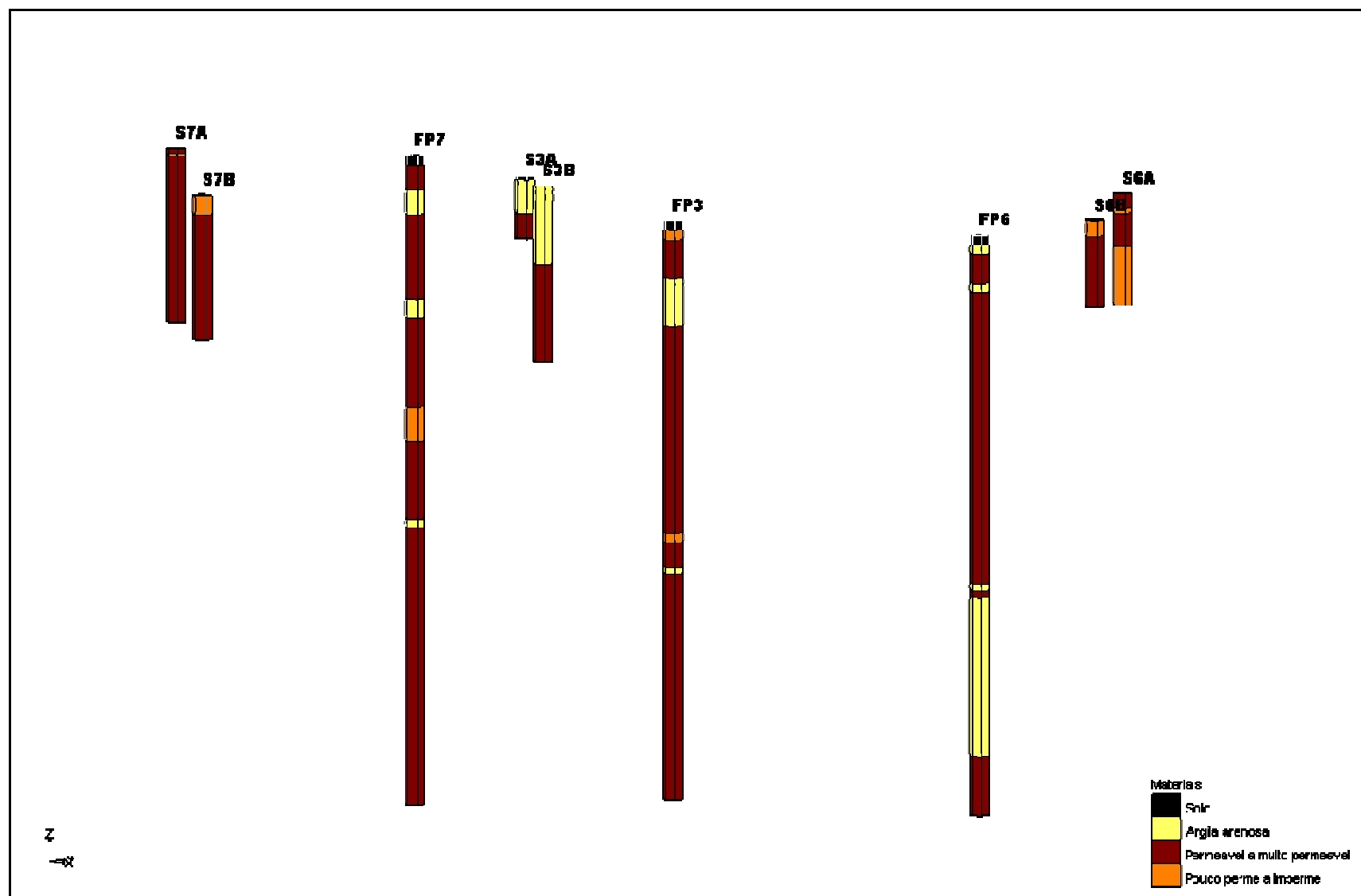


Fig. 26 - Pormenor das colunas litológicas (sobreelevação vertical de 10 vezes)

Estas colunas litológicas constituem os dados de base através dos quais foram construídos os perfis geológicos no programa *Groundwater Modeling System* (GMS) 6.5. Os perfis apresentados nas Fig. 27 e Fig. 28, permitem distinguir níveis de argilas de espessura e continuidade variáveis, possibilitando a transição vertical da água desde os níveis de água mais superficiais para os níveis aquíferos inferiores e de base.

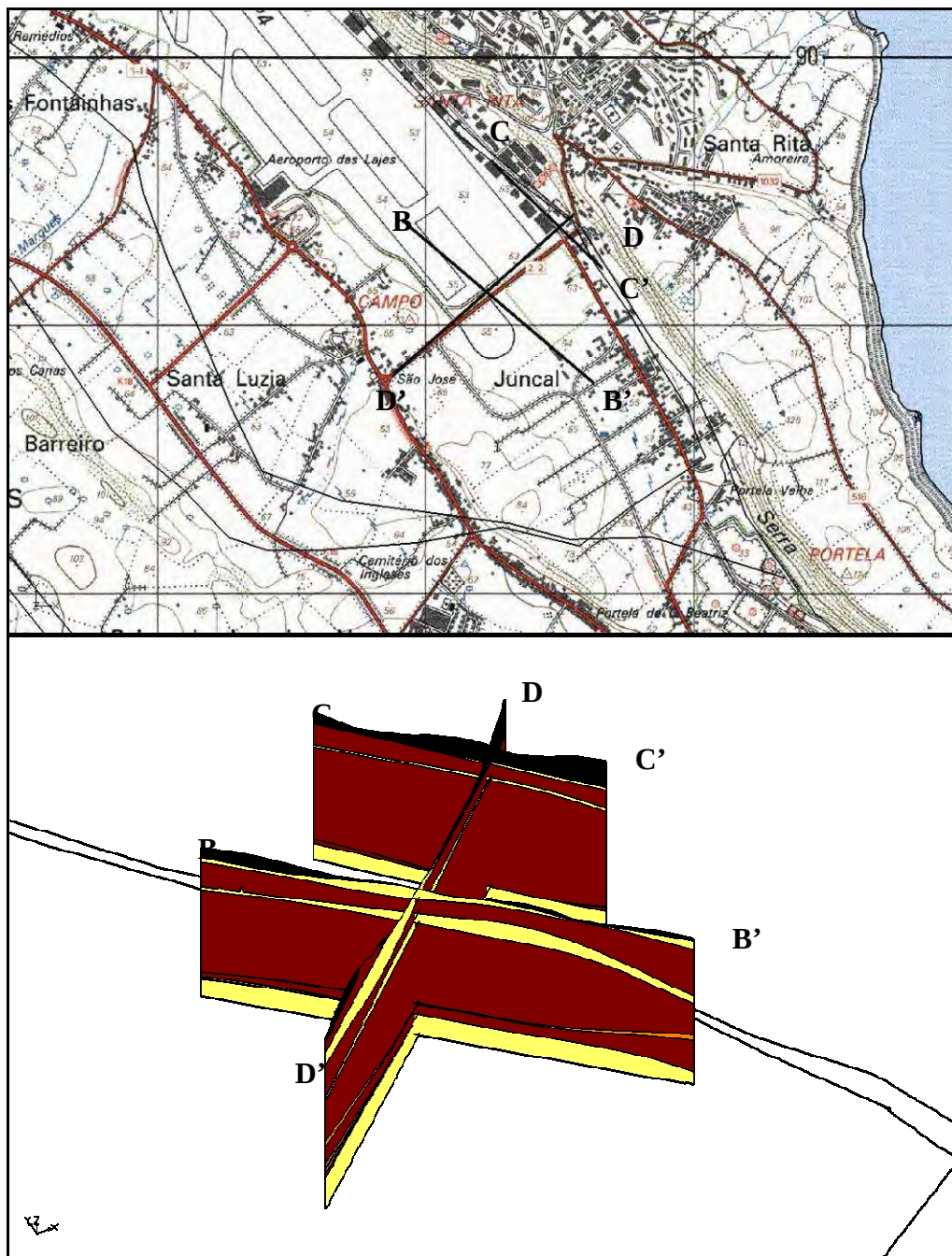


Fig. 27 - Planta e perfis geológicos oblíquos simplificados (sobreelevação vertical de 10 vezes)

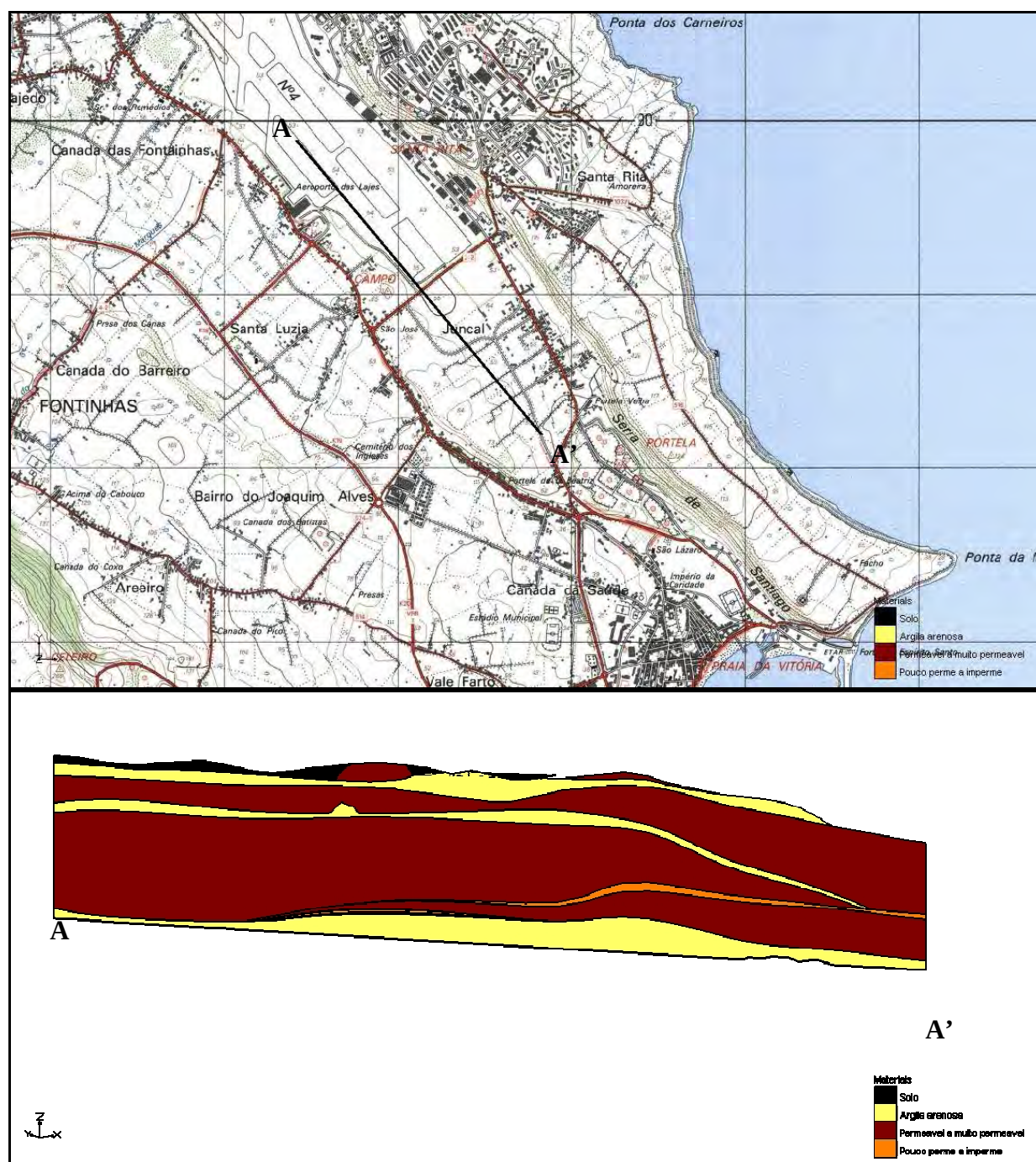


Fig. 28 - Planta e perfil geológico oblíquo simplificado (sobreelevação vertical de 10x)

6.4 Tectónica

Os Açores situam-se na zona da junção tripla entre as placas Americana, Europeia e Africana, numa micro-placa designada por micro-placa dos Açores e que é uma zona de alto fundo, com uma forma grosseiramente triangular (Fig. 29). Esta micro-placa é delimitada (1) a oeste pelo *Rift* do Atlântico Médio, (2) a sul pela Zona de Fractura Oriental dos Açores (correspondendo ao prolongamento da falha da Glória, que faz a ligação com os sistemas de falhas do Mediterrâneo) e (3) a nordeste por uma estrutura distensiva de tipo *Rift*, com uma orientação

N35W, e composta por uma sucessão de bacias de *Rift* dispostas em *echelon*, onde se localizam diversos aparelhos vulcânicos emersos e submersos, designada por *Rift* da Terceira (Machado, 1969).

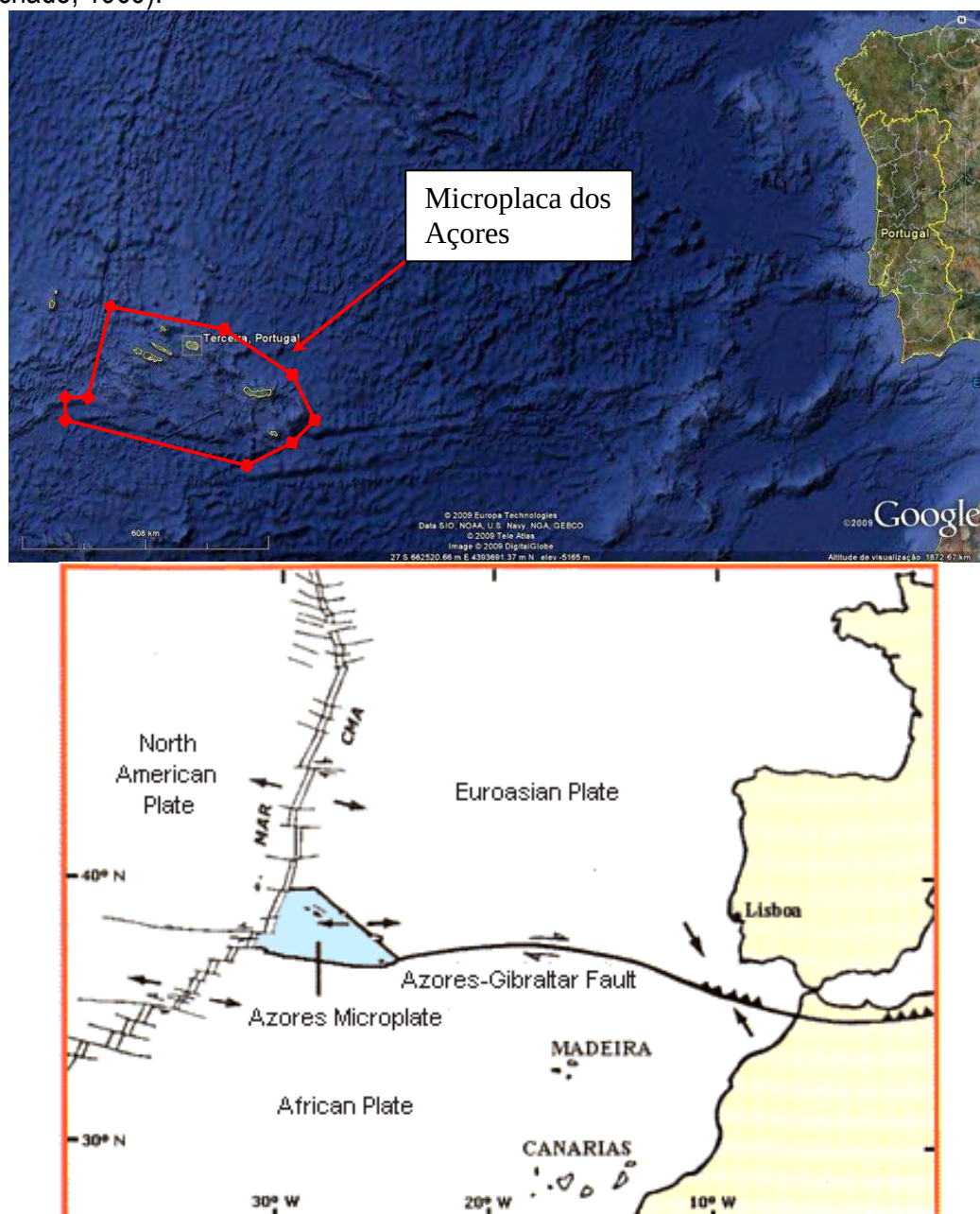


Fig. 29 – Localização da micro-placa dos Açores e respectivo enquadramento tectónico

Fonte: adaptado de Morton *et al.* (1998), in <http://www.ewpnet.com/azores/geology.htm>

Entre as diversas estruturas do *Rift* da Terceira encontra-se o lineamento vulcano-tectónico designado por Dorsal da Terceira, provável responsável pela existência da ilha (Searle, 1980) e que controla a orientação da maioria dos acidentes estruturais que nela ocorrem (Forjaz, 1988 e Laughon e Witermarsh, 1974). A Dorsal da Terceira tem uma orientação aproximada NNW-SSE, a que se associa uma segunda grande orientação de fracturação, de orientação WNW-ESSE, designada por Crista Central da Terceira (Rodrigues, 1993). A fracturação da ilha (Fig.

30) depende assim destas duas grandes estruturas tectónicas, podendo definir-se cinco grandes famílias (Rodrigues, 1993):

- ◇ **Direcção NNW-SSE** – associada à Dorsal da Terceira, representada pelo graben das Lajes e pela fracturação predominante nos maciços dos Cinco Picos e de Guilherme Moniz-Pico Alto.
- ◇ **Direcção WNW-ESE** – associada à Crista Central da Terceira, está representada pelo graben de Pico Gaspar e pelos domos e falhas associadas do maciço de Santa Bárbara.
- ◇ **Direcção N-S** – muito secundária, está representada pelas fracturas a N de Angra do Heroísmo e flanco SW do maciço de Santa Bárbara.
- ◇ **Direcção E-W** – muito secundária, está representada pelas falhas da bordadura oriental do maciço dos Cinco Picos e centro da ilha.
- ◇ **Falhas radiais** – associadas directamente à actividade vulcânica dos três grandes maciços vulcânicos que construíram a ilha.

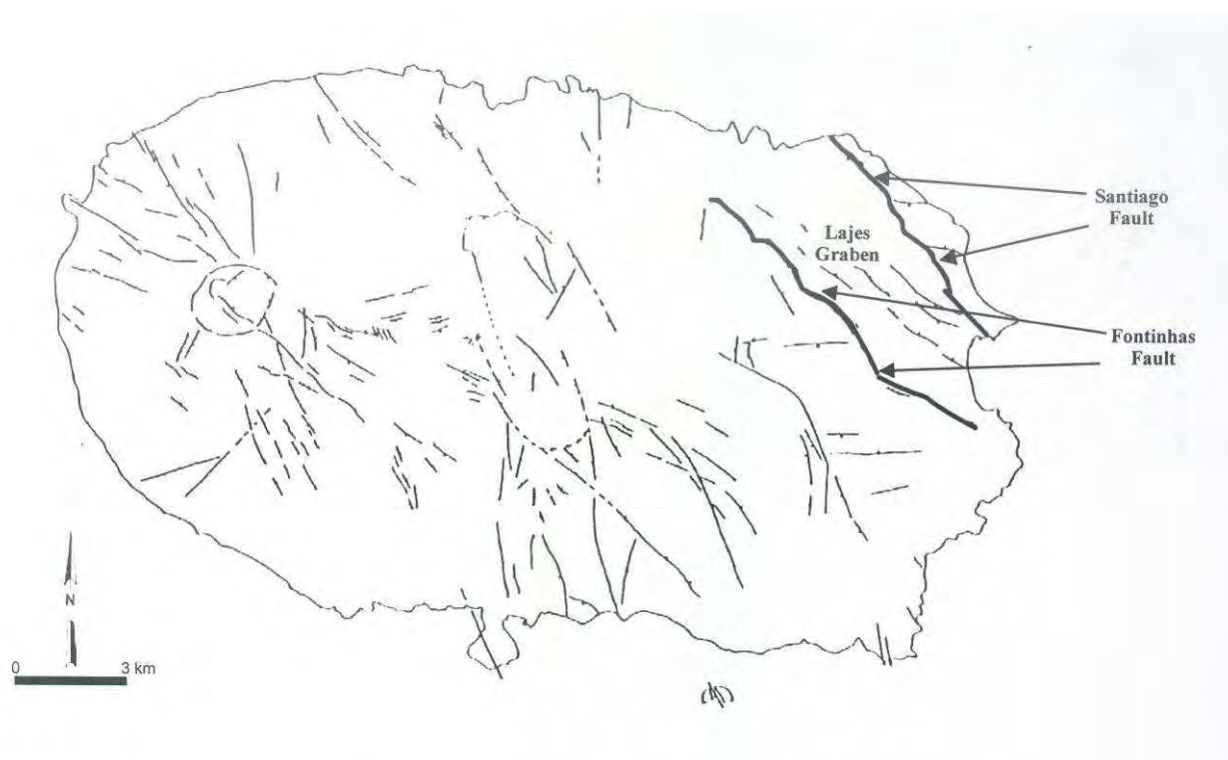


Fig. 30 – Tectónica geral da ilha Terceira

Fonte: Rodrigues (1993)

O estratovulcão dos Cinco Picos, que domina o sector oriental da ilha, é uma estrutura associada à Dorsal da Terceira, tendo sido talvez o aparelho vulcânico mais antigo a emergir do oceano. Este aparelho vulcânico está dividido em três importantes depressões – delimitadas por falhas de orientação N115° a N148° – que são, de oeste para leste: (1) depressão de Grotta do Vale, (2) Caldeira dos Cinco Picos, (3) graben das Lajes.

O graben das Lajes é, assim, também uma estrutura da Dorsal da Terceira e, como se pode ver das Fig. 30 e Fig. 31, a direcção dominante das suas principais falhas (Fontinhas e Santiago, que definem respectivamente os limites ocidental e oriental do graben) é NNW-SSE, paralela à direcção desta estrutura vulcano-tectónica. O graben das Lajes apresenta uma grande densidade de fracturação admitindo-se que, do ponto de vista hidrogeológico, algumas destas falhas possam servir como zonas de circulação preferencial de água para a profundidade, ao passo que outras se comportarão como barreira (ex.: como é o caso da falha de Santiago cf. secção 8.2).

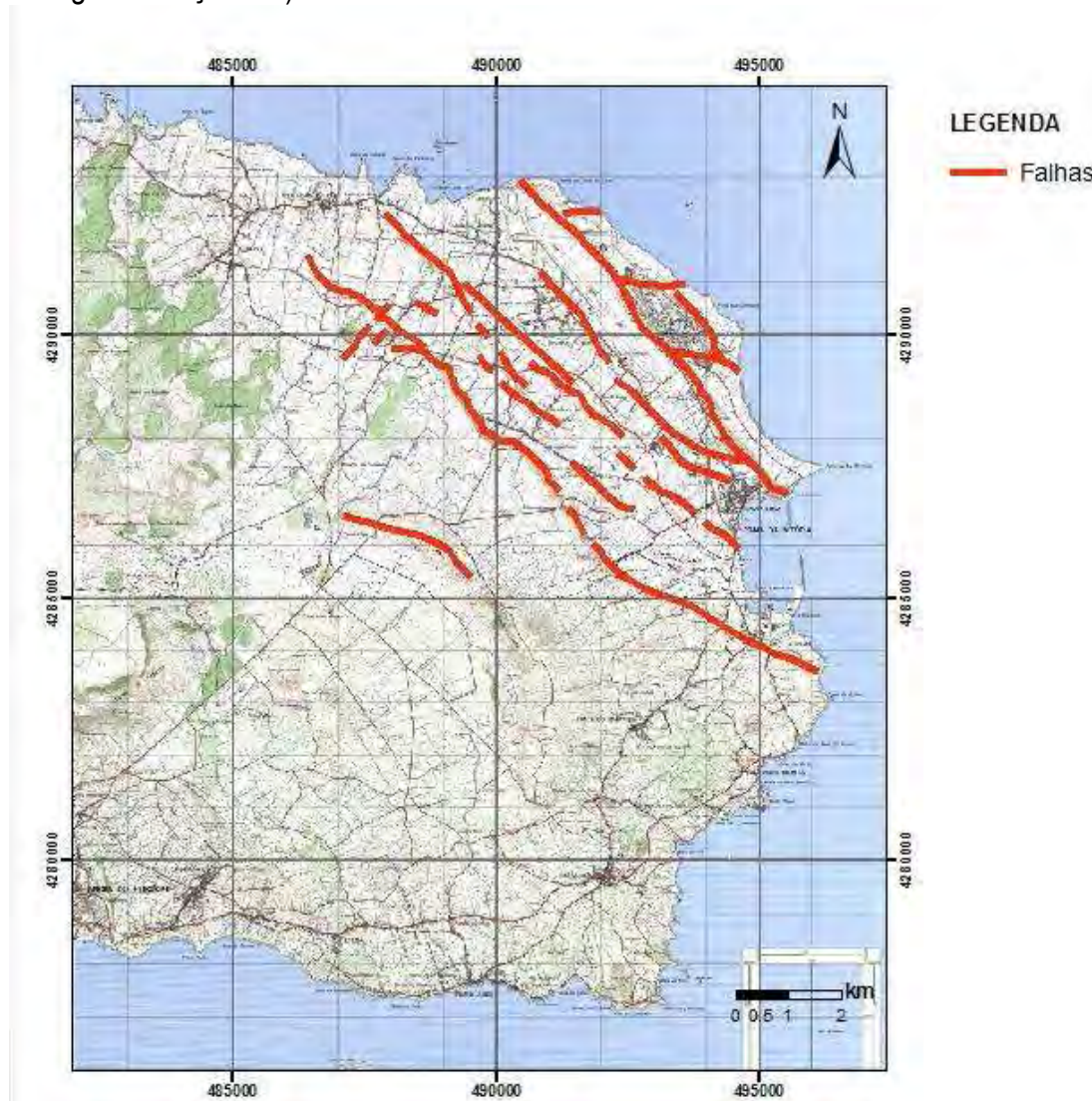


Fig. 31 – Mapa de falhas do graben das Lajes (adaptado de Lloyd e Collis, 1981)

Alguns aspectos do graben das Lajes são ilustrados nas Fig. 32, Fig. 33 e Fig. 34.



Fig. 32 – Depressão do graben e falha de Santiago na bordadura de Praia da Vitória



Fig. 33 – Graben e falha das Fontinhas na bordadura norte do graben

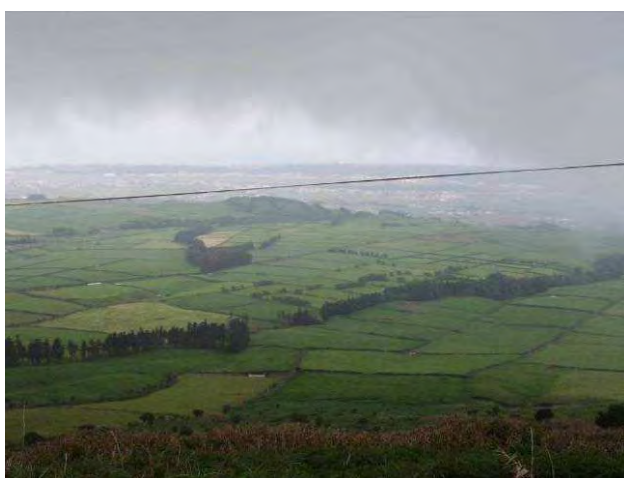


Fig. 34 – Em afastamento progressivo: plataforma das Fontinhas, falha das Fontinhas, depressão do graben das Lajes, falha de Santiago e Serra de Santiago



Fig. 35 – Escarpa de falha de Santiago (zona de Praia da Vitória)



Fig. 36 – Expressão geomorfológica da falha de Santiago



Fig. 37 – Escarpa da falha das Fontinhas e, em fundo, Serra do Cume

A falha de Santiago (cf. Fig. 35 e Fig. 36), aproximadamente linear, é assinalada por uma escarpa sub-vertical, de orientação N141, com uma elevação de mais de 100 m nalgumas

zonas. Esta falha expõe em afloramento espessas escoadas de lava, depósitos piroclásticos (lapilli), tefritos alterados e cascalheiras.

A falha das Fontinhas (cf. Fig. 37), de perfil sinuoso, estende-se do Cabo da Praia ao Pico da Rocha, com uma orientação entre os N115° e N148°. Na sua escarpa afloram escoadas lávicas, depósitos piroclásticos e importantes acumulações de tefritos alterados.

No interior do graben das Lajes encontra-se um complexo sistema de falhas (cf. Fig. 31), que definem numerosos compartimentos, os quais controlam o funcionamento hidrogeológico da região. De entre estas falhas destacam-se, pela sua importância, as falhas de São Lázaro, Boavista e do Barreiro. A falha de São Lázaro apresenta uma escarpa de cerca de 30 m de altura, entre Paúl da Praia da Vitória e Santa Luzia, com uma orientação N120° a N130°; no troço sul desta escarpa surgem afloramentos de escoadas de lava e de lapilli. Na zona SW da base aérea foram identificadas por Worts (1950) três zonas de falha com direcções aproximadas NNW-SSE, definindo uma topografia em degraus ao longo deste quadrante. No topo norte do graben das Lajes encontra-se a Caldeira das Lajes, que é uma zona deprimida, de fundo aplanado e circundada por arribas com 10 a 15 m de altura.

7. Hidrografia

7.1 Hidrografia superficial

Na ilha Terceira as linhas de água, de estrutura predominantemente linear, tendem a dispor-se de forma radial em relação aos relevos dominantes, que coincidem com os aparelhos vulcânicos principais (ou os seus relevos residuais, como seja a Serra do Cume). Além das áreas com drenagem mais ou menos organizada – seja de natureza exorreica ou endorreica – ocorrem também zonas sem qualquer escoamento superficial. Esta variedade de comportamentos está relacionada com o relevo e os tipos de litologias aflorantes. Litologias muito permeáveis e definindo superfícies planares tendem a originar áreas sem qualquer drenagem superficial; podem contudo receber a drenagem de zonas vizinhas, a qual deixa de existir ao atingir tais áreas. Por seu lado relevos muito abruptos (ex.: escarpas de falha), em especial se associados a litologias de média a reduzida permeabilidade, têm redes de drenagem significativas, cuja densidade é em muito controlada pela permeabilidade dos materiais atravessados.

A permeabilidade dos terrenos atravessados pelas ribeiras controla também as perdas de caudal enquanto os acidentes estruturais tendem a controlar significativamente as zonas de descarga de fundo (nascentes nos leitos de ribeira); contudo acidentes estruturais de grande permeabilidade podem ser importantes pontos de perda de caudal das ribeiras.

As ribeiras têm um regime temporário, de enxurrada, com os caudais dependentes das características climáticas da bacia hidrográfica e da intensidade dos diferentes eventos de precipitação. Nas zonas de encosta as ribeiras servem com frequência de zonas de descarga dos aquíferos suspensos que intersectam (ex.: sector de Agualva).

O graben das Lajes é uma zona de drenagem muito reduzida a virtualmente nula ao longo de praticamente toda a sua extensão, o que expressa a intensa permeabilidade dos materiais que o constituem. Rodrigues (2002) assinala a existência de cinco bacias hidrográficas relativas a pequenas ribeiras torrenciais – Belo Jardim e Santo Antão no extremo SW, Marques na zona

central, Pães e Areia na zona N – que são caracterizadas por um sistema de escoamento superficial basicamente não estruturado ao longo da maior parte da sua área. As ribeiras de Belo Jardim e de Santo Antão alcançam o litoral no extremo SW do graben e as ribeiras dos Pães e da Areia desagüam no litoral N do graben. Na zona central, a ribeira do Marques desaparece completamente nos terrenos da área entre Canada das Fontinhas e o Terminal do Aeroporto das Lajes, o mesmo sucedendo à pequena ribeira que descendo ao longo da Ladeira da Pena desaparece completamente nos terrenos entre N de Canada dos Doidos e a estrada VRR1.

A Serra de Santiago quase não apresenta rede de drenagem, com a excepção de quatro pequenas linhas de água lineares no sector de Santa Rita e diversas pequenas escorrências não estruturadas ao longo da escarpa de falha da Serra de Santiago, que apenas funcionam na época húmida. As escarpas tanto da arriba litoral como da falha de Santiago podem ser eventuais locais de escorrência durante os episódios de precipitação mas não apresentam uma rede de drenagem organizada.

A Serra do Cume apresenta uma densa rede de drenagem na sua bordadura oriental, que desce em direcção ao graben das Lajes, onde desaparece quase completamente após ultrapassar a escarpa das Fontinhas; as duas únicas ribeiras que se prolongam para o interior do graben (embora acabem também por desaparecer) são a ribeira do Marques e a ribeira que passa entre as Fontinhas e a Canada dos Doidos.

Não são conhecidos valores do **escoamento superficial** no graben das Lajes. Fontes (1999) mediu o escoamento superficial anual nas bacias hidrográficas nos Cinco Picos, obtendo coeficientes de escoamento de 0,01 a 0,17⁴, para áreas de pastos e durante as lavras agrícolas. Considerando a reduzida rede de drenagem e a topografia favorável a uma elevada infiltração, como em Cinco Picos, é admissível que o coeficiente de escoamento seja da ordem dos 0,2. Na zona de escarpa das Fontinhas e em certos troços da escarpa de Santiago, são admissíveis valores mais elevados.

7.2 Hidrografia subterrânea

A hidrografia subterrânea está associada a estruturas de grandes fissuras e cavidades (grutas e algares) desenvolvidas nas escoadas basálticas mais fluidas, e que podem atingir consideráveis dimensões e extensão. Nestas fissuras as águas são canalizadas e fluem como se se tratassem de rios subterrâneos. Este tipo de estruturas está normalmente associado a escoadas recentes com tubos de lava, dado que nas escoadas basálticas mais antigas onde este tipo de estruturas possam ter ocorrido, o depósito de materiais posteriores favorece o seu colapso.

8. Hidrogeologia

8.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma caracterização hidrogeológica conceptual da área de estudo, em termos da estrutura vertical de aquíferos, caracterização essa que serviu de base

⁴ Assim, se o valor médio de precipitação for de 1 000 mm, o escoamento superficial variará entre 10 a 170 mm.

ao desenvolvimento do modelo numérico de escoamento (cf. Capítulo 10) e à compreensão do processo de potencial migração de poluentes na área de estudo.

Apresenta-se uma síntese da informação existente bem como da que foi obtida através das novas infra-estruturas instaladas na área (Anexos 2 e 5), incluindo as características gerais dos pontos de água utilizados, as suas propriedades hidrogeológicas e hidráulicas e, por fim, uma análise do efeito de maré na piezometria.

8.2 Hidrogeologia do Graben das Lajes

8.2.1 Modelo conceptual global

Como referido na caracterização geológica apresentada, a região em estudo é constituída por uma sucessão de escoadas lávicas e piroclásticas, por vezes separadas por níveis de alteração e paleossolos em geral de reduzida e variável espessura; estes paleossolos assinalam os períodos de quiescência vulcânica, quando a ausência de eventos vulcânicos, permitiu a transformação dos materiais vulcânicos então mais superficiais em solos.

Do ponto de vista hidrogeológico as formações presentes na área de estudo são muito heterogéneas e anisotrópicas, constituídas por materiais muito permeáveis associados a escoadas lávicas e/ou a escoadas piroclásticas pouco alteradas, não compactadas e de textura média a grosseira; intercaladas entre estas formações ocorrem níveis de permeabilidade mais reduzida, em geral correspondendo a paleossolos e escoadas piroclásticas muito alteradas ou níveis de lavas muito pouco porosas e por vezes muito pouco fracturadas.

Na generalidade dos casos, os fluxos de lava apresentam intensa fracturação primária e secundária, zonas de brecha muito desenvolvidas e um grande número de cavidades (Rodrigues, 1993). São estas estruturas, em especial se associadas a um baixo grau de alteração, que conferem às escoadas lávicas a sua grande permeabilidade. Os paleossolos e escoadas piroclásticas alteradas, intercalados entre as demais formações, são materiais tipicamente de baixa permeabilidade, funcionando como barreiras impermeáveis a semi-permeáveis à circulação vertical das águas. Duas formações merecem particular destaque no funcionamento hidrogeológico da região em estudo, da base para o topo:

- ◇ **Formação Traquibasáltica dos Cinco Picos** – todos os furos construídos e que captam no aquífero basal interceptam esta formação. É a formação mais antiga da ilha Terceira mas apresenta um grau de alteração relativamente reduzido e uma fracturação intensa, em especial na proximidade de falhas, o que torna estas zonas especialmente permeáveis; possui ainda alta percentagem de poros e pequenas cavidades, o que origina uma elevada permeabilidade das formações (Schaller *et al.*, 2005). Porém, individualmente, as lavas são muito heterogéneas quanto ao comportamento hidrogeológico; os níveis de escórias do topo e da base são geralmente muito permeáveis mas a parte central das escoadas (constituída por rocha compacta com relativamente poucas fracturas) tem permeabilidades relativamente baixas. Os depósitos piroclásticos (tefritos) intercalados nas lavas são em geral muito permeáveis e os materiais alterados (paleossolos e níveis de

alteração em lavas e escoadas piroclásticas) têm normalmente permeabilidade baixa, podendo estar na origem de pequenos aquíferos suspensos (Schaller *et al.*, 2005).

- ◇ **Formação Ignimbrítica das Lajes** – aflorante, e portanto constituindo uma das formações hidrogeológicas superficiais, são fluxos piroclásticos muito permeáveis, com numerosas fracturas nas zonas basais, embora as regiões centrais da escoada se apresentem compactas (Schaller *et al.*, 2005); na área de estudo são representados por materiais arenosos a areno-argilosos, a que se associam níveis de argilas (cf. Anexo 1 e descrição sumária das sondagens FP3 e FP6). A sua significativa fracturação vertical é também responsável pela elevada permeabilidade, a qual é expressa pela ausência de uma rede de drenagem estruturada nas suas zonas de afloramento.

As estruturas tectónicas desempenham também um importante papel no funcionamento hidrogeológico da região em estudo. As zonas de falha podem funcionar como: (1) estruturas de infiltração preferencial e recarga para os aquíferos profundos e áreas de circulação preferencial dentro dos aquíferos, caso a sua permeabilidade seja elevada, ou (2) como barreiras à circulação, se estiverem preenchidas com materiais de alteração e/ou filões. Entre as falhas com comportamento de barreira à circulação está a **falha de Santiago** (cf. secção 6.4), pelo menos nos sectores mais superficiais, cuja caixa de falha é preenchida por materiais argilosos. O seu comportamento imperme é indiciado pela formação de pequenos charcos na zona do Juncal (Rodrigues, 2002), atestando a retenção das águas nos níveis mais superficiais, assim como pelos resultados da prospecção geofísica realizada durante este estudo (Mota e Novo, 2010). Admite-se que esta mesma falha seja responsável pela ocorrência da nascente do Paúl na Praia da Vitória. A **falha das Fontinhas** tem também, de acordo com Rodrigues (2002), comportamento de barreira à circulação, o que é indiciado pelo desenvolvimento das formações hidrogeológicas das Fontinhas, delimitado por esta falha ao longo da direcção NW-SE; o seu comportamento imperme foi igualmente sublinhado pelos resultados da prospecção geofísica (Mota e Novo, 2010) e pelas medições das oscilações de maré (cf. secção 8.4.4). As **falhas na zona central do graben** e muito possivelmente o **sistema que se estende desde São Lázaro às Lajes** parecem funcionar basicamente como zonas de infiltração preferencial, mas os dados são escassos para efectivamente definir em que falhas e/ou troços de falhas tal comportamento se verifica. Por vezes as cotas dos níveis piezométricos podem indiciar que as falhas se comportam como zonas preferenciais de infiltração (ex.: região de Santa Luzia) embora, devido à escassez de dados, estes indícios não possam ser tomados como conclusivos. A prospecção geofísica realizada neste estudo sugere igualmente que algumas destas falhas são de facto estruturas condutoras de água. Tal comportamento parece ser confirmado pelas sondagens FP1 e FB1, realizadas numa região de falha junto a antigos depósitos de combustível (cf. Fig. 2 e Fig. 31), pois intersectaram material muito fracturado ao longo de praticamente toda a extensão de perfuração, sem intersectar quaisquer aquíferos suspensos.

Admite-se que o funcionamento hidrogeológico dos filões é basicamente de barreira ao fluxo horizontal e a sua presença tenderá, deste modo, a criar compartimentações nos aquíferos; estas zonas de compartimentação poderão apresentar funcionamentos hidráulicos mais ou menos independentes. Mas, novamente, existem poucos dados efectivos sobre a distribuição espacial dos filões que intersectem os sistemas aquíferos e sobre o seu funcionamento hidráulico efectivo na área de estudo.

O conjunto de formações geológicas na área de estudo dá origem a um conjunto de aquíferos agrupáveis em três sistemas:

- ◇ formações hidrogeológicas superficiais;
- ◇ formações hidrogeológicas intermédias e
- ◇ sistema aquífero de base.

As duas primeiras correspondem, naturalmente, a formações hidrogeológicas suspensas. Estas formações resultam da ocorrência de níveis sub-horizontais de baixa permeabilidade, intercalados nas formações vulcânicas, que funcionam basicamente como aquíferos⁵, tendo extensão suficiente para permitir a retenção de águas num corpo hidrogeológico. Origina-se deste modo um conjunto de várias unidades hidrogeológicas descontínuas, a diferentes profundidades (Fig. 38 e Fig. 39), que ocupam áreas onde a precipitação que se infiltra desde a superfície é impedida de atingir directamente o nível de base (Schaller *et al.*, 2005). Na região do graben das Lajes, Rodrigues (2002) definiu dois sistemas aquíferos suspensos – o Superior e o Inferior – onde individualizou os aquíferos de Lajes I, Fontinhas, Lajes II, Santiago (este último responsável pelas nascentes de Zimbral, Facho e Amoreira, sendo referenciado em Schaller *et al.*, 2005, como Amoreira).

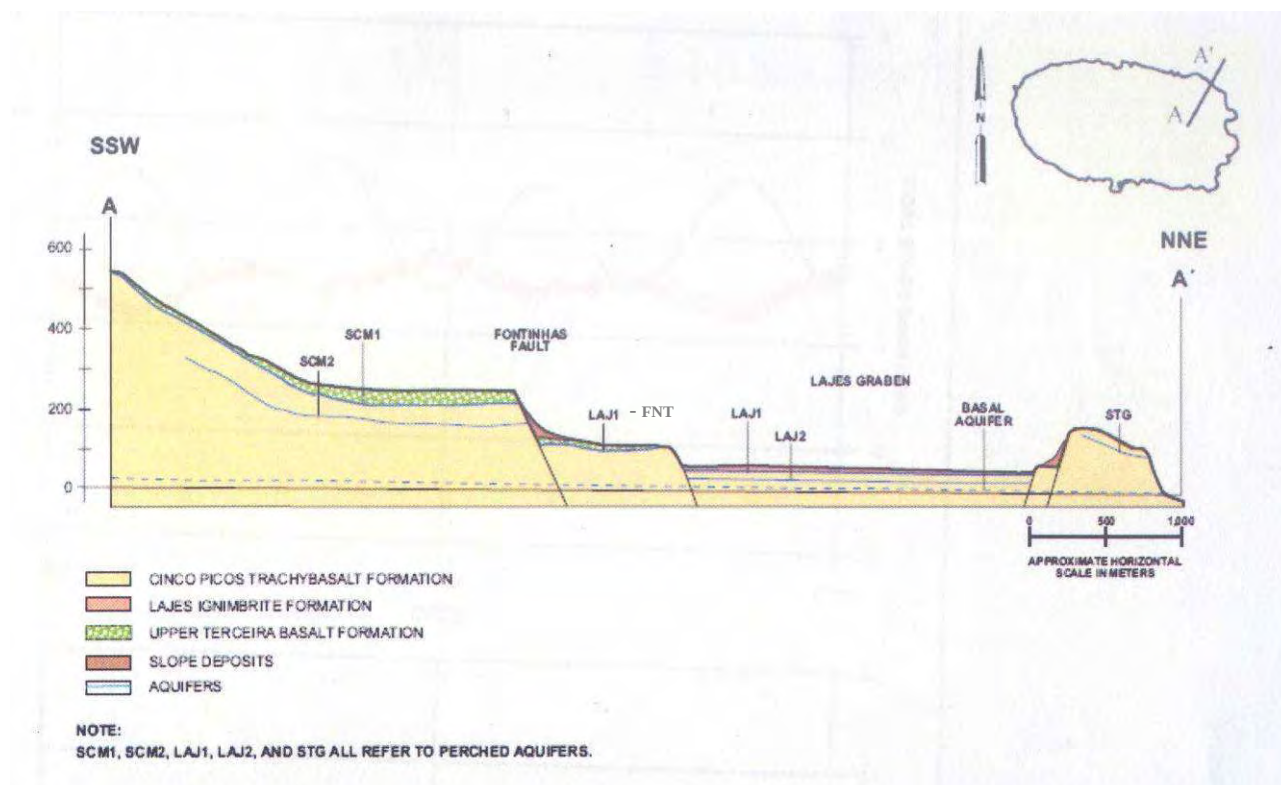


Fig. 38 – Formações hidrogeológicas na região do graben das Lajes e zonas envolventes

Fonte: Schaller *et al.* (2005)

⁵ A infiltração em profundidade ao longo destes níveis de baixa permeabilidade assume-se que seja feita por drenância e ao longo da rede de fracturas e falhas que os intersectam.

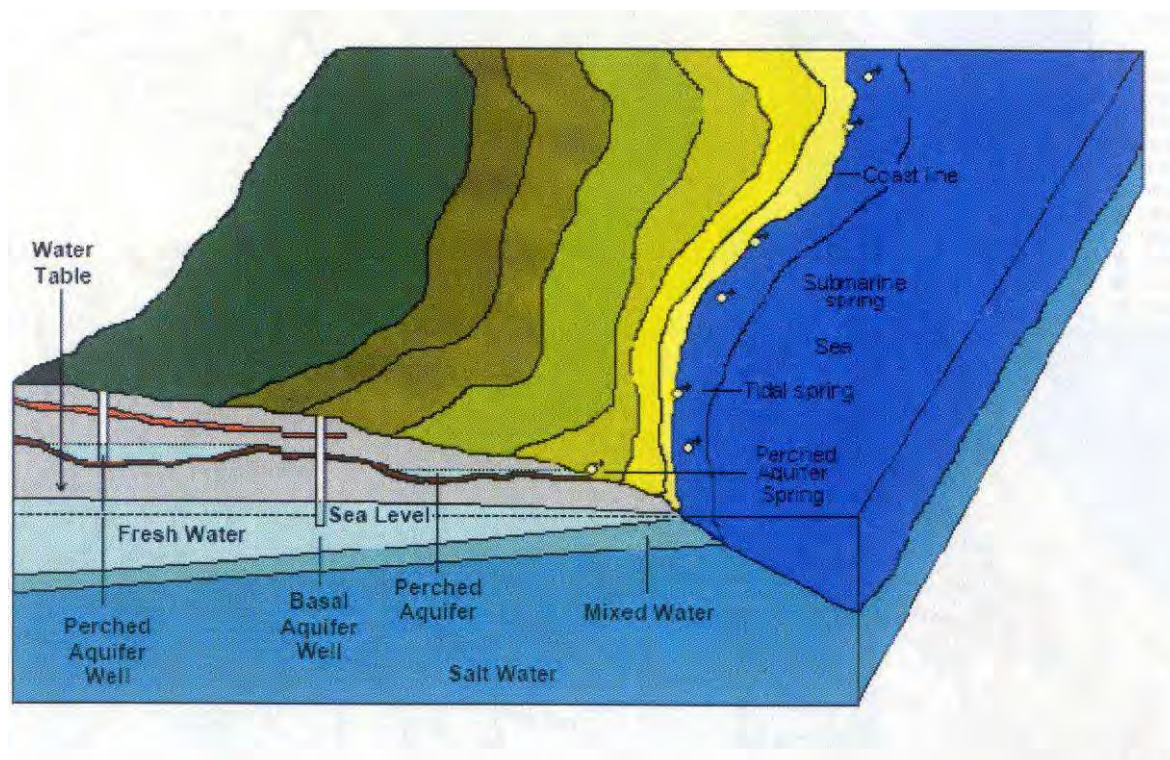


Fig. 39 – Esboço do posicionamento das formações hidrogeológicas suspensas e do aquífero basal face ao nível do mar

Fonte: Schaller *et al.* (2005)

8.2.2 Formações hidrogeológicas superficiais

Estas formações hidrogeológicas desenvolvem-se nos Ignimbritos das Lajes, basaltos superiores e depósitos piroclásticos de queda pomíticos (Rodrigues, 2008), sendo que localmente – aquífero de Fontinhas e zona contígua à falha de Santiago – se desenvolve também em depósitos de vertente; os impermeáveis que delimitam os aquíferos são paleossolos (Rodrigues, 2002). Nas sondagens efectuadas durante este estudo, no sector a S da Base das Lajes até à região dos furos camarários do Juncal (sondagens FP6, FP6A, FP6B, FB6, FP3, FP3A e FB3; cf. Anexos 1 e 5), as litologias que constituirão a base deste sistema correspondem a níveis argilosos a argilo-arenosos muito superficiais. O comportamento destes paleossolos/níveis argilosos deverá alterar-se na proximidade de zonas de falha cujas caixas de falha não estejam preenchidas por materiais argilosos, permitindo a infiltração vertical ao longo das zonas de fractura, adquirindo nestas regiões um comportamento do tipo aquífero (Novo *et al.*, 2001).

As formações deste sistema são muito superficiais, com profundidades ao nível de água entre os 2 a 10 m (localmente podem ser um pouco superiores, podendo chegar aos 20 m no troço de SE de Fontinhas, cf. Fig. 39). De acordo com as medições durante as campanhas de monitorização e os registos semanais de execução das sondagens, para a região da zona envolvente sul da Base das Lajes até ao sector dos furos do Juncal, os níveis piezométricos parecem ser mais superficiais, ocorrendo em regra entre menos de 1 m e cerca de 3 m de profundidade durante o período de realização do estudo (cf. Fig. 40). Estas formações têm uma

espessura saturada reduzida, produtividades e condutividades hidráulicas reduzidas e coeficientes de armazenamento baixos (Rodrigues, 2002), embora os valores destes parâmetros sejam mal conhecidos. Os valores observados de piezometria neste sistema são apresentados no Quadro 7 e na Fig. 40. Na zona do Paúl-Praia a piezometria do superficial está apenas levemente acima da do aquífero de base, indiciando que nesta região (sita na bordadura litoral) as formações hidrogeológicas suspensas desaparecem e dão passagem directa ao aquífero de base. Os trabalhos de campo do presente estudo sugerem que, na zona envolvente SE da *South Tank Farm*, esta passagem ter-se-á dado, pois verificou-se que nas sondagens FP5 e FB5 os níveis piezométricos hidrostáticos foram da ordem dos 0,95 m, correspondendo ao espectável para o aquífero de base, não tendo sido detectados quaisquer outros níveis de água sobrejacentes.

As condições piezométricas e as direcções de fluxo horizontal são muito heterogéneas ao longo destas formações como resultado da sua descontinuidade física (cf. Fig. 40). Efectivamente, o fluxo principal no graben é no sentido vertical em direcção ao aquífero basal, havendo indícios de que a água nas formações suspensas se move lateralmente por curtas distâncias antes de se infiltrar em profundidade.

As variações sazonais da piezometria ao longo da maior parte das formações hidrogeológicas suspensas têm uma diferença e cerca de 2 m entre o final da época húmida e o final da época seca, em anos de pluviosidade normal, conforme foi registado nos poços CR18/Santa Luzia, CR37/Senhora dos Remédios, CR23/S de Caldeira das Lajes. Nalguns locais esta variação piezométrica é mais elevada⁶. Estes resultados indiciam portanto que o aquífero responde de forma significativa às variações da recarga – especialmente se se atender à espessura média pressuposta para estes aquíferos – e esta resposta não é homogénea ao longo da região, havendo áreas (ex.: Fontinhas) que apresentam uma resposta muito intensa, a qual poderá indiciar grande susceptibilidade aos períodos de seca, eventual dimensão reduzida das formações e/ou grande perda de água para os níveis subjacentes. A monitorização realizada durante o presente estudo revelou que, para a envolvente a S da Base das Lajes até aos furos do Juncal, os níveis de água mantiveram-se bastante estáveis, e muito superficiais, entre Fevereiro e Dezembro de 2010 (cf. Quadro 6 e Quadro 7).

De acordo com Rodrigues (2002) estas formações podem ser divididas nos seguintes sistemas: Lajes I, São Brás e Fontinhas. Refere-se brevemente algumas das principais características do Lajes I localizado na área de estudo.

É um sistema livre e poroso, situado na zona central, mais deprimida, do graben; desenvolve-se nos depósitos ignimbríticos das Lajes e a sua base é um paleossolo que embora pouco espesso parece ter grande continuidade lateral e se comporta basicamente como um imperme. No troço NE do graben é de admitir que este paleossolo incline ligeiramente para nordeste condicionando nesta zona do graben o fluxo de água para NE (Rodrigues, 2002). É de admitir que este imperme, nas zonas afectadas por falhas, possa permitir infiltração em profundidade.

Este sistema é afectado por diversas falhas, sendo delimitado pelas de Santiago e das Fontinhas (que definem os seus limites oriental e ocidental, respectivamente). Ao invés das falhas acima referidas, sitas na zona central do graben, as falhas de Santiago e das Fontinhas têm funcionamento de barreira impermeável. Tal é indiciado, segundo Rodrigues (2002), pelo facto de permitirem o desenvolvimento de aquíferos sobre as suas caixas de falha. O carácter

⁶ Ex.: Juncal, superior a 2 m; Fontinhas/Ladeira da Pena (CR44), cerca de 4 m (Schaller *et al.*, 2005).

imperme destas estruturas foi igualmente revelado pela prospecção geofísica realizada durante este estudo.

A Caldeira das Lajes é o principal ponto de descarga natural do aquífero, que descarrega também por diversas nascentes difusas ao longo da ribeira do Marques e na zona baixa de Vila Nova (Rodrigues, 2002 e Schaller *et al.*, 2005). Os níveis piezométricos ocorrem a altitudes médias de 42 m, com valores máximos e mínimos de respectivamente 56,6 e 36,7 m de altitude (Schaller *et al.*, 2005), o que corresponde a profundidades médias de 10 m, eventualmente um pouco superiores. No Juncal-Paúl o aquífero emerge à superfície nas épocas mais pluviosas, gerando pequenos charcos, mas nos períodos menos pluviosos estes níveis situam-se entre os 7 a 8 m de profundidade.

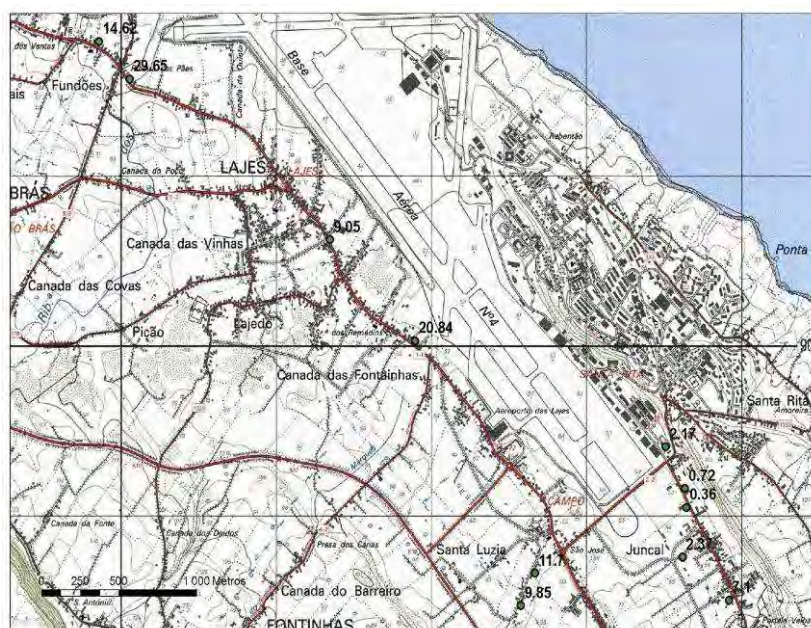


Fig. 40– Profundidade ao nível piezométrico, determinada nas campanhas de monitorização nas formações (1) superficial e (2) intermédia, na envolvente da Base das Lajes

8.2.3 Formações hidrogeológicas intermédias

Estas formações, que têm produtividades muito variáveis mas em geral baixas, desenvolvem-se na interface entre lavas dos Traquibasaltos dos Cinco Picos e depósitos piroclásticos associados muito alterados; estes últimos, muitas vezes com almagrização, constituem os níveis impermees e as unidades produtivas são escoadas traquibasálticas, por via de regra espessas (Rodrigues, 2002). As formações deste sistema, ao longo do maciço dos Cinco Picos, situam-se a profundidades entre 10 m e 200 m (Rodrigues, 2002), embora na zona do graben as profundidades se situem na generalidade dos casos entre os 28 m e os 36 m (Fig. 38). Os níveis piezométricos obtidos durante as campanhas de monitorização realizadas no presente estudo apresentam-se nos Quadro 6 e Quadro 7.

Segundo Rodrigues (2002) este sistema hidrogeológico engloba as formações das Lajes II e da Serra de Santiago. Apresenta-se uma breve síntese da primeira, integrada na área de estudo.

É um sistema de baixa produtividade, aflora na arriba costeira a oeste de Ponta da Forcada (Menezes 1993), é apenas conhecido na zona mais deprimida do graben, embora Rodrigues (2002) refira que deva ter grande desenvolvimento lateral, estendendo-se desde o Juncal até aos limites da Caldeira das Lajes. É assinalado por um nível piezométrico situado a uma altitude média de 21,5 m (profundidades médias de 30 m) e desenvolve-se nos Traquibasaltos dos Cinco Picos, na zona de brecha basal duma escoada traquibasáltica (Rodrigues, 2002).

Schaller *et al.* (2005) referem que no sector NW do graben⁷ esta escoada está sobrejacente a um nível de cinzas vulcânicas alteradas. Não há na literatura qualquer indicação quanto à espessura do nível impermeável deste aquífero específico. Durante as campanhas de sondagem realizadas no presente estudo, foram identificados na região envolvente sul da Base das Lajes, níveis aquíferos a profundidades até aos 19 m de profundidade, sugerindo que neste sector os aquíferos deste sistema poderão ser um pouco mais superficiais. De referir que na sondagem FP3 a partir dos 19 m de profundidade e até ao aquífero de base não foram detectados quaisquer níveis aquíferos.

Segundo Menezes (1993) o aquífero tem como descargas naturais as pequenas nascentes de Cabo e Rocha, sitas a W da arriba costeira de Ponta da Forcada (Vila Nova). Tal parece ser confirmado pelo furo T-112, que captará o sector mais ocidental deste aquífero aos 26,7 m de altitude, no limite SW da depressão de Vila Nova. Além do furo referido, Rodrigues (2002) refere que é captado por 3 poços (estes poços serão CR 22, CR 28, CR 41, segundo informação recolhida em Schaller *et al.*, 2005) e interceptado talvez pelos furos da base aérea das Lajes instalados na zona da Cana da Fontinhas. De sublinhar que não se conhece informação que permita verificar se tais furos, além de captarem o aquífero basal, captam também o aquífero suspenso.

8.2.4 Sistema aquífero de base

Este sistema aquífero desenvolve-se essencialmente, na zona do graben das Lajes, na formação dos Traquibasaltos dos Cinco Picos, situando-se as zonas de captação de águas em lavas vulcânicas muito fracturadas muito permeáveis. É ***um aquífero livre na parte da sua extensão que foi monitorizada pelos furos construídos no âmbito deste Estudo***. Na zona costeira alimenta um conjunto de nascentes litorais (e exurgências submarinas), sendo nesta zona tradicionalmente explorado por poços de maré. É aquífero fracturado, de produtividades médias a elevadas, com alguma variabilidade espacial dependente das características hidrogeológicas das estruturas geológicas e litologias interceptadas pelos furos de captação (Novo *et al.*, 2001). A alta permeabilidade das rochas neste aquífero é favorável à entrada de água do mar, criando as condições para a existência de um corpo contínuo de água salgada na sua base, a cotas inferiores ao nível do mar, sobre o qual se desenvolve um corpo de água doce.

De acordo com o modelo de Ghyben-Herzberg, este corpo de água doce terá uma geometria lenticular, sobrenadante à água salgada, cujos níveis piezométricos monitorizados neste Estudo se situam até uma cota máxima de 1 a 2 m.

⁷ Schaller *et al.* (2005) indicam que o aquífero Lajes II é conhecido somente neste sector do graben.

Rodrigues (2002) refere que este sistema aquífero apresenta níveis piezométricos descontínuos e embora na maioria das captações o nível piezométrico se situe entre os 1 a -1 m de cota, confirmado pelos dados de campo, existem casos como o furo de Pico Celeiro em que o nível piezométrico está aos $11,9 \pm 2,5$ m ou o do furo T-928 que se situa a cotas de $-4,9 \pm 2,5$ m (cf. Fig. 41). Estas variações significativas na cota do nível piezométrico, em particular se analisadas em função da sua distância à linha de costa (cf. Fig. 41), podem indiciar uma significativa compartimentação do aquífero de base, em especial dada a aleatoriedade da distribuição espacial dos níveis piezométricos (Rodrigues, 2002). Esta compartimentação no sentido vertical resultaria, de acordo com este autor, da presença de filões e falhas cujas caixas de falha estejam preenchidas por materiais impermeáveis.

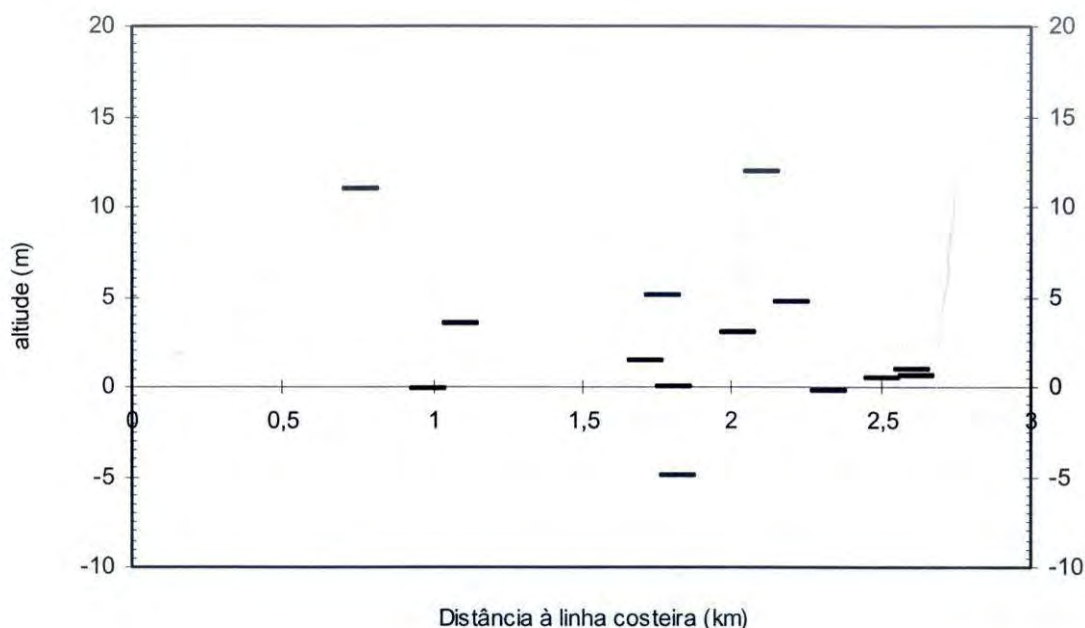


Fig. 41 – Cotas de níveis piezométricos no aquífero de base

Fonte: Rodrigues (2002)

Apesar da compartimentação ao longo do aquífero de base admitida por Rodrigues (2002), os resultados obtidos durante as campanhas de sondagem e monitorização realizadas no âmbito deste estudo para região do graben das Lajes na área entre SW do Bairro Joaquim Alves – Porta de Armas da Base das Lajes – SE *South Tank Farm* mostram um conjunto de níveis piezométricos hidrostáticos com uma significativa continuidade, variando em torno de um intervalo médio de 0,46 e 1,17 m de cota. Uma análise mais aprofundada da piezometria deste sistema aquífero, baseada na informação recolhida nas campanhas de monitorização realizadas durante este estudo, é apresentada nos Quadro 6 e Quadro 7.

Sendo um aquífero em contacto com o mar, e no caso com características hidráulicas que potenciam tais efeitos, os seus níveis piezométricos sofrem efeitos de maré. A análise destes efeitos, baseada nos dados de monitorização recolhidos durante este estudo é apresentada na secção 8.4.4.

Além das variações do nível piezométrico por efeito de maré, ocorrem também oscilações sazonais devido à variação sazonal da recarga, expressas pela deslocação de algumas

nascentes litorais para cotas mais elevadas no período de invernía – em particular se situadas nas formações sedimentares – e pela variação dos níveis de água em poços litorais e furos que captam no aquífero basal. Um destes casos é o poço de maré de Paúl cujas variações sazonais dos níveis não só ilustram o efeito do incremento da recarga como a consequente expansão do aquífero basal durante o período húmido, evidenciando uma maior circulação nesta época (Rodrigues, 2002). Segundo o mesmo autor, no Verão, os maiores fluxos de recarga ocorrem nas zonas deprimidas do maciço dos Cinco Picos, onde as formações são muito permeáveis, a topografia é pouco acentuada e não existem cursos de água.

Uma análise de pormenor das propriedades hidráulicas deste sistema aquífero para a região do graben das Lajes que foi alvo do presente estudo (compreendida entre SW do Bairro Joaquim Alves – Porta de Armas da Base das Lajes – SE *South Tank Farm*) é apresentada nas secções 8.4.1 e 8.4.4.

Rodrigues (2002) obteve valores de gradientes hidráulicos para o aquífero de base entre 0,05 m/km (para a permeabilidade média de 1500 m/d) e 0,2 m/km (para a permeabilidade de 500 m/d).

No âmbito do presente estudo elaborou-se um modelo matemático (cf. Capítulo 10) para a área do graben das Lajes, que tenta incorporar esta complexidade, nomeadamente o carácter imperme da Falha de Santiago, e outros aspectos hidráulicos das estruturas geológicas presentes na área. Embora este aspecto seja desenvolvido Capítulo 10, refere-se apenas que, de acordo com o modelo matemático agora desenvolvido para a área estudada, existirá um escoamento para SE, em direcção ao litoral, no sector S do graben, e um escoamento para NW no sector N do graben, havendo uma linha divisória do fluxo, sita um pouco a jusante do campo de furos de abastecimento à base das Lajes.

8.3 Pontos de Água

Para a concretização dos objectivos do presente Estudo foi necessário efectuar uma ampla e abrangente caracterização da qualidade e da quantidade das águas subterrâneas presentes na área em análise. Para esse efeito foi inicialmente efectuado um levantamento das diversas infra-estruturas presentes na região e foi equacionado um plano de trabalhos e especificações tendo em vista complementar infra-estruturas existentes através da instalação de furos de ensaio, de piezómetros, de sondagens de amostragem na região (Leitão *et al.*, 2009), tendo sido efectuados alguns reajustes das áreas alvo (cf. Capítulo 2) em função dos resultados da prospecção geofísica entretanto obtidos (Mota e Novo, 2010) face aos objectivos deste Estudo.

O trabalho foi desenvolvido com base num extenso programa de perfuração, realizado entre Maio e Dezembro de 2010 (Oliveira, 2010 e Aqualis, 2010), a que se juntaram um conjunto de infra-estruturas pré-existent no concelho de Praia da Vitória, num total de 54 pontos de água apresentados na Fig. 42, cujas características são sumariamente descritas no Quadro 1. A descrição pormenorizada dos trabalhos efectuados, bem como a descrição das formações litológicas atravessadas e demais informação geológica e hidrogeológica são apresentadas em Oliveira (2010), Aqualis (2010) e Novo (2010), que constituem anexos do presente relatório.

Os pontos de água interessados são:

- cinco captações para abastecimento público da Câmara Municipal da Praia da Vitória (CMPV) e o furo do Juncal 2;
- 21 poços de largo diâmetro;
- seis furos no aquífero basal (instalados pela firma Aqualis no decurso deste Estudo);
- dez piezómetros (instalados pela firma Aqualis no decurso deste Estudo), sete dos quais no aquífero basal e os restantes em formações hidrogeológicas suspensas localizados durante as perfurações;
- cinco piezómetros (instalados pela firma Mota-Engil no decurso deste Estudo) em formações hidrogeológicas suspensas encontradas durante os trabalhos de recolha de solos para amostragem;
- dez piezómetros de monitorização, cinco localizados nas áreas contaminadas de *South Tank Farm* e os restantes junto à Porta de Armas.

Foram, ainda, analisados o *North Sewage Lajes* e a fonte da Caldeira das Lajes.

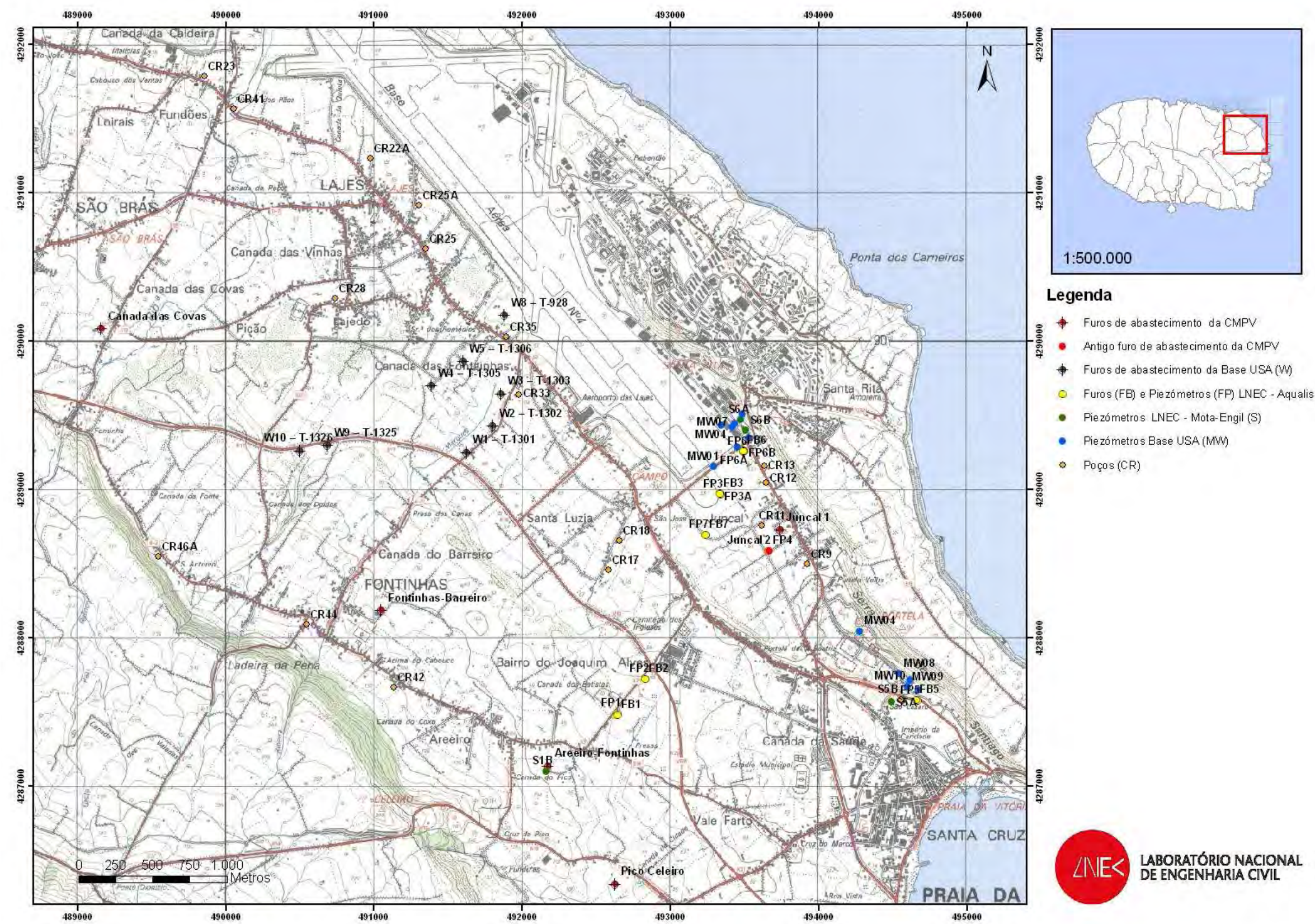


Fig. 42 – Localização dos pontos de amostragem de águas subterrâneas

Quadro 1 – Características dos pontos de água utilizados no Estudo

	DESIGNAÇÃO	Local	Coordenadas E	Coordenadas N	Profundidade do furo (m)	Cota do solo (m)	Cota do ponto de medição (m)	Tubos ralos	
								Profundidade (m)	Cota (m)
Poços	CR6	Praia da Vitória	494762	4287163	3,60	2,64	3,152		
	CR9	Juncal S	493922	4288493	11,42	56,21	56,965		
	CR11	Juncal N	493620	4288753	12,80	55,39	56,160		
	CR12	S de Porta Armas	493648	4289046	6,56	54,05	54,845		
	CR13	S de Porta Armas	493638	4289157	5,45	54,10	54,815		
	CR17	Santa Luzia	492581	4288456	16,13	64,66	65,629		
	CR18	Santa Luzia	492660	4288650	18,45	63,90	64,750		
	CR22	Canada da Quinta	490679	4291337	47,55	55,72	56,722		
	CR22A		490976	4291231	16,20	55,00	55,82		
	CR23	E de Cabouco das Ventas	489861	4291780	20,23	45,80	46,599		
	CR25	Lajes	491352	4290619	15,10	55,36	55,982		
	CR25A	Rua Cidade de Abrantes	491303	4290917	12,00	53,03	53,79		
	CR33	Canada das Fontainhas/Estrada 4-2	491980	4289638	15,70	60,27	61,153		
	CR35	Canada das Fontainhas/Estrada 1-1	491896	4290027	23,95	58,68	59,492		
	CR41	Rib. dos Pães	490071	4291580	31,60	48,25	49,023		
	CR42	Acima do Cabouco	491126	4287644	21,29	135,15	136,050		
	CR44	Fontinhas/Ladeira da Pena	490542	4288063	13,50	132,28	133,121		
	CR46A		489545	4288544	15,30	139,56	140,23		
	Poço 5	Paúl	494557	4287576	2,65	1,70	2,05		
Furos abastecimento CMPV	Areeiro-Fontinhas	Fontinhas/Canada do Pico	492163	4287111	102,60	94,01	94,28	92,50 a 102,60	1,51 a -8,59
	Canada das Covas	S. Brás/à EM 518	489154	4290054	111,77	103,45	103,79	100,40 a 111,77	3,05 a -8,25
	Fontinhas-Barreiro	Fontinhas/Canada do Barreiro	491037	4288172	116,55	106,92	107,10	105,75 a 116,55	1,17 a -9,62

	Juncal 1	Juncal	493741	4288704	62,70	55,22	55,29	54,15 a 64,8	1,07 a -9,58
	Pico Celeiro	Fontinhas/Canada da Cidade	492629	4286337	89,82 (1) /101,00 (2) /86,35 (3)	78,42	78,44		
	Juncal 2	Juncal	493672	4288587	64,80	53,12	53,19	52,49 a 62,73	0,63 a -9,61
Furos abastecimento Lajes	Well #1 - T1301	Lajes/Estrada 4-2	491626	4289248	73,76	59,05	59,19		
	Well #2 - T1302	Lajes/Estrada 4-2	491803	4289428	70,10	54,85	55,07		
	Well #3 - T1303	Lajes/Estrada 4-2	491858	4289646	58,82	55,60	55,92		
	Well #4 - T-1305	Canada das Fontainhas	491392	4289698	73,15	56,79	57,30		
	Well #5 - T-1306	Canada das Fontainhas	491602	4289864	72,84	54,65	55,38		
	Well #8 - T928	N de Canada das Fontainhas	491879	4290173	57,91	51,64	51,83		
	Well #9 - T-1325	Via Rápida 1/N Canada Doidos	490688	4289297	85,51	71,65	71,81		
	Well #10 - T-1326	Via Rápida 1/N Canada Doidos	490502	4289260	73,76	74,80	74,95		
	MW04, Site 5001	Paúl/South Tank Farm	494282	4288044	12,28	30,762	30,833	8,02 a 11,06	
	MW08, Site 5001	Paúl/South Tank Farm	494545	4287759	5,79	5,5	5,293	2,71 a 5,76	
Disco Site 5001	MW09, Site 5001	Paúl/South Tank Farm	494602	4287668	4,57	2,654	2,517	1,43 a 4,48	
	MW10, Site 5001	Paúl/South Tank Farm	494617	4287713	6,34	4,014	3,857	2,41 a 5,46	
	MW017, Site 5001	Paúl/South Tank Farm	494674	4287645	5,48	2,566	2,46	1,83 a 4,88	
	MW01, Site 3001	Porta de Armas.	493293	4289156	9,80	54,70	54,65	6,80 a 9,80	
	MW02, Site 3001	Porta de Armas.	493535	4289352	7,80	53,67	53,62	4,80 a 7,80	
Disco Site 3001	MW05, Site 3001	Porta de Armas.	493454	4289287	6,40	52,86	52,81	3,40 a 6,40	
	MW06, Site 3001	Porta de Armas.	493439	4289446	18,00	53,18	53,13	2,00 a 12,00	
	MW07, Site 3001	Porta de Armas.	493418	4289424	20,00	52,36	52,31	3,00 a 9,00	
Novos piezómetros	S1B	Junto ao furo do Areeiro.	492166	4287099	20,00	94,78	94,73	13 a 18	81,78 a 76,78
	S5A	Paúl no exterior da South Tank Farm.	494495	4287566	6,30	1,71	1,62	2,3 a 5,3	-0,59 a -3,59
	S5B	Paúl no exterior da South Tank Farm	494571	4287582	5,30	1,66	1,58	1,3 a 5,3	0,36 a -3,64
	S6A	Porta de Armas.	493479	4289472	11,00	56,44	56,39	2,6 a 8,6	53,84 a 47,84

	S6B	Porta de Armas.	493512	4289400	9,00	54,31	54,26	2 a 7	52,26 a 47,26
	FP1		492645	4287486	85,00	81,37	81,87	80,20 a 83,20	1,17 a -1,83
	FP2		492833	4287721	77,00	68,70	69,20	67,30 a 68,30 e 72,30 a 75,30	1,40 a 0,40 e -3,60 a -5,60
	FP3		493338	4288966	60,25	55,81	56,31	54,16 a 57,16	1,65 a -1,35
	FP3A		493335	4288976	16,50	53,56	56,31	7,50 a 8,50 e 13,00 a 15,00	48,31 a 47,31 e 42,81 a 40,81
	FP5	Paúl	494670	4287575	12,00	1,73	2,23	5,50 a 8,50	-3,77 a -6,77
	FP6		493495	4289255	60,35	53,56	54,06	56,00 a 59,00	-2,44 a -5,44
	FP6A		493491	4289262	42,00	53,56	54,06	37,00 a 40,00	16,56 a 13,56
	FP6B		493500	4289260	12,00	53,56	54,06	2,00 a 4,00 e 8,30 a 9,30	51,56 a 49,56 e 45,26 a 44,26
	FP7		493241	4288694	67,50	63,64	64,31	62,20 a 65,20	1,44 a -1,56
	FP4	Juncal	493664	4288584	60,00	53,23	53,21	52,30 a 55,30	0,81 a -2,19
Novos furos	FB1		492643	4287477	88,00	81,87	82,37	81,76 a 84,76	0,11 a -2,89
	FB2		492833	4287722	78,00	68,70	69,20	70,00 a 74,00	-1,30 a -5,30
	FB3		493336	4288971	65,00	55,81	56,31	54,50 a 55,50 e 59,50 a 61,50	1,31 a 0,31 e -3,69 a -5,69
	FB5	Paúl	494660	4287579	11,50	1,73	2,23	5,50 a 8,50	-3,77 a -6,77
	FB6		493495	4289258	65,00	53,56	54,06	56,00 a 57,00 e 58,00 a 60,00	-2,44 a -3,44 e - 4,44 a -6,44
	FB7		493240	4288695	72,00	63,64	64,14	65,10 a 70,10	-1,46 a -6,46
Outros	Fonte Caldeira das Lajes	Caldeira Lajes	490029	4292241	--	15,06	15,06		Não se aplica

O abastecimento ao concelho de Praia da Vitória é realizado por um conjunto de furos cujas características gerais são apresentadas no Quadro 1. Além destes pontos de água existe ainda um numeroso conjunto de poços privados (cf. Quadro 1), que são utilizados para abastecimento das actividades agrícolas e, no passado, também para satisfazer os consumos domésticos. Na generalidade dos casos os poços destinados ao consumo doméstico estão actualmente desactivados. A informação relativa a estes pontos de água foi recolhida na PraiaAmbiente em 2009, em Rodrigues (1993), Novo *et al.* (2001), Rodrigues (2002) e Schaller *et al.* (2005) e durante as campanhas de monitorização efectuadas durante o presente estudo, tendo sido postos de parte todos os poços cuja utilização era indevida (como fossas sépticas).



Fig. 43 – Pontos de água: a) Furo do Areeiro; b) Furo de Barreiro/Fontinhas; c) Furos do Juncal; d) Nascente da Caldeira das Lajes

8.4 Propriedades hidráulicas e produtividades dos sistemas aquíferos

8.4.1 Revisão bibliográfica

A natureza vulcânica da ilha Terceira origina um meio marcadamente heterogéneo, em termos de (1) disposição e geometria das unidades geológicas, (2) das propriedades hidráulicas das diferentes escoadas (com variações nestas propriedades dentro de uma mesma escoada, como entre zonas de brecha, zonas de cozimento, etc.). A tectónica vem adicionar a sua própria heterogeneidade por meio das falhas (que podem funcionar como zonas de circulação preferencial ou zonas de imperme, em função da existência ou não de preenchimento das caixas de falhas e natureza deste preenchimento) e basculamentos de estruturas, para citar dois dos aspectos mais significativos. A alteração hidrotermal e a ocorrência de filões afectam igualmente as propriedades hidráulicas dos materiais e os possíveis percursos preferenciais de fluxo. As estruturas que parecem apresentar uma maior uniformidade e significativa continuidade lateral, de acordo com a bibliografia, são os níveis de paleossolos, os quais marcam períodos de quiescência vulcânica durante os quais ocorreu a alteração generalizada dos topos das escoadas que nesses períodos constituíam a superfície da ilha.

Porém, apesar da sua heterogeneidade, as propriedades hidráulicas dos sistemas aquíferos podem ser genericamente descritas, em função de valores médios, máximos e mínimos conhecidos. Nesta secção apresentam-se os dados históricos existentes e na secção seguinte são apresentados os resultados obtidos para os sete ensaios de caudal realizados nos novos furos e piezómetros instalados.

Assim, para a transmissividade e condutividade hidráulica tem-se:

- ◇ **Formações suspensas** – Na bibliografia conhecida não há dados quantitativos de transmissividades e/ou condutividade. Os valores considerados modelo matemático vêm referidos na secção 10.3.2.2.
- ◇ **Sistema aquífero de base** – Tem transmissividades muito elevadas. Mendonça (1993) admite para este aquífero uma **permeabilidade** superior a 1000 m/d, valor adoptado também por Schaller *et al.* (2005) no desenvolvimento do seu modelo matemático para a região do graben das Lajes. No Plano Regional da Água (DRAOTRH, 2001) não existe individualização entre sistemas suspensos e sistema aquífero de base; as permeabilidades registadas são da ordem dos 730 m/d no sector do Graben; no sector dos Ignimbritos das Lajes regista apenas o valor de 124 m/d, não referindo quaisquer dados para a Serra de Santiago. Rodrigues (2002) utiliza valores teóricos de permeabilidade para o tipo de rochas vulcânicas ocorrentes no aquífero de base, adoptando o valor mínimo de 500 m/d e o valor máximo de 1 500 m/d. Schaller *et al.* (2005) adoptaram para o modelo matemático uma condutividade hidráulica de 1 000 m/d, pelo que, para uma espessura saturada de 14 m, também admitida por estes autores, a **transmissividade** média será da ordem dos 14 000 m²/dia. No Plano Regional da Água (DRAOTRH, 2001) as transmissividades variam entre 7 379 e 7 906 m²/dia para o sector do sistema Graben e entre 1 391 e 17 571 m²/dia para o sector dos Ignimbritos das Lajes, não se

indicando quaisquer valores para o sector da Serra de Santiago⁸. Schaller *et al.* (2005) fornecem um conjunto de dados de transmissividades medidas em furos de abastecimento da base das Lajes, que se apresentam no Quadro 2, onde é possível ver que os valores são superiores a 1 000 m²/dia e nalguns furos ultrapassam os 10 000 m²/dia; o valor mais elevado – 15 239 m²/dia – regista-se num ensaio no Well 10. Os furos do Juncal possuem transmissividades muito mais baixas, da ordem dos 1 000 a 2 000 m²/dia, o que dá uma ideia da heterogeneidade hidráulica deste aquífero.

Quadro 2 – Valores de transmissividades registadas no aquífero basal

Furo	Transmissividades (m ² /d)	Referência
Well 2	5190	Registos do furo
Well 4	2510	Registos do Furo 20 Junho 2004
Well 5	4605	Registos do Furo 20 Junho 2004
Well 8	15012	Registos do Furo 20 Junho 2004
Well 9	10295	Teste Escalonado da Icelandic Drilling
Well 9	12131	Teste Escalonado da Icelandic Drilling
Well 9	6220	Teste Escalonado da Icelandic Drilling
Well 9	7545	Teste Escalonado da Icelandic Drilling
Well 9	7727	Teste Escalonado da Icelandic Drilling
Well 9	10110	Teste Escalonado da Icelandic Drilling
Well 10	14414	Teste Escalonado da Icelandic Drilling
Well 10	10660	Teste Escalonado da Icelandic Drilling
Well 10	13212	Teste Escalonado da Icelandic Drilling
Well 10	14671	Teste Escalonado da Icelandic Drilling
Well 10	15239	Teste Escalonado da Icelandic Drilling
Well 10	14113	Teste Escalonado da Icelandic Drilling
Juncal 1	1296	Rodrigues (2002)
Juncal 2	2349	Rodrigues (2002)

Fonte: Schaller *et al.* (2005)

Os **coeficientes de armazenamento** são mal conhecidos, não havendo indicações quantitativas na bibliografia consultada. Novo *et al.* (2001) referem apenas alguns valores de **porosidades** determinados por Andersen *et al.* (1982) para as formações vulcânicas constituintes dos aquíferos suspensos e de base (cf. Quadro 3). Estes valores indiciam que os aquíferos suspensos têm em geral coeficientes de armazenamento baixos.

Quadro 3 – Porosidades estimadas das formações da ilha Terceira

Formação	Porosidade (%)		
	Mínima	Média	Máxima
Basaltos superiores	6	7,5	9
Basaltos inferiores	3	--	6
Ignimbritos das Lajes	11	17	21
Ignimbritos Inferiores	--	--	--
Formação Traquibasáltica dos Cinco Picos	6*	--	--

*universo de 1 amostra; Fonte: Andersen *et al.* (1982, in Novo *et al.*, 2001)

⁸ Note-se que os valores apresentados se referem apenas a 2 captações.

A **espessura saturada** encontra-se pouco caracterizada. Novo *et al.* (2001) referem que as formações suspensas têm uma reduzida espessura saturada, sem indicar valores, devendo sofrer variações significativas por efeito da recarga; a espessura saturada também é afectada pelas perdas significativas de água para os aquíferos mais profundos, via zonas de fracturação. Assim, tem-se:

- ◇ **Formações hidrogeológicas Superficiais** – considerando a profundidade média admitida para a ocorrência do nível imperme deste sistema, a espessura saturada será normalmente inferior a 8-10 m, embora na zona do Juncal possa rondar este valor na época húmida ou ser mesmo algo superior.
- ◇ **Formações hidrogeológicas Intermédias** – neste sistema as espessuras saturadas, embora provavelmente moderadas a baixas, são dificilmente definíveis dada a maior incerteza das profundidades e da distribuição espacial a que ocorrem os níveis imperme.
- ◇ **Sistema Aquífero de Base** – neste sistema, Rodrigues (2002), utilizando a formulação de Ghyben-Herzberg, calcula espessuras saturadas variando entre cerca de 35 a 75 m na zona central da ilha; na área do graben das Lajes esta espessura será significativamente inferior, da ordem dos 10 a 28 m. Note-se que estes são valores teóricos pois as condições reais, em especial a grande heterogeneidade, propiciam a criação de espessa zona de transição, reduzindo de forma significativa a espessura efectiva da lenticula constituída apenas por água doce. Schaller *et al.* (2005), tomando em conta estes aspectos, admitiram que a espessura deste aquífero, pelo menos na área do campo de furos de abastecimento da Base Militar das Lajes, é de 14 m. Deve referir-se que a espessura saturada é modificada pela recarga, verificando-se a sua expansão na época húmida (Rodrigues, 2002).

Analisando as **produtividades** dos sistemas aquíferos tem-se:

- ◇ **Formações hidrogeológicas superficiais** – neste sistema o melhor caracterizado é o de Lajes I, que tem baixa produtividade. A sua principal nascente – Caldeira das Lajes – possui caudais médios de 0,1 l/s (Schaller *et al.*, 2005; Rodrigues, 2002) e caudal máximo de invernada que não ultrapassa os 0,4 l/s (Rodrigues, 2002). Lajes I é ainda interceptado por numerosos poços tradicionais de grande diâmetro (Rodrigues, 2002, contabiliza o total de poços em 210), na sua maior parte desactivados, desconhecendo-se dos restantes os volumes de água extraídos.
- ◇ **Formações hidrogeológicas intermédias** – na zona de estudo inclui os aquíferos de Lajes II e Serra de Santiago, os quais apresentam produtividades baixas a moderadas entre 0,1 e 15,2 l/s, este último valor correspondendo a captações na formação hidrogeológica de Lajes II, de acordo com Rodrigues (2002).
- ◇ **Sistema Aquífero de Base** – este é o principal aquífero da zona, abastecendo a vasta maioria dos pontos de captação tanto para o concelho de Praia da Vitória como para a Base das Lajes. Allen e Hoshall (1990) consideram a zona do graben entre a falha de Santiago e a falha das Fontinhas (excepto a área sobreexplorada; cf. Fig. 46) como a de melhor potencial aquífero, registando produtividades entre 3,15 l/s a 31,54 l/s, por vezes superiores, dependendo da permeabilidade das formações

intersectadas. Em datas mais recentes estão registadas produtividades entre os 8 e os quase 20 l/s (conforme informação de email de 8/6/2009 enviado por Paulo Apura, Quadro 2) para os furos camarários e um total de 23,7 l/s para os furos de abastecimento da Base das Lajes (Schaller *et al.*, 2005). Novo *et al.* (2001) fazem referência a dois furos (T-1011 e T-3001) com caudais de 4,7 l/s e 1,6 l/s respectivamente e registam caudais entre 10 e 22 l/s para os furos de abastecimento à Base das Lajes (Quadro 4); note-se que estes valores são superiores aos de Schaller *et al.* (2005), o que pode indiciar uma modificação nos regimes de exploração. Schaller *et al.* (2005) referem que apesar deste elevado potencial aquífero as captações são muito vulneráveis à salinização pois captam na lenticula de água sobrenadante à água do mar.

Quadro 4 – Caudais máximos e mínimos registados em furos da Base das Lajes

Furo	Caudal mínimo (l/s)	Caudal máximo (l/s)
T-1301/ Well 1	18,4	19,8
T-1302/ Well 2	15,7	22,7
T-1303/ Well 3	12,9	18
T-1305/ Well 4	12,6	19
T-1306/ Well 5	19	--
T-928/ Well 8	10	11

Fonte: Novo *et al.* (2001)

No Quadro 5 apresentam-se valores de caudais específicos referidos no Plano Regional da Água (DRAOTRH, 2001).

Quadro 5 – Alguns valores de caudais específicos

Sector do aquífero de base	Caudal específico (l/(s.m))
Graben	70 a 75 *
Ignimbritos das Lajes	13 a 167 *
Serra de Santiago	---

Fonte: DRAOTRH (2001); * valores reportados a um universo de dois dados

Nos ensaios realizados pelo LNEC nos furos FB1, FB 2, FB3, Juncal 2, FB5, FB6 e FB7, os caudais específicos situam-se entre 2,4 e 150 l/(s.m), como se poderá verificar na secção 8.4.2 (Quadro 9).

Os resultados das campanhas do LNEC para a análise da **piezometria** são descritos nos Quadro 6 e Quadro 7. Acrescentaram-se, para comparação, os dados de Schaller *et al.* (2005), Rodrigues (2002), Allen e Hoshall (1990) e PraiaAmbiente.

Nos Quadro 6 e Quadro 7 são apresentados os resultados da monitorização dos níveis piezométricos nos diversos períodos em que foram medidas para este Estudo. Esta informação é complementada com os registos contínuos de níveis piezométricos efectuados com recurso a sondas de monitorização.

Este vasto conjunto de dados é utilizado no Capítulo 10, relativo ao modelo numérico, tendo servido de base para a sua calibração.

Quadro 6 – Medições do nível piezométrico nos novos furos e piezómetros ao longo do tempo

TIPO	DESIGNAÇÃO	Construção profundos		Primeira inserção das sondas			Primeira retirada das sondas			Segunda inserção das sondas			Segunda retirada das sondas		
		Profundidade ao nível (m) (medição ao solo pela Aqualis)	Data	Profundidade ao nível (m)	Data	Hora	Profundidade ao nível (m)	Data	Hora	Profundidade ao nível (m)	Data	Hora	Profundidade ao nível (m)	Data	Hora
Novos piezómetros	FP1	80,65	22-Mai	81,51	24-Jun	17:18	81,51	16-Set	16:11	81,54	28-Set	13:03	81,55	22-Out	10:40
	FP2	67,63	31-Jul							68,28	27-Set	18:00	68,31	22-Out	10:55
	FP3	55,08	27-Jun	55,59	26-Jun	17:00	55,63	16-Set	16:35	55,60	25-Set	13:15	55,63	22-Out	12:48
	FP3A	8,03	15-Ago							9,93	25-Set	12:09	10,64	22-Out	13:04
	FP4	52,65	02-Set							52,80	27-Set	17:00	52,81	22-Out	11:57
	FP5	0,94	Maio	1,41	24-Jun	14:30	1,44	25-Jun	18:11						
	FP6	53,33	08-Jul							53,31	25-Set	20:20	53,37	22-Out	11:37
	FP6A	14,40	14-Jul							15,23	25-Set	20:05	15,02	22-Out	11:28
	FP6B	2,22	15-Jul							2,99	25-Set	18:10	3,10	22-Out	11:25
	FP7	62,70	13-Jun	63,40	26-Jun	12:38	63,42	16-Set	15:51	63,39	26-Set	13:23	63,42	22-Out	12:28
Novos furos	FB1	81,04	Junho												
	FB2	67,76	02-Dez												
	FB3	55,65	24-Jul												
	FB5	1,46	27-Jun							1,56	26-Set	10:39	1,52	22-Out	12:10
	FB6	52,81	04-Set												
	FB7	62,94	Nov.												

Quadro 7 – Medições do nível piezométrico em diversos pontos de água ao longo do tempo

TIPO	DESIGNAÇÃO	Campanha Fevereiro 2010		Campanha Abril 2010			Campanha Maio 2010			Campanha Setembro 2010			Campanha Dezembro 2010		
		Profundidade ao nível (m)	Data	Profundidade ao nível (m)	Data	Hora	Profundidade ao nível (m)	Data	Hora	Profundidade ao nível (m)	Data	Hora	Profundidade ao nível (m)	Data	Hora
Poços	CR9	6,06	02-Fev	7,10	13-Abr	18:45	6,39	29-Mai	12:14						
	CR11	3,61	02-Fev	2,37	13-Abr	18:20	4,05	29-Mai	13:04						
	CR12			0,36	13-Abr	17:40	1,51	29-Mai	11:14				3,60	02-Dez	12:40
	CR13	1,62	01-Fev	0,72	13-Abr	17:00	1,73	29-Mai	10:39				3,00	02-Dez	12:30
	CR17			9,85	14-Abr	NR	9,14	29-Mai	15:07						
	CR18	16,02	01-Fev	11,70	14-Abr	NR	11,25	29-Mai	15:33						
	CR22A	13,92	02-Fev				10,49	29-Mai	19:35						
	CR23	15,86	02-Fev	14,62	14-Abr	NR	15,30	30-Mai	10:02						
	CR25			9,05	14-Abr	NR	9,80	29-Mai	18:40						
	CR25A	10,81	02-Fev				10,60	29-Mai	19:04						
	CR33						8,99	29-Mai	16:24						
	CR35			20,84	14-Abr	NR	22,73	29-Mai	17:21						
	CR41			29,65	14-Abr	NR	30,25	31-Mai	19:27						
	CR42	17,62	01-Fev				18,00	30-Mai	11:33						
	CR44	8,55	01-Fev				9,38	30-Mai	11:05						
	CR46A	9,06	01-Fev				11,07	30-Mai	16:43						
	Poço 5						1,06	30-Mai	19:50						
Disco Site 5001	MW04, Site 5001						9,88	31-Mai	16:27						
	MW08, Site 5001						4,37	31-Mai	12:30						
	MW09, Site 5001						1,67	31-Mai	11:31						
	MW10, Site 5001						2,52	31-Mai	10:37						
	MW017, Site 5001						1,07	31-Mai	10:05						
Disco Site 3001	MW01, Site 3001									5,16	27-Set	17:15			
	MW02, Site 3001									3,50	27-Set	NR			
	MW05, Site 3001									2,19	27-Set	16:37			
	MW06, Site 3001									3,17	27-Set	17:10			

TIPO	DESIGNAÇÃO	Campanha Fevereiro 2010		Campanha Abril 2010			Campanha Maio 2010			Campanha Setembro 2010			Campanha Dezembro 2010		
		Profundidade ao nível (m)	Data	Profundidade ao nível (m)	Data	Hora	Profundidade ao nível (m)	Data	Hora	Profundidade ao nível (m)	Data	Hora	Profundidade ao nível (m)	Data	Hora
	MW07, Site 3001									2,32	27-Set	10:21			
Novos piezómetros	S1B						14,23	31-Mai	14:10	17,30	24-Set	17:18			
	S5A			0,55	13-Abr	NR	0,90	28-Mai	17:49	1,29	24-Set	19:12			
	S5B			0,33	12-Abr	16:29	0,72	28-Mai	17:08	0,87	24-Set	18:03			
	S6A			4,77	14-Abr	16:59	5,34	28-Mai	12:40	7,05	27-Set	9:51			
	S6B			2,17	13-Abr	16:54	3,12	28-Mai	19:30	4,10	27-Set	9:11			
	FP1									81,54	26-Set	14:47			
	FP2									68,27	26-Set	16:45			
	FP3									55,58	25-Set	10:34			
	FP3A									9,90	25-Set	9:50	11,35	02-Dez	11:30
	FP4									52,80	27-Set	14:04			
	FP5						1,27	30-Mai	19:35	1,05	26-Set	9:54			
	FP6									53,34	25-Set	16:18			
	FP6A									15,16	25-Set	16:20	15,07	02-Dez	12:09
	FP6B									2,99	25-Set	16:22	3,30	02-Dez	12:06
	FP7									63,39	26-Set	11:00			
Novos furos	FB3									55,58	25-Set	13:25			
	FB5									1,55	26-Set	10:19			

8.4.2 Nova avaliação das transmissividades da área em estudo por interpretação dos ensaios de caudal

Foram realizados sete ensaios de caudal com as características descritas no Quadro 8. Os dados completos dos ensaios de bombagem podem ser encontrados no Anexo 5 (Aqualis, 2010).

Quadro 8 – Características sumárias dos ensaios de bombagem

Furo bombeado	Data de início do ensaio	Raio de perfuração (m)	Piezómetro	Distância ao limite exterior do furo de bombagem (m)	Caudal ensaiado (l/s)	Tempos de ensaio por escalões (min)
FB1	28-09-2010 9:00	0,156	FP1	9,84	3	60
					6	60
					8,3	600
					0	60
FB2	01-12-2010 17:00:00	0,156	FP2	2,34	3	60
					6	60
					9,1	1320
					0	60
FB3	23-07-2010 15:00:00	0,156	FP3	4,84	5	30
					7,5	30
					10	30
					0	30
					10	900
					0	60
Juncal 2	15-09-2010 11:00:00	0,191 (assumido)	FP4	5,96	4,6	600
					0	120
FB5	24-06-2010 18:45:00	0,156	FP5	9,84	13,3	1200
					12,5	240
					0	30
FB6	22-09-2010 14:00:00	0,156	FP6	4,84	5	240
					7,5	240
					10	600
					0	60
FB7	23-10-2010 14:30:00	0,156	FP7	2,34	6	60
					8	60
					10	1320
					0	60

Todos os ensaios, excepto o do furo de bombagem FB5, foram escalonados, sendo que os rebaixamentos estabilizaram muito rapidamente. As características dos furos, pelo seu diâmetro, a baixa profundidade de penetração no sistema aquífero (devido à necessidade de prevenir a subida de água salgada) e a profundidade dos níveis freáticos, não permitiram fazer ensaios de bombagem com caudais de extracção superiores.

Para os caudais maiores, ensaiados durante um tempo mais extenso, foi possível detectar efeitos de maré. Contudo, qualquer tentativa de correcção deste efeito utilizando informação sobre o atraso dos picos dos piezómetros em relação aos picos das marés oceânicas e as

amplitudes dos níveis piezométricos no piezómetro foram infrutíferas. Por esse motivo, fez-se a interpretação dos ensaios como se os níveis piezométricos não estivessem sob o efeito de marés, tendo-se normalmente utilizado tempos de ensaio num determinado escalão até uma hora. Note-se que, como se poderá ver na secção 8.4.4, as amplitudes das marés nos piezómetros⁹ são no máximo da ordem dos 2 cm, excepto para o piezómetro FP5, mais próximo da linha de costa, onde atinge cerca de 5 cm.

A resposta do meio aos ensaios de bombagem realizados - com a estabilização dos níveis piezométricos durante o ensaio após os primeiros instantes de ensaio, não permitindo, para os caudais ensaiados definir curvas de rebaixamento/tempo interpretáveis em regime transitório, excepto eventualmente para o ensaio no furo FB5 - reuniu as condições para se fazer a sua interpretação pelo método de Thiem. De acordo com o método de Thiem, no caso de se estar na presença de um furo de extracção (b) e de um piezómetro (p), a transmissividade calcula-se por:

$$T = Q \cdot \ln(r_p / r_b) / [2 \cdot \pi \cdot (s_b - s_p)]$$

sendo:

T a transmissividade [L^2/T],

Q o caudal [L^3/T],

r_p a distância do piezómetro à periferia do furo de bombagem [L],

r_b o raio de perfuração do furo de bombagem [L],

s_b o rebaixamento observado no furo de bombagem [L],

s_p o rebaixamento observado no piezómetro [L].

Nos casos em que os rebaixamentos foram mais acentuados fez-se a correcção dos rebaixamentos ($s_{i,corr}$ em vez de s_i) utilizando a correcção de Jacob:

$$s_{i,corr} = s_i - s_i^2 / (2 \cdot H_0)$$

sendo s_i o rebaixamento [L], H_0 a espessura saturada [L], representando i o furo de bombagem (b) ou o piezómetro (p).

Os valores determinados utilizando o método de Thiem para os diversos caudais de ensaio são apresentados no Quadro 9.

No caso dos furos FB3 e FB7 não foram registados rebaixamentos nos piezómetros. Esta situação é em princípio anómala e poderá ter a ver com o facto de não se considerar o efeito de maré. Contudo, para efeitos de caracterização da transmissividade utilizaram-se os valores calculados.

Dado que foram detectadas algumas perdas de carga nos furos de bombagem optam-se pelos valores de transmissividade finais representados no Quadro 10, que, quando existentes, são uma média dos valores obtidos para os dois caudais de ensaio mais baixos.

⁹ amplitude = absoluto de (nível piezométrico de um pico – nível piezométrico do pico seguinte) / 2

Quadro 9 – Interpretação dos ensaios pelo método de Thiem

Furo bombeado	Caudal ensaiado (l/s)	Rebaixamento observado no furo bombeado (m)	Rebaixamento observado no piezómetro (m)	Transmissividade (m ² /d)	Caudal específico (l/(s.m))
FB1	3	0,07	0	2444	42,9
	6	0,18	0,02	2139	33,3
	8,3	0,28	0,03	1893	29,6
FB2	3	0,02	0,005	7460	150,0
	6	0,05	0,015	6395	120,0
	9,1	0,095	0,02	4526	95,8
FB3 (*)	5	0,365	0	648	13,7
	7,5	0,845	0	420	8,9
	10	1,41	0	335	7,1
	10	1,57	0	301	6,4
Juncal 2	4,6	0,25	0,1	1452	18,4
FB5 (*)	13,3	5,6	0,03	190	2,4
FB6	5	0,74	0,02	328	6,8
	7,5	1,5	0,03	241	5,0
	10	2,11	0,06	231	4,7
FB7	6	0,05	0	4476	120,0
	8	0,07	0	4263	114,3
	10	0,08	0	4662	125,0

(*) Rebaixamentos foram corrigidos com correcção de Jacob, tendo-se considerado uma espessura saturada de 10 m.

Quadro 10 – Valores de transmissividade por local ensaiado

Furo bombado	Transmissividade (m ² /d)
FB1	2290
FB2	6927
FB3	533
Juncal 2	1452
FB5	190
FB6	285
FB7	4370

8.4.3 Recarga e descargas do aquífero basal

Admite-se que o graben das Lajes seja uma das áreas de **recarga** preferencial do aquífero basal da ilha Terceira, dado ser uma região com solos de textura grosseira e alta permeabilidade, topografia favorável à infiltração e coberto vegetal que é barreira eficaz ao escoamento superficial excessivo.

Houve, porém, em termos históricos uma grande divergência quanto aos valores efectivos de recarga que é afectada pela intensidade e duração dos eventos de chuva, textura do solo, declive e coberto vegetal. Referia-se também desconhecimento sobre a recarga efectiva que atingia o aquífero de base. Worts (1950, *in* Allen e Hoshall, 1990) admitem recargas da ordem dos 50% da precipitação. Allen e Hoshall (1990), com base em modelos de fluxo, definiram recargas entre 15% a 30% da precipitação, admitindo que um valor de 25% será apropriado

para estimar o balanço hídrico no campo de furos da base das Lajes, tendo calculado que 25% da precipitação equivale à recarga anual de 1 233 473 l por acre, ou seja cerca de **305 mm/ano**.

Novo *et al.* (2001) determinou recargas de **708 mm/ano** para a Serra de Santiago e graben das Lajes, o que equivale a volumes anuais de recarga de 4,5 hm³/ano para a Serra de Santiago e de 43,8 hm³/ano para o graben (recarga anual total = 48,3 hm³/ano para a totalidade destas duas regiões).

O Plano Regional da Água admite recargas de menos de 2 hm³/ano para os sistemas aquíferos de Serra de Santiago e do Graben, e recargas de menos de 10 hm³/ano para o sistema aquífero Ignimbritos das Lajes; considerando as áreas destes sistemas aquíferos e os limites máximos de recarga, obtêm-se recargas máximas de: (1) sistema Graben = cerca de **113,8 mm/ano**, (2) sistema Ignimbritos das Lajes = cerca de **298,9 mm/ano** e (3) sistema Serra de Santiago = cerca de **407,3 mm/ano**.

Schaller *et al.* (2005) admitiram valores de recarga significativamente inferiores, da ordem dos **272 mm/ano**, ou seja uma precipitação efectiva de 27,2%; estes autores consideram que a recarga ocorre por: (1) infiltração nos solos abaixo da zona radicular, (2) infiltração nos leitos das ribeiras, em especial nos troços em que estas ribeiras atravessam a falha das Fontinhas. No Quadro 11 apresentam-se os valores de recarga admitidos pelos diversos autores para a região das Lajes.

Quadro 11 – Valores de recarga para a região das Lajes

Autores	Recarga (mm/ano)
Worts (1950)	500 (1)
Allen e Hoshall (1990)	305
Novo <i>et al.</i> (2001)	708
DRAOTRH (2001)	250 (2)
Schaller <i>et al.</i> (2005)	272

(1) Considerando uma precipitação anual média de 1 000 mm e uma precipitação eficaz de 50%; (2) valor majorante.

Nos trabalhos desenvolvidos para este Estudo quantificou-se a influência da precipitação nos níveis piezométricos das duas formações suspensas da área onde foram instaladas sondas de nível.

Verificou-se, durante a monitorização de Setembro a Outubro com sondas automáticas, a correlação entre a precipitação e os níveis de água subterrânea na formação mais superficial e na intermédia. Essa correlação é evidente nas Fig. 44 e Fig. 45, onde se compara a profundidade ao nível no piezómetro FP6B e FP6A e a precipitação diária entre 26 de Setembro e 21 de Outubro de 2010.

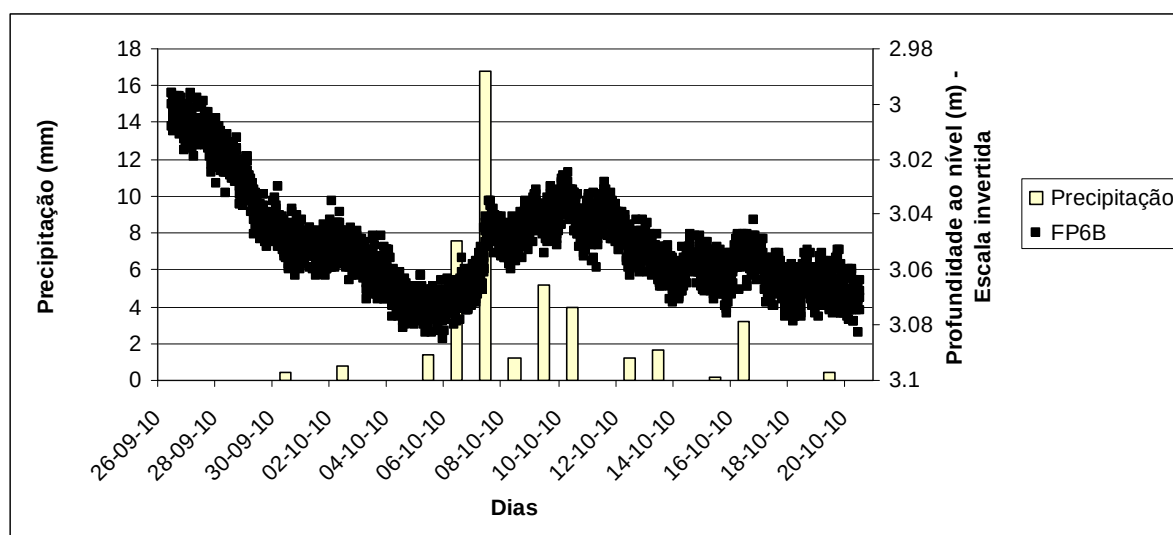


Fig. 44 – Profundidade ao nível registada no piezómetro FP6B e precipitação diária registada em Praia da Vitória

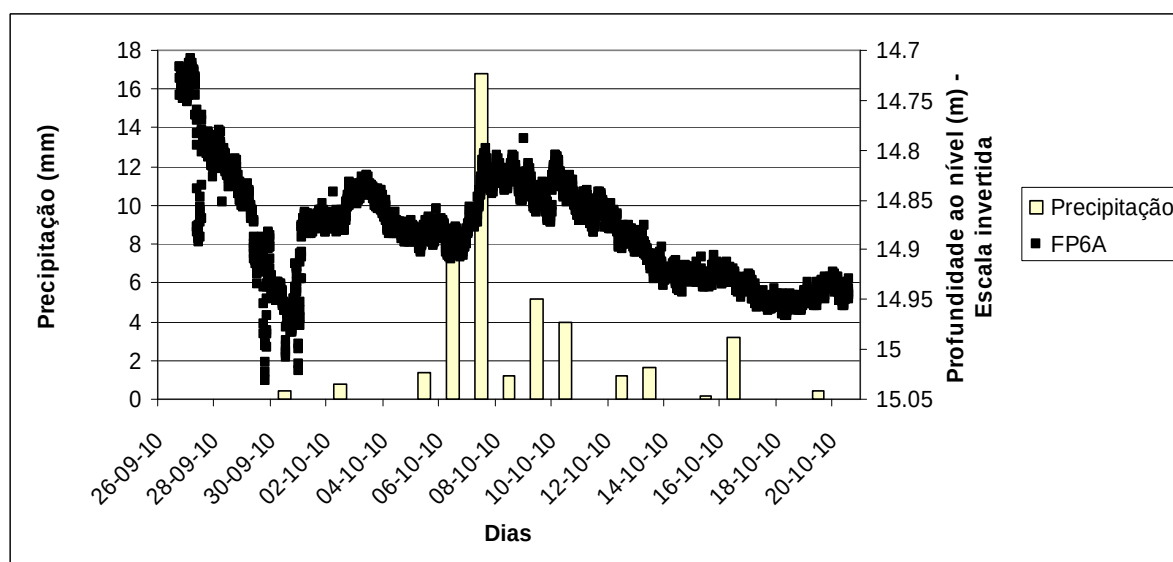


Fig. 45 – Profundidade ao nível registada no piezómetro FP6A e precipitação diária registada em Praia da Vitória

É possível verificar uma forte correlação entre o andamento das duas curvas, o que demonstra o claro efeito da precipitação na recarga e permite uma avaliação preliminar da drenância, entre estas formações e entre a intermédia e o aquífero basal, da ordem de grandeza de 1 a 1,5 cm/dia.

As **descargas subterrâneas naturais** ocorrem através de nascentes difusas ou concentradas, podendo ser (1) interiores, (2) litorais ou (3) submarinas. As nascentes interiores localizam-se em escarpas de falha como a escarpa das Fontinhas ou a Caldeira das Lajes. As nascentes litorais situam-se em (A) arribas, sendo principalmente nascentes difusas situadas na base ou a meia encosta de arribas (ex.: Amoreiras e Zimbral), (B) na bordadura da faixa litoral (ex.:

nascentes Poço da Areia e Paul, de natureza difusa e situadas no litoral SE, na região de Praia da Vitória), em geral apenas visíveis durante a baixa-mar e apresentam evidências químicas de serem afectadas por mistura com água do mar (Rodrigues, 2002). As nascentes submarinas situam-se abaixo do nível de baixa-mar, constituindo um importante grupo de descargas naturais do aquífero de base; as nascentes submarinas mais importantes no litoral da área de estudo ocorrem na zona de Praia da Vitória e Caldeira das Lajes (Schaller *et al.*, 2005). Na área do graben das Lajes existem 20 nascentes, na sua maioria localizadas na escarpa de falha das Fontinhas (17) e apenas 1 na depressão da Caldeira das Lajes (Schaller *et al.* 2005; Rodrigues, 2002). O conjunto das nascentes da escarpa das Fontinhas tem um caudal total de 26 l/s no Inverno e de 10 l/s no Verão; a nascente da Caldeira das Lajes (na base da formação dos Ignimbritos das Lajes) tem caudal de 0,1 l/s no Verão e 0,9 l/s no Inverno (Schaller *et al.*, 2005; Rodrigues, 2002). Os caudais totais conjuntos das nascentes de arriba de Amoreiras, Zimbral e Facho são inferiores a 1 l/s (Rodrigues, 2002), sendo 0,023 l/s o caudal de Verão da fonte do Zimbral (Novo *et al.*, 2001). Há indicações de que os caudais das nascentes difusas de Praia da Vitória, e em especial das nascentes submarinas, são elevados (Schaller *et al.*, 2005) mas desconhecem-se os seus valores.

As **extracções** de águas subterrâneas são o somatório dos caudais de exploração dos furos (que captam maioritariamente o aquífero de base) e dos poços (captam essencialmente as formações hidrogeológicas suspensas e, na zona litoral, o aquífero de base). Allen e Hoshall (1990) registaram, entre Setembro de 1988 a Agosto de 1989, para os furos de abastecimento à base das Lajes, um volume diário de 2 649 780 l/dia, o que equivale a 967 170 m³/ano. Schaller *et al.* (2005), para o total dos furos de abastecimento no campo de furos de abastecimento Base das Lajes refere valores de cerca de 750 000 m³/ano¹⁰. Os dados fornecidos por PraiaAmbiente (email de 8/6/2009 enviado por Paulo Apura), apontam para volumes anuais totais de extracção da ordem dos 972 991 m³/ano para os furos de abastecimento ao concelho de Praia da Vitória. Deste modo o volume total de extracção, considerando apenas os dados mais recentes, é de 1 719 781 m³/ano.

8.4.4 Influência da maré

O efeito da oscilação da maré no aquífero de base é um fenómeno bem conhecido em quase todas as ilhas. A ilha Terceira não é excepção como demonstra o mapa da Fig. 46 da PraiaAmbiente onde são delimitadas as áreas com interesse hidrogeológico, referindo as áreas que se encontram sobreexploradas.

Tratando-se de uma questão de interesse para o estudo do escoamento subterrâneo, nomeadamente para a análise do sentido e da direcção de fluxo, as variações do nível piezométrico impostas pela amplitude da maré oceânica foram medidas neste Estudo por meio de sondas colocadas nos piezómetros FP1, FP2, FP3, FP4, FP5, FB5 e FP7, em duas épocas distintas: Lua Nova, em que se regista maior amplitude de maré e Quarto Minguante, em que se regista menor amplitude maré. A monitorização foi feita entre o dia 24 de Junho de 2010 e o dia 23 de Outubro de 2010, tendo sido analisado em maior pormenor os dados relativos à Lua Nova, uma vez que correspondem ao período de maior oscilação. A Fig. 47 apresenta um período restrito dessa análise.

¹⁰ Tal pode indicar uma mudança no regime de extracção destes furos, com redução dos caudais extraídos.

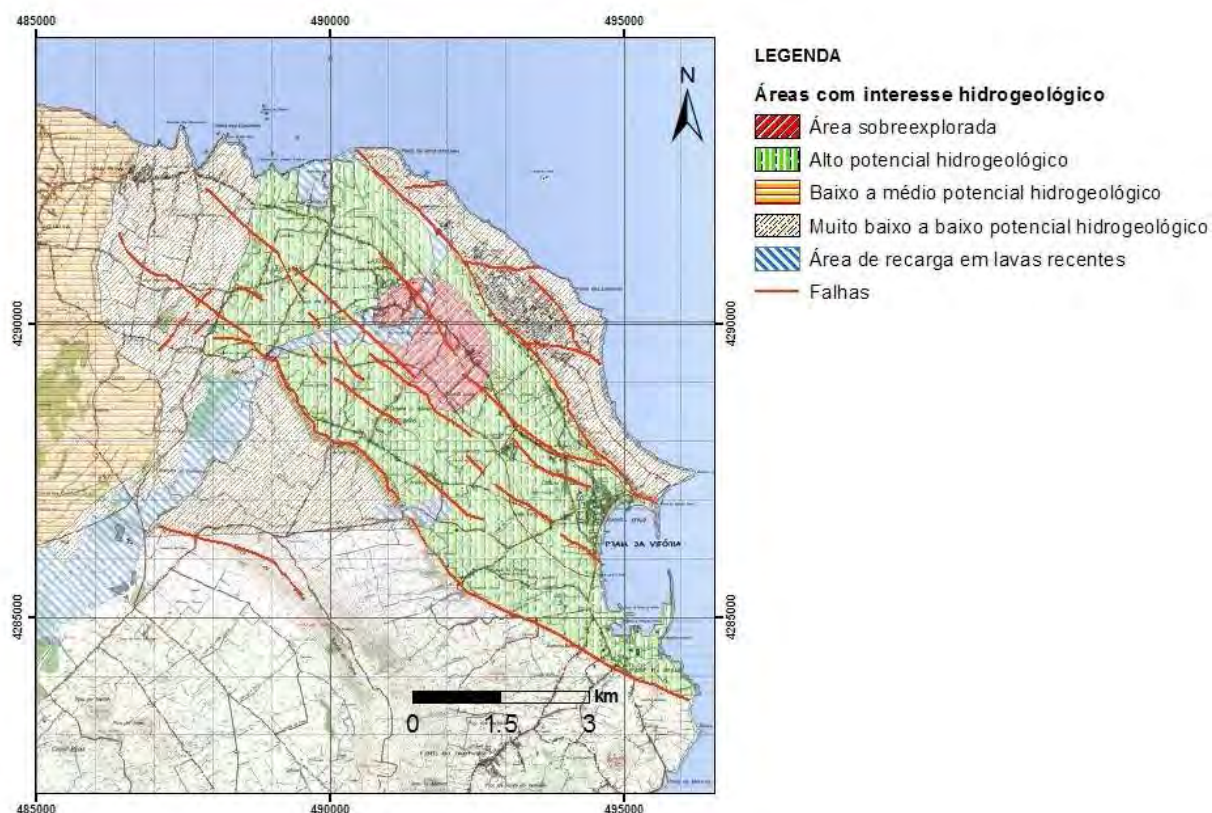


Fig. 46 – Zonamento do potencial hidrogeológico do graben das Lajes (incluindo zonas de sobreexploração)

Fonte: adaptado de Allen & Hoshall (1990), cedido por PraiaAmbiente em 2009

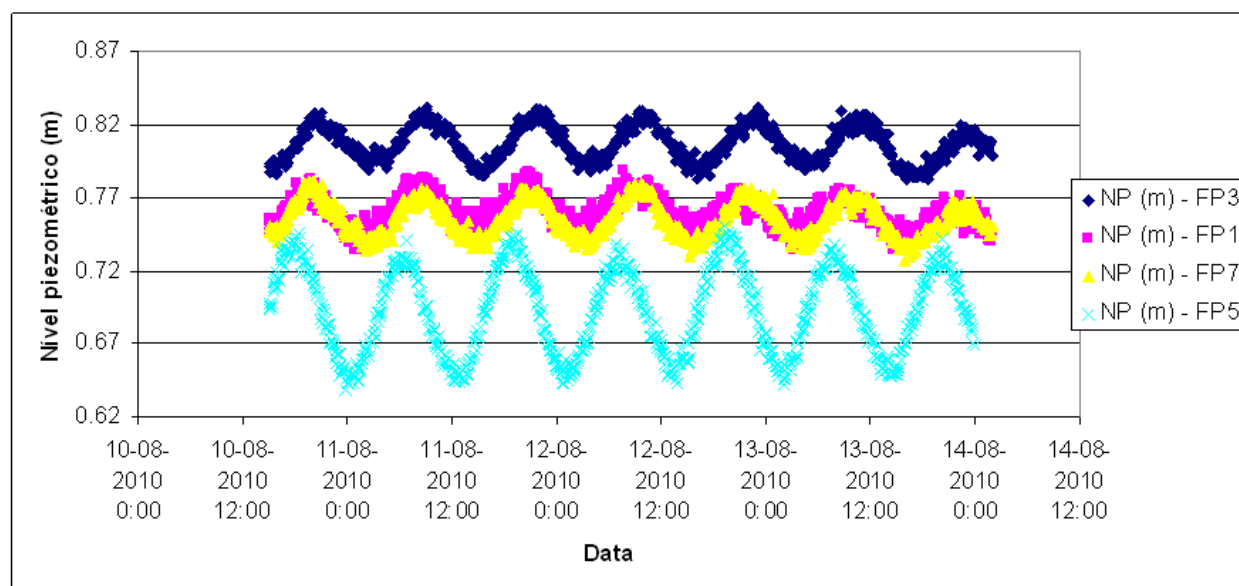


Fig. 47 - Amplitude de maré registrada nos diferentes piezômetros (exemplo do período de 10-08-2010 a 14-08-2010 - Lua Nova)

Do conjunto de pontos analisados, verifica-se que a amplitude da variação do nível piezométrico é maior no piezómetro FP5. Esta amplitude elevada é explicada pela proximidade deste ponto à linha de costa. Os restantes pontos apresentam uma amplitude semelhante, embora os picos máximos sejam diferentes.

Na análise efectuada determinou-se, para cada ponto, a amplitude do nível piezométrico bem como o atraso temporal médio em relação à preia-mar ou baixa-mar. Estes cálculos foram efectuados para a costa NE e SE (Fig. 48), tendo em conta a sua localização e distância à costa (cf. Quadro 12).

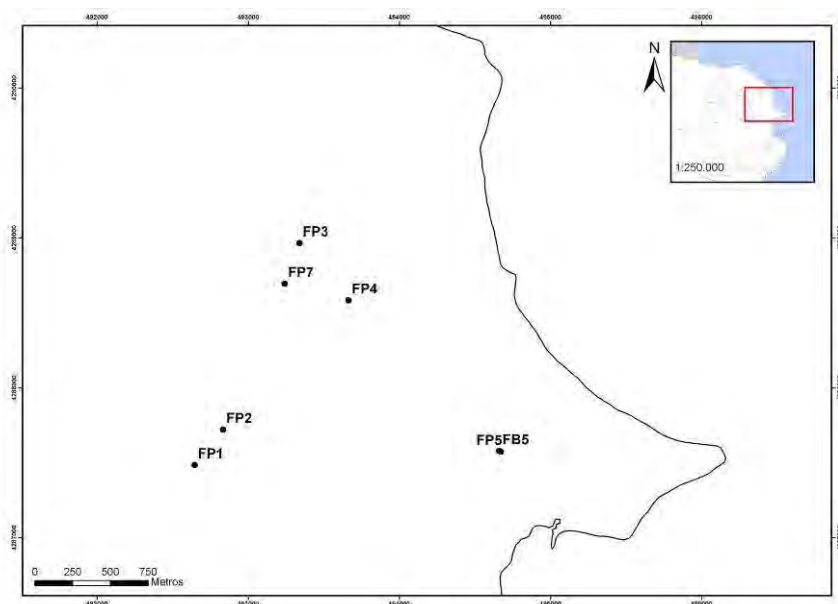


Fig. 48 - Furos onde foram registadas as oscilações provocadas pela maré

Quadro 12 – Distância à costa Sudeste e à costa Nordeste de cada um dos furos monitorizados com sondas

Furo	Distância à costa SE (m)	Distância à costa NE (m)
FP1	2190	2450
FP2	2131	2140
FP3	2580	1460
FP4	2090	1070
FP5	660	691
FB5	670	695
FP7	2460	1318

No Quadro 13 apresentam-se os resultados analisados tendo em atenção a distância à costa SE, tendo sido calculada, para cada piezómetro, a variação média entre o nível médio e máximo da amplitude da maré nas diferentes épocas e em função do tempo inicial em que se deu a preia-mar e baixa-mar, calculando o corresponde atraso de resposta da variação do nível piezométrico (Quadro 14).

Quadro 13 - Variação do nível piezométrico (Max-Med) para diferentes fases da Lua para a costa SE

Furo	Varição em Lua Nova (m) (Set-Out)	Varição em Quarto Minguante (m) (Set-Out)	Varição em Lua Nova (m) (Jul-Ago)	Varição em Quarto Minguante (m) (Jul-Ago)
FP1	0,023	0,012	0,024	0,015
FP2	0,020	0,013	-	-
FP3	0,020	0,012	0,021	0,012
FP4	0,024	0,014	-	-
FP5	-	-	0,049	0,024
FB5	0,048	0,022	-	-
FP7	0,022	0,014	0,021	0,013

Quadro 14 - Atraso temporal médio em relação à baixa-mar e preia-mar para a costa SE

Furo	Atraso médio em relação à baixa-mar e preia-mar (em Lua Nova) (Set-Out)	Atraso médio em relação à baixa-mar e preia-mar (em Quarto Minguante) (Set-Out)	Atraso médio em relação à baixa-mar e preia-mar (em Lua Nova) (Jul-Aug)	Atraso médio em relação à baixa-mar e preia-mar (em Quarto Minguante) (Jul-Aug)
FP1	2:45	2:46	4:20	4:59
FP2	-	-	4:17	4:49
FP3	4:32	4:38	5:10	5:20
FP4	-	-	4:23	4:47
FP5	5:01	5:20	-	-
FB5	-	-	2:33	2:40
FP7	5:13	5:35	4:38	5:26

A análise da influência da maré da costa SE para o interior permite observar que existe um atraso natural que aumenta para o interior da ilha e diminui junto à costa (Fig. 49), ou seja, os piezómetros mais próximos da costa respondem mais depressa ao efeito oscilatório da maré (FP5 e FP1). Verifica-se ainda que a influência da maré é tanto menor quanto mais distante estiver o piezómetro da costa SE (Fig. 51).

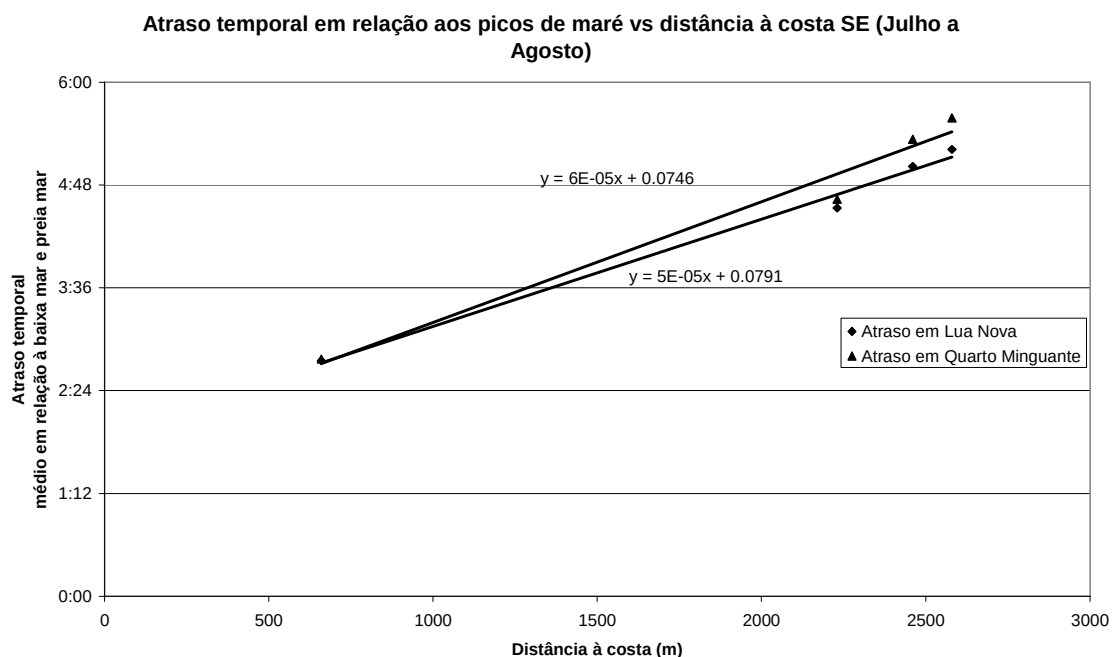


Fig. 49 - Atraso temporal médio em relação à baixa-mar ou preia-mar versus distância à costa SE (período de registo de Julho a Agosto)

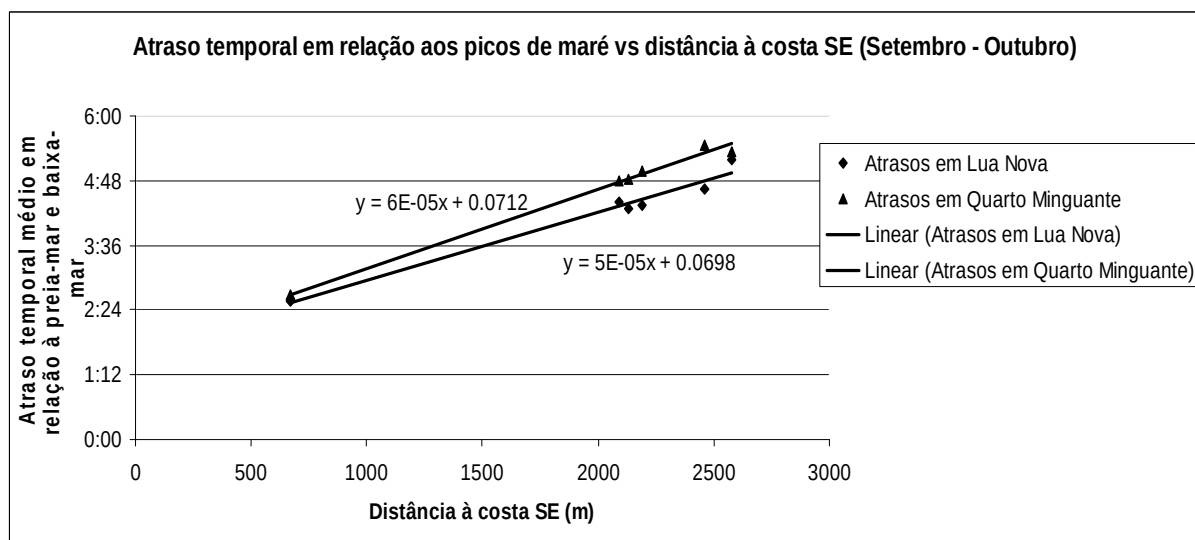


Fig. 50 - Atraso temporal médio em relação à baixa-mar ou preia-mar versus distância à costa SE (período de registo de Setembro a Outubro)

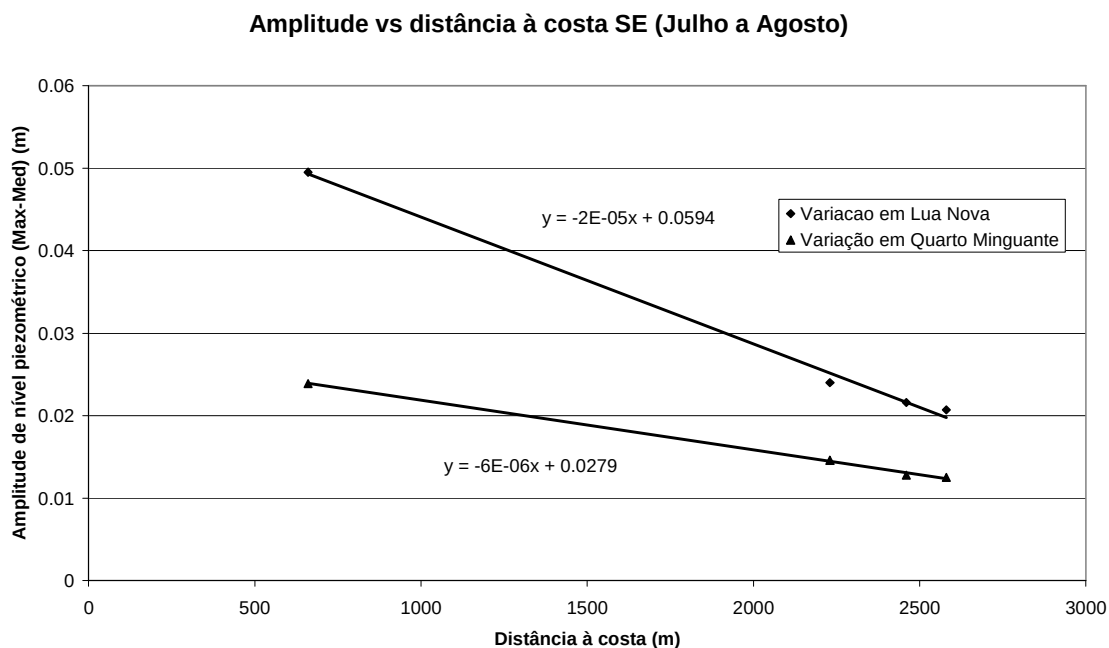


Fig. 51 - Variação do nível piezométrico (Max-Med) versus distância à costa SE (período de registo de Julho a Agosto)

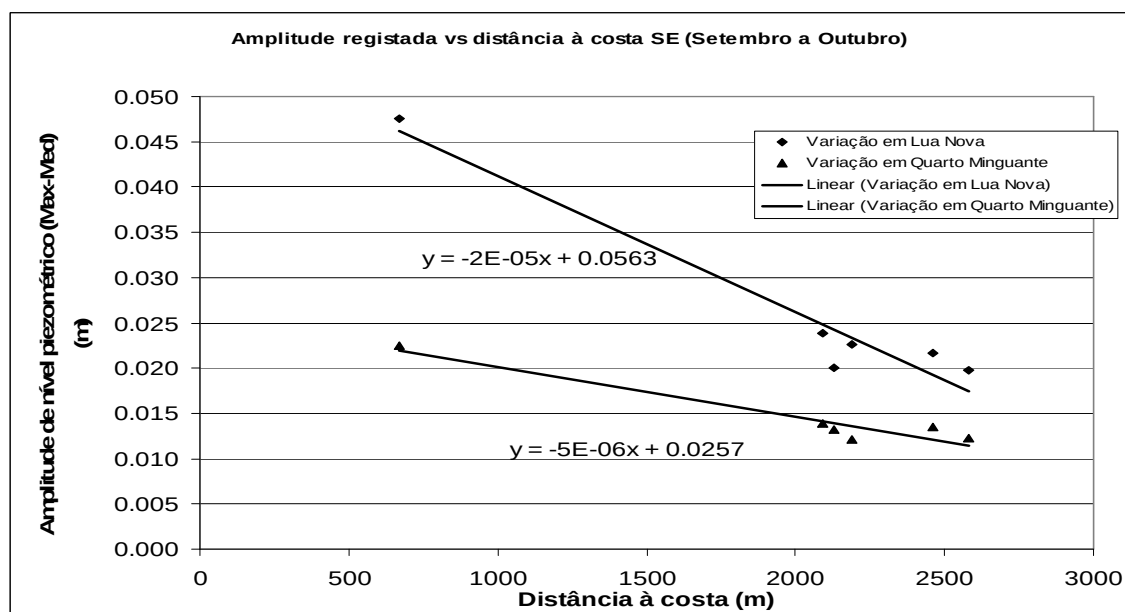


Fig. 52 - Variação do nível piezométrico (Max-Med) versus distância à costa SE (período de registo de Setembro a Outubro)

Ao contrário do que se passa para a costa SE, os valores registados para a influência da maré nos piezómetros não apresentam uma relação linear com a distância à costa NE, isto é, a progressão da maré não se faz como seria de esperar, sendo que o atraso calculado para o FP1 (o mais distante da costa) é menor que para os pontos FP3 e FP7. O mesmo se passa para a variação do nível piezométrico (Max-Med), em que o piezómetro FP1 possui valores maiores tanto em Lua Nova como em Quarto Minguante em relação a FP3 e FP7. Só o

piezômetro FP5 apresenta um comportamento normal quando comparado com os restantes, com amplitude de maré maior devido à sua proximidade do oceano.

Este fenómeno pode ser justificado pela presença do conjunto de falhas de direcção essencialmente paralela à costa NE (Fig. 53), em particular a falha de Santiago (NNW-SSE) que limita a NE o graben das Lajes, em que mais uma vez se confirma o seu comportamento como barreira natural entre o aquífero basal e o oceano. Esta conclusão é de especial relevância na definição de barreiras ao escoamento subterrâneo no modelo matemático do aquífero de base.

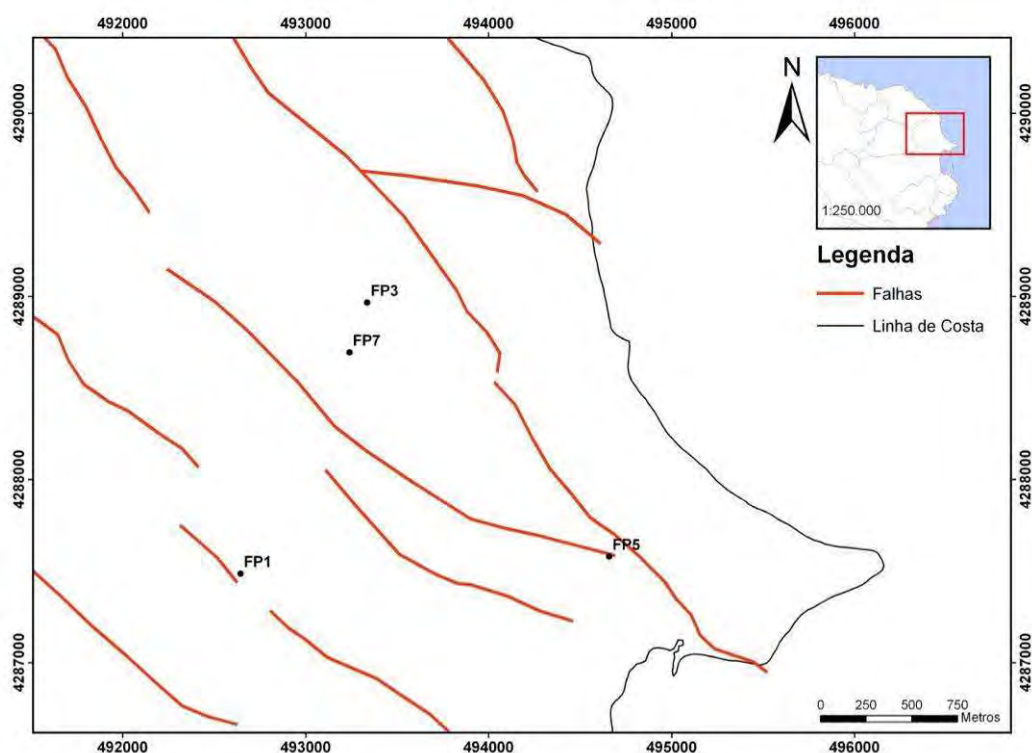


Fig. 53 - Falhas que atravessam a zona de estudo

Schaller *et al.* (2005) também haviam observado flutuações de maré na área dos furos de abastecimento da Base das Lajes, situados a uma distância de 3 a 3,5 km da linha de costa. Estes efeitos de maré mostram uma atenuação sensível face aos picos de baixa-mar e de preia-mar e um atraso de cerca de 5 a 6 horas entre estes picos e os que se registam nos furos. A sua existência atesta a elevada permeabilidade do aquífero basal e sua ligação ao oceano. Esta forte influência do oceano em áreas a alguma distância da linha de costa parece de certo modo contradizer a possibilidade da compartimentação do aquífero de base. Dada porém a localização dos furos onde foi medida a oscilação de maré por Schaller *et al.* (2005) – Well #1 e Well #3 – tal pode indiciar que a fracturação na zona central do graben origina uma faixa de altas transmissividades e em consequência uma forte influência das oscilações de maré, mas nas zonas mais laterais haver sectores com funcionamentos hidrogeológicos distintos, dando origem aos valores anómalos de piezometria.

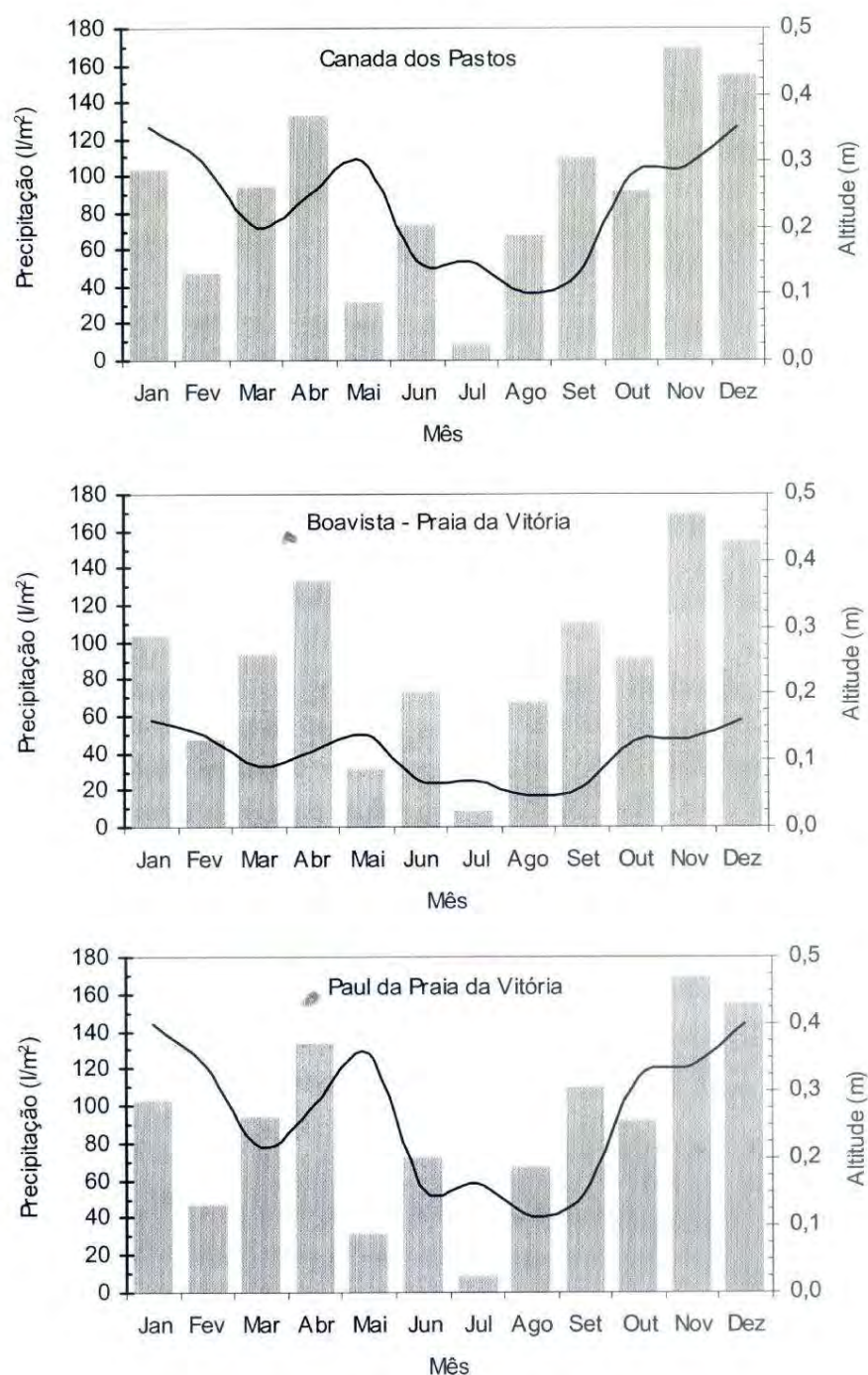


Fig. 54 – Relação entre as precipitações e as oscilações do nível piezométrico (altitude) no aquífero de base

Fonte: Rodrigues (2002)

A sobreexploração de sectores deste aquífero levou ao aumento da salinidade em alguns furos de abastecimento da base das Lajes, admissivelmente por *upconing* do limite inferior do aquífero basal. Isto indicia a relativa pouca espessura do aquífero nesta região. Este processo também se verifica em alguns furos de abastecimento.

Apesar das potencialidades hidrogeológicas do aquífero de base, a sua exploração deverá ser cuidadosa e controlada, em razão da sua geometria e características hidrogeológicas das formações. Nenhum furo de captação no aquífero basal deverá ser bombeado até ao ponto de gerar um nível piezométrico abaixo da cota do nível do mar de forma a evitar a intrusão marinha.

9. Focos de Poluição na Área de Estudo

9.1 Considerações gerais

Os problemas de poluição da área em estudo podem provir de diversas actividades associadas a práticas agrícolas deficientes, à rejeição de águas residuais não tratadas, à deposição não controlada de resíduos sólidos, e à salinização de captações por sobreexploração, embora o problema central solicitado neste Estudo resida nos aspectos resultantes da actividade da Base das Lajes, nomeadamente nas questões relativas ao armazenamento e ao transporte de combustível e outras operações associadas.

Refere-se, ainda, como aspecto relevante de poluição da área, constatado em inúmeros locais da Ilha, a utilização de antigos poços de abastecimento de largo diâmetro, presentemente utilizados como fossas sépticas e lixeiras. Esta questão poderá constituir, a prazo, um problema de poluição a atender.

A questão da sismicidade da Ilha é um factor que pode agravar as condições de qualidade das águas subterrâneas na medida em que poderá contribuir, como já aconteceu no passado, para causar a ruptura de infra-estruturas de armazenamento e/ou de transporte de produtos perigosos, contribuindo assim para o seu derrame.

Neste Estudo não se pretende realizar uma nova caracterização das principais fontes potenciais de poluição da Ilha, uma vez que este trabalho já foi realizado de forma exaustiva por diversos autores adiante mencionados. Pretende-se, sim, averiguar as eventuais consequências dessas origens de poluentes na qualidade dos solos e das águas subterrâneas localizados a jusante desses locais.

9.2 Áreas associadas às infra-estruturas da Base das Lajes

9.2.1 Principais áreas identificadas

Associado às infra-estruturas da Base das Lajes existe um conjunto de locais dados por contaminados ou potencialmente contaminados. Os principais locais referidos como contaminados são a *South Tank Farm/Site 5001*, *Main Gate/Site 3001*, *Fire Training Pit/Site 3002*, *Cinder Pit Fuel Tank/Site 5002* e *Cabrito Fuel Tank Área*.

Além destes cinco locais dados como contaminados, de acordo com a informação dos vários relatórios existentes, existem ainda 34 sítios suspeitos de contaminação, 14 dos quais provavelmente mais contaminados do que os outros e/ou que colocam um risco relativamente elevado para o meio ambiente ou a saúde humana; estes 14 locais suspeitos de contaminação são (Schaller *et al.* 2005):

- ◆ Site 5011 – Cinder Pit *Pipeline*
- ◆ Site 5012 – Cabrito *Pipeline*
- ◆ Site 2009 – Transformer yard
- ◆ Site 3012 – Asbestos dump site
- ◆ Site 2005 – BX gas station
- ◆ Site 3003 – Main power plant
- ◆ Site 5003 – North storm sewer drainage outfall
- ◆ Site 5013 – Military highway spill
- ◆ Site 2008 – Old pesticide shop
- ◆ Site 2007 – DRMO/Manny's garage
- ◆ Site 5009 – Cune da tacan annex number EYNH
- ◆ Site 5008 – Cinco Picos globe, annex number XYNJ
- ◆ Site 3007 – 18 hydrants area
- ◆ Site 3005 – 7 hydrants area

Ainda segundo os mesmos autores, os 20 restantes locais foram frequentemente fontes históricas significativas de contaminação, possivelmente também impactando sobre os solos e as águas subterrâneas na sua área envolvente.

A localização do conjunto de locais dados como contaminados e potencialmente contaminados pelo estudo DISCO de CH2M HILL (2004a) é apresentada na Fig. 55.

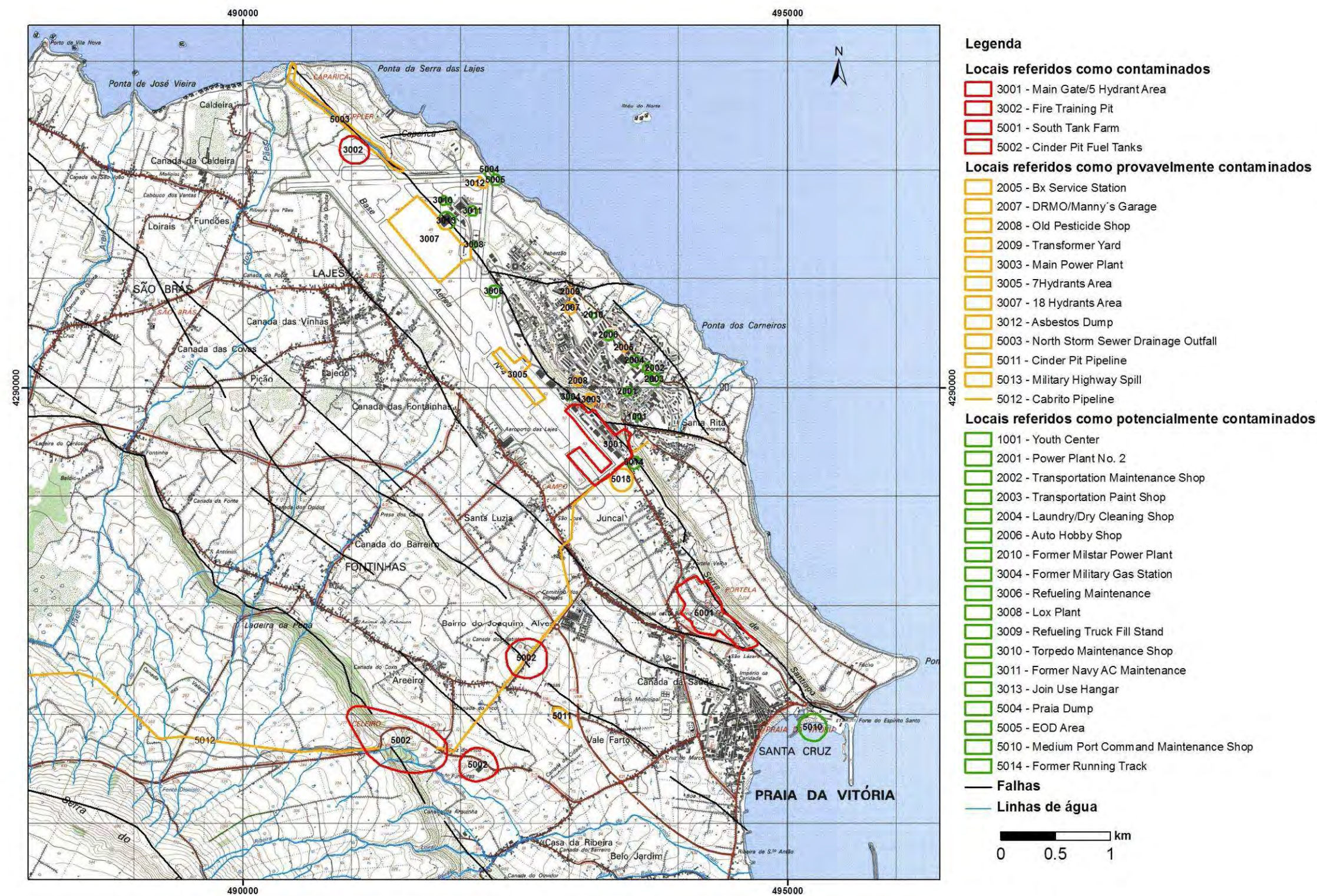


Fig. 55 – Localização dos locais contaminados e potencialmente contaminados identificados pelo estudo DISCO de CH2M HILL

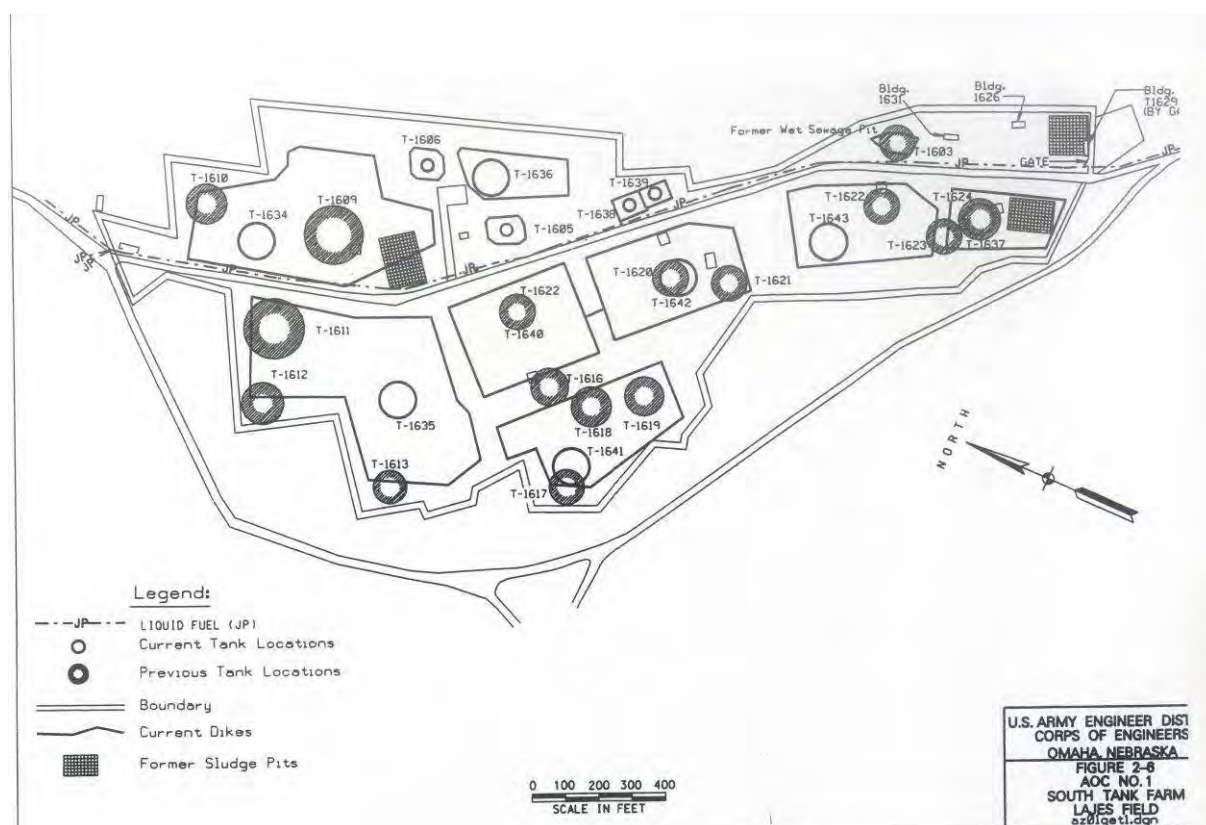
9.2.2 Locais referidos como contaminados

9.2.2.1 *South Tank Farm*/Site 5001/AOC-1

A *South Tank Farm*, também conhecida por DISCO (Discovery of Suspected and Contaminated Sites Study) Site 5001 e por AOC-1, localiza-se a cerca de 1200 m a sul da base das Lajes e a uma distância equivalente do porto, localizado a sul. O local situa-se no sopé da Serra de Santiago, contendo 12 grandes reservatórios de combustível com uma capacidade de armazenamento de cerca 242 milhões de litros de combustível (Cleary *et al.*, 1997).

Segundo os mesmos autores, antes de 1982 foi aqui armazenada gasolina de aviação em 18 tanques de combustível enterrados e não revestidos (Fig. 56). Cada depósito tinha cerca de 3 x 3 m e encontrava-se enterrado cerca de 3 m em profundidade. Os resíduos gerados durante as limpezas dos tanques eram enterrados perto do tanque 1609 ou num dos outros 9 locais usados com esse fim, admissivelmente sem qualquer revestimento, e/ou numa lixeira (slugde dumping pit). A lixeira tinha uma área de 45 x 37,5 m e 3 m de profundidade. Continha AVGAS (aviation gasoline) com tetraetil de chumbo assim como TPH e BTEX. De acordo com Schaller *et al.* (2005) era prática normal humedecer os solos com combustível para a sua compactação e assim conseguir uma base nivelada para a instalação dos tanques.

Posteriormente, entre os anos de 1982 e 1986, esta área foi refeita, com a demolição de 16 dos 18 tanques, tendo restado apenas os tanques 1605 e 1606. Foram então construídos dez novos tanques para substituir os antigos, com bermas inclinadas para o interior e cercados por diques de cimento para evitar fugas de eventuais derrames. Schaller *et al.* (2005) referem que nesta altura nem todos os solos contaminados foram removidos e que uma quantidade desconhecida destes solos foi dispersa na área durante os trabalhos de demolição e reconstrução. Dois dos tanques construídos deixaram de ser utilizados em 1988 por apresentarem sinais de corrosão.



Fonte: Cleary *et al.* (1997)

Fig. 56 – Localização dos tanques de combustível e depósitos de resíduos na área de *South Tank Farm*

De acordo com Cleary *et al.* (1997), também nessa época, foram construídos dois locais de depósito, um a seco e outro húmido, possivelmente para armazenar os solos contaminados dos locais de escavação. Estes solos escavados durante o processo de construção dos novos tanques estavam contaminados por chumbo. O depósito a seco era quadrado, com cerca de 40 m, tinha uma impermeabilização basal, mas não era coberto; está enterrado até cerca de 45 cm e encontra-se actualmente coberto por vegetação. As águas das chuvas acumulavam-se neste depósito até extravasarem e derramarem sobre os solos adjacentes, promovendo a sua potencial contaminação.

O depósito húmido localiza-se no extremo leste da *South Tank Farm*. Tem cerca de 1200 m² e pouco mais de 1 m de profundidade. Serviu para armazenar os solos contaminados e removidos durante a fase de construção dos novos tanques assim como as lamas retiradas dos antigos depósitos entretanto encerrados. Este depósito recebe directamente águas da chuva e foi regularmente drenado para canais não revestidos, que escoavam para o oceano; o sector de resíduos drenados correspondia à camada intermédia, deixando-se as camadas inferior e superior dos resíduos permanecer neste depósito (Cleary *et al.*, 1997). Os mesmos autores referem a presença de hidrocarbonetos (40 mg/l de hidrocarbonetos totais na camada superficial dos resíduos) e de metais tóxicos em águas aí amostradas.

Foram efectuadas algumas operações de remoção de hidrocarbonetos, nomeadamente através de um tanque separador instalado em 1990, destinado a remover os óleos da água destes

resíduos e que era drenada para o mar. Em 1992 o tratamento dos resíduos acumulados no depósito húmido terminou e estes foram removidos e enviados para outros serviços.

Além dos tanques de combustível e dos depósitos de resíduos húmido e seco há um conjunto de canais ao redor dos tanques, destinados à recolha das águas pluviais. Estes canais (assim como, no passado, o depósito húmido) descarregaram para valas não revestidas, paralelas à estrada e próximo de residências, que conduzem as águas até à baía de Praia da Vitória. Análises de água nestas valas em Junho 1994 revelaram concentrações de 1,0 mg/l para combustível e gorduras junto do tanque 1683 (Cleary *et al.*, 1997).

O combustível é transportado por camião ou em *pipelines*. A zona de abastecimento dos camiões não tinha inicialmente área de contenção de poluição. Em 1995 esta área foi revestida por cimento e foram instaladas zonas de contenção, assim como separadores de águas e óleos para tratar as descargas (cf. Fig. 57).



Fig. 57 – Tanque separador de águas e de óleos na *South Tank Farm*

Cleary *et al.* (1997), num estudo do Army Corps of Engineering, realizado em 1996, detectou contaminação por diesel-TPH em solos e águas subterrâneas pertencentes às formações hidrogeológicas suspensas, com especial destaque na região sudeste da área, incluindo a zona da entrada sul, tendo registado a presença de petróleo livre no local de recolha da amostra de solos, também eles contaminados por estes autores. Segundo os mesmos autores, nas amostragens de solos efectuadas em 1988, observaram-se concentrações médias em chumbo de 47,6 mg/kg, embora as máximas tenham ultrapassado os 800 mg/kg. Em 1989 foram efectuadas análises às lamas, amostras essas que apresentaram cádmio e crómio na fracção lixiviável em concentrações de 0,2 e de 0,26 mg/l, respectivamente. Desconhece-se se as lamas e a impermeabilização basal foram removidas, havendo referência de que, em 1990, as lamas ainda não tinham sido eliminadas (Cleary *et al.*, 1997).

9.2.2.2 Main Gate/Site 3001

Também identificado por Site 3001 (ou Main Gate/5 Hydrants Área, no relatório de CH2M HILL, 2005) é uma região com cerca de 14,2 ha, que se localiza no sector sul da Base Aérea das Lajes (Fig. 58). Abrange a área entre os serviços de bombeiros (T-715) e central eléctrica (T-

624), estendendo-se em paralelo à Avenida do Império até à Porta de Armas da Base das Lajes e ao sector dos antigos tanques de combustível a leste desta Porta de Armas, estendendo-se até ao lado sul e oeste do “Apron A”.

Referida em CH2M HILL (2005) como sendo o local mais problemático das instalações das Lajes, devido à extensão da contaminação por combustíveis e à possibilidade de migração desta poluição para fora da área, possui numerosos *pipelines* subterrâneos, activos e abandonados. Há ainda um “dispenser rack” e um sistema de reabastecimento de hidrantes abandonado (Schaller *et al.*, 2005). Desde a década de 50 existia no sector oriental um sistema de armazenamento de combustível. Também foi assinalado um antigo furo de abastecimento de água para consumo – o antigo Well #6, sito no edifício 713, demolido em 2004 – o qual poderá ter funcionado de conduta preferencial da contaminação superficial para o aquífero mais profundo. Foram registadas fugas de combustível em vários *pipelines* e derrames de combustível associados às demais estruturas desta zona, as quais podem ter afectado os solos e as águas subterrâneas. IT Corporation (1995) refere ainda que o padrão de distribuição de contaminação apoia as observações históricas da ocorrência de fases livres de petróleo em tanques colectores nesta zona. O mesmo trabalho refere que, em 1995, durante a instalação de uma nova conduta de abastecimento de água, os solos apresentavam uma patina de petróleo; é também referido um derrame em 1986, fora da base, quando um *pipeline* abandonado foi inadvertidamente pressurizado, dando origem a um jorro de combustível que cobriu um campo sito entre a Base das Lajes e Praia da Vitória. A área afectada foi posteriormente coberta por uma camada de solo mas não existem referências a quaisquer medidas de limpeza e de remoção dos poluentes.



Fig. 58 – Vista geral do parque de estacionamento no *Main Gate*

Em relação à contaminação de solos, IT Corporation (1995), detectou-se a contaminação de BTEX, tendo identificado 3 zonas críticas:

- ◆ Entre T-701 e T-705, na zona de cruzamento entre o *pipeline* JP-4 e a conduta de combustível diesel: elevada contaminação de BTEX ao longo do *pipeline* diesel, registando-se concentrações máximas acima de 1000 ppm; também foram com frequência encontrados contaminantes em fase livre. O padrão alongado da zona de contaminação, que ocorre nas proximidades do *pipeline* diesel sugere que as fugas nesta conduta serão as principais fontes de contaminação da zona.
- ◆ Ao longo do *pipeline* abandonado JP-4, entre T-706 e o “Apron A”: foi registada contaminação de BTEX, com concentrações máximas de 480 ppm, observando-se um rápido decréscimo das concentrações em área, o que indicava a presença de uma zona localizada de solo contaminado por petróleo, associada a fugas do *pipeline* JP-4 FTL.
- ◆ Ao longo da cerca sul da Base: contaminação elevada por BTEX, que se suspeita provir de fugas nos *pipelines* JP-4 ou diesel, entre T-711 e o “dispenser rack”, com valores de BTEX entre 10 e 43 ppm. Há a possibilidade desta contaminação, dado estar situada no limite da Base, poder ter afectado zonas envolventes.

Vários outros solos na área apresentam concentrações em BTEX acima de 10 ppm ou entre 1 e 10 ppm. Este assunto será aprofundado no relatório sobre a contaminação de solos.

O estudo de contaminação dos solos efectuada por CH2M HILL (2005) indicou que no sector da Avenida do Império e *pipeline* de fuel que liga ao 5 Hydrant System há forte contaminação das amostras nos locais, por fuel, TPH e VOCs.

Dada a ocorrência de níveis de água suspensos na zona, há a possibilidade da contaminação passar para o meio hídrico.

9.2.2.3 Fire Training Pit/Site 3002

Situa-se no extremo norte da Base das Lajes, a cerca de 230 m para leste do fim da pista de descolagem e a 146 m a sudoeste do canal de drenagem norte (Site 5003). É constituído por duas áreas circulares concêntricas, tendo a zona circular interna um diâmetro de cerca 30 m e a zona circular externa um diâmetro de cerca 122 m. A zona circular interna estava coberta por solo, vegetação e cascalhos e a zona circular externa por uma mistura de asfaltos, solos, cascalhos e alguma vegetação. Até 1982 esta zona era utilizada pelos bombeiros da base como área de treino, sendo habitual regar um avião de treinos com combustível, situado no centro da zona circular interna e lançar-lhe fogo; o treino de extinção de incêndios incluía a utilização de halon e espumas. O combustível era fornecido a partir de um tanque situado a leste das zonas circulares descritas. Tanto o avião de treinos como este depósito foram removidos, sendo que na altura da remoção do depósito (em 1999) se observaram sinais de contaminação por combustível.

CH2M HILL (2005), no estudo da contaminação dos solos desta zona, detectou concentrações de DRO (C12-28) e de GRO (C1-12) acima dos limites da legislação holandesa e valores

significativos de C8-18 nas amostras da zona central interna. Na zona do antigo depósito de combustível foi detectado tolueno e em estruturas secundárias associadas foram detectados alguns teores de componentes de fuel.

9.2.2.4 Cinder Pit (Cova das Cinzas) Fuel Tanks/Site 5002/AOC-26

Este conjunto de estruturas construídas em meados dos anos 50 foi destinado ao armazenamento e distribuição de combustível e estiveram em operação contínua até 1994. Situada na base da Serra do Cume, a sul da povoação das Fontinhas, era constituída por um conjunto de tanques de combustível com uma capacidade total de 769 000 barris: seis UTs com capacidade de 50 000 barris de combustível JP-8 cada, e cinco ATs (dois tanques com capacidade de 152 000 barris de JP-8 cada e três tanques com capacidade para 55 000 barris de JP-8 cada). Os tanques de 152 000 e 55 000 barris encontravam-se à superfície, estando os restantes enterrados. Na visita de campo realizada no âmbito deste projecto, em 2009, todos os tanques anteriormente situados à superfície tinham sido já demolidos, como se pode ver nas Fig. 59. As estruturas dos depósitos subterrâneos permaneciam no local (Fig. 60 e Fig. 61). Com a excepção dos tanques T-1330 e T-1331 (Cinder Pit 1), situados na Estrada Joaquim Alves, todos os restantes se localizam na escarpa de falha das Fontinhas.

Associados a estes tanques existia um conjunto de edifícios que, em Fevereiro de 2005, estavam já demolidos ou a aguardar transferência. Além dos tanques existem ainda dois *pipelines* importantes. O estado de conservação de um dos *pipelines* de ligação dos tanques é apresentado na Fig. 62.

Existiam ainda dois locais de soterramento das lamas resultantes da limpeza dos tanques, situados junto aos locais dos tanques T-1341 e T-1342. Tipicamente, de acordo com Cleary *et al.* (1997), durante as operações de limpeza dos tanques as lamas produzidas eram enterradas no solo, ao lado do portal de acesso aos tanques, pelo que é provável existirem mais locais de enterramento destes materiais.

Cleary *et al.* (1997) referem igualmente que o tanque 1330 sofreu um derrame de 291 476 litros fuel em 1988, sendo desconhecidas quais terão sido as medidas de limpeza da contaminação ou os impactes deste derrame sobre as populações vizinhas.

Estes autores referem que, quando havia limpeza dos tanques ou após fugas de combustível os residentes nas vizinhanças se queixavam das águas terem cheiro e sabor a combustível, o que reforça a ideia sugerida nesse relatório, da possibilidade de contaminação de águas a partir da migração dos contaminantes desde os solos de cobertura. A poluição será assim dominada por resíduos de hidrocarbonetos e solventes clorados. Schaller *et al.* (2005) admite que as rochas da região (cinzas e depósitos de vertente) sejam muito porosas, facilitando a infiltração para os aquíferos em profundidade, o que está em conformidade com as observações de campo de 2009 do presente estudo.



Fig. 59 – Vista geral da área da Cova das Cinzas e trabalhos em curso



Fig. 60 – Pormenor dos depósitos antigos da área da Cova das Cinzas



Fig. 61 – Pormenor dos depósitos antigos enterrados da área envolvente à Cova das Cinzas



Fig. 62 – Pormenor do *pipeline* na Cova das Cinzas

Segundo o estudo de Cleary *et al.* (1997), ocorre contaminação dos solos da área por TPH-DRO. Nas campanhas de amostragem não foram interceptados níveis de água que, a existirem, teriam de ser muito superficiais.

9.2.2.5 Cabrito Fuel Tank Area/AOC-17

Estas instalações estão situadas em local remoto face à zona das Lajes e serviram como depósitos de combustível, para funcionar em casos em que um ataque militar destruísse os outros campos de tanques de combustível da Base. É uma região relativamente plana, cercada, que englobava um tanque de fuel JP-8 (edifício T-2001) com capacidade de 100 000 barris, o qual estava parcialmente enterrado e coberto por vegetação (Cleary *et al.*, 1997). Costumavam existir, segundo os mesmos autores, duas estações de combustível numa plataforma de cimento mas em 1997 uma das estações tinha sido já removida embora a casa de bombagem (edifício T-2000) ainda existisse. Esta zona foi colocada fora de serviço em 1993 e o tanque foi esvaziado. As práticas de funcionamento e manutenção incluíam, até meados

dos anos 70, o enterramento das lamas do fundo dos tanques de fuel junto dos portais de acesso a estes tanques.

É possível terem ocorrido derrames dos depósitos ou nas estações de combustível e que a contaminação do solo devida a estes acidentes possa migrar para as águas subterrâneas (Cleary *et al.*, 1997).

Estes mesmos autores assinalaram, durante o estudo de avaliação do estado da poluição dos solos e águas, a presença de chumbo em todas as amostras de solos e a presença de TPD-DRO. Não é indicada contaminação nas águas pois não foram colectadas amostras dada a grande superficialidade do estrato rochoso.

9.2.3 Locais referidos como muito provavelmente contaminados

9.2.3.1 Military Highway Spill/Site 5013

Ao invés dos locais atrás descritos, que mostraram estar contaminados, os restantes locais são suspeitos de estarem muito provavelmente contaminados, de acordo com o estudo DISCO de CH2M HILL (2004a), sendo classificados como locais prioritários para posterior avaliação de risco por Schaller *et al.* (2005).

O site 5013 situa-se numa propriedade privada, a meia distância entre a Base das Lajes e a *South Tank Farm*. Foi local de um derrame de combustível, que poderá corresponder ao derrame de 1986, em que a pressurização de um *pipeline* desactivado deu origem a um jorro de combustível, e que é referido na secção 9.2.2.2, embora a bibliografia não seja muito clara quanto à sua localização ou historial. Nas proximidades desta zona situam-se os furos do Juncal – Juncal 1 situa-se a cerca de 183 m para SE e Juncal 2 a cerca de 213 m para ESE – que poderão ser afectados, em especial se a contaminação migrar para os respectivos cones de rebaixamento, de acordo com Schaller *et al.* (2005). Segundo os resultados preliminares do modelo matemático da região, desenvolvido por Oliveira *et al.* (2010), agora confirmados (cf. Capítulo 10), esta zona tem o potencial para contribuir para uma eventual contaminação de poços/furos localizados das formações hidrogeológicas superficiais da zona do Juncal (cf. Fig. 69).

Apesar de ser um dos 14 locais provavelmente contaminados, só agora foi investigado. Desconhece-se que medidas de limpeza poderão ter sido efectuadas na altura do derrame.

9.2.3.2 Cabrito Pipeline/Site 5012

Este *pipeline*, actualmente também desactivado (a desactivação ocorreu na década de 90), tem 8 784 m de comprimento e 20 cm de diâmetro, e liga a Fuel Tank Area do Cabrito com a zona dos Cinder Pit (Cova das Cinzas) Fuel Tanks. A sua situação é similar à do Cinder Pit Pipeline, com a provável presença de combustível que não foi drenado, podendo contaminar ou ter contaminado os terrenos envolventes (e o meio subterrâneo) ao longo do seu traçado caso seja ou haja sido de algum modo danificado ou corroído. É considerado um dos locais prioritários mais provavelmente contaminados.

9.2.3.3 Cinder Pit Pipeline/Site 5011

O estudo DISCO, de CH2M HILL (2004a), classifica esta estrutura como área prioritária de estudo dados os riscos de contaminação associados (Fig. 63). O Cinder Pit Pipeline é um pipeline de combustível com 30 cm de diâmetro e cerca de 5 640 m de comprimento, que liga o Cinder Pit (Cova das Cinzas) Fuel Tanks/Site 5002 à Base das Lajes, junto ao pavilhão T-711. Foi desactivado entre 1994 e 1997, não tendo sido completamente drenado do combustível que continha, pelo que coloca riscos de contaminação, por fugas de combustível, às propriedades privadas que atravessa, assim como ao meio subsuperficial e águas subterrâneas caso seja perfurado ou sofra corrosão. Acresce ainda que possui vários pontos de depressão onde é possível que se acumulem restos de combustível. O risco é acrescido dado este pipeline passar nas proximidades do furo de abastecimento camarário do Areeiro.



Fig. 63 – Área militar envolvente à Cova das Cinzas



Fig. 64 – Pormenor de uma bóia de retenção de hidrocarbonetos à saída do north storm sewer drainage outfall

9.2.3.4 Tacan Annex Number EYNH/Site 5009

Situa-se no topo da Serra do Cume em área onde não ocorrem aquíferos suspensos muito importantes (os níveis suspensos da região alimentam, em geral, as numerosas e pouco produtivas nascentes da Serra do Cume). Considerado como um dos 14 locais provavelmente mais contaminados, com a suspeita de ter contido no passado solos afectados por combustível, CH2M HILL (citado em Schaller *et al.*, 2005).

9.2.3.5 Cinco Picos Globe Com Annex Number XYNJ/Site 5008

Situado em terrenos admissivelmente muito permeáveis, no sector entre a Serra do Cume e a Serra da Ribeirinha, fora da área abrangida pelo presente estudo, foi considerada por CH2M HILL como um local potencialmente contaminado e a necessitar de investigação, fazendo parte da lista de 14 locais prioritários para estudo de avaliação do risco de contaminação (Schaller *et al.*, 2005).

9.2.3.6 North Storm Sewer Drainage Outfall/Site 5003

Vala a céu aberto, situada no extremo N-NE da base, perto da área do Fire Training Pit, seguindo ao longo da rede de vedação da Base das Lajes, segundo uma direcção NW até ao litoral norte, a E da Caldeira das Lajes (Fig. 64). Drena águas de escorrência da Base das Lajes para o oceano. Há a possibilidade de contaminantes arrastados pelas águas de escorrência da Base poderem atingir esta área. Considerado um dos 14 locais prioritários para avaliação do estado de contaminação, segundo Schaller *et al.* (2005).

9.2.3.7 Asbestos Dump Site/Site 3012

Situado no término NE do triângulo de pistas de aterragem de emergência, este local foi usado como zona de deposição de resíduos. Considerado como uma das zonas provavelmente mais contaminadas, admite-se que se localize numa zona de elevada permeabilidade (onde poderão existir apenas pequenos aquíferos suspensos descontínuos, devido à perturbação causada pela movimentação de terras associada às obras que foram sendo efectuadas na região) e possa assim ser um foco de contaminação para o aquífero de base.

9.2.3.8 18 Hydrants Area/Site 3007

Situado na área do triângulo de pistas de aterragem de emergência, tem um carácter industrial de pequena escala, e é um local suspeito de estar contaminado pertencente à lista de 14 locais prioritários para avaliação de risco de contaminação, a qual estará associada às actividades de manipulação de combustíveis e similares. O modelo de Schaller *et al.* (2005) indica que o fluxo nas formações hidrogeológicas suspensas se dará para N, em direcção aproximada para a Caldeira das Lajes. Porém, dada a suspeita que este aquífero nesta zona esteja fragmentado em pequenos aquíferos suspensos descontínuos, e sendo a região admissivelmente muito permeável, o caminho preferencial de movimentação da poluição eventualmente existente será no sentido do aquífero de base.

9.2.3.9 7 Hydrants Area/Site 3005

Situado a sul do triângulo de pistas de aterragem de emergência, é um local suspeito de possuir contaminação, com características similares às do Site 3007, tanto em termos de tipo de contaminação como de enquadramento hidrogeológico (Schaller *et al.*, 2005).

9.2.3.10 Main Power Plant/Site 3003

Situada nas proximidades da zona da Main Gate, a N desta, a SW da escarpa da Serra de Santiago, encontra-se em área permeável e com características hidrogeológicas similares às da região da Main Gate. É considerado um local suspeito de contaminação, pertencendo à lista de 14 locais prioritários de Schaller *et al.* (2005).

9.2.3.11 BX Gas Station/Site 2005

Situado na área de Santa Rita, associado à zona de serviços da Base das Lajes, localiza-se na zona planar da Serra de Santiago, que se admite ser região muito permeável, com o fluxo das

águas a dar-se essencialmente no sentido do aquífero basal e, pontualmente sendo intersectado por aquíferos suspensos, que se admite serem descontínuos e drenarem para nascentes situadas nas arribas. Eventualmente a drenagem pode dar-se superficialmente para o litoral por intermédio de pequenas ravinas. É um local suspeito de contaminação, pertencente à lista de 14 locais prioritários de Schaller *et al.* (2005), mas pouco se conhece sobre o eventual espectro desta contaminação.

9.2.3.12 DRMO/Manny's Garage/Site 2007

Situado na zona de serviços associada à Base das Lajes, no sector planar da Serra de Santiago, a NW do Site 2005 e a SE de Rebentão. É um local suspeito de contaminação, pertencente à lista de 14 locais prioritários de Schaller *et al.* (2005), mas em que o eventual espectro desta contaminação é mal conhecido. As condições hidrogeológicas são similares às do Site 2005.

9.2.3.13 Old Pesticide Shop/Site 2008

Situado nas proximidades de Santa Rita, na escarpa da Serra de Santiago, em área que será potencialmente dominada pelo escoamento superficial ao longo da escarpa, seguida de eventual infiltração ao atingir a plataforma do graben das Lajes. É um local suspeito de contaminação, pertencente à lista de 14 locais prioritários de Schaller *et al.* (2005), mas em que a indefinição do espectro de contaminação é similar aos locais anteriores.

9.2.3.14 Transformer Yard/Site 2009

Situado nas proximidades do Site 2007 é um local suspeito de contaminação, pertencente à lista de 14 locais prioritários de Schaller *et al.* (2005), com similar indefinição do espectro de contaminação. A situação hidrogeológica é similar à dos Sites 2005 e 2007.

9.2.4 Locais referidos como fontes históricas de contaminação ou potencialmente contaminados

9.2.4.1 Praia Dump/Site 5004

Situado na arriba litoral leste da Serra de Santiago, é indicado como local suspeito de contaminação do estudo DISCO (CH3M HILL, 2004a) citado por Schaller *et al.* (2005). Embora apresentando um enquadramento hidrogeológico semelhante ao dos demais locais situados na Serra de Santiago (cf. Site 3012, secção 9.2.3.7), a sua localização na arriba faz admitir que as áreas afectadas possam ser apenas, localmente, o aquífero de base e eventuais nascentes litorais e submarinas em ligação hidráulica com esta estrutura.

9.2.4.2 EOD Area/Site 5005

Situado também na arriba leste da Serra de Santiago é classificado como local suspeito de contaminação pelo mesmo estudo DISCO de CH3M HILL (2004a). Encontra-se num enquadramento hidrogeológico similar ao do Site 5004 e, numa primeira análise, com similar

capacidade para afectar eventuais nascentes litorais e submarinas, ou um pequeno sector do aquífero de base subjacente à localização desta estrutura.

9.2.4.3 Vila Nova Power Plant/Site 5006

Zona da central eléctrica, situada na zona de Vila Nova, na bordadura NW da área abrangida pelo modelo hidrogeológico de Schaller *et al.* (2005), em região muito permeável. Considerado como um local potencialmente contaminado, não existem contudo dados que permitam caracterizar esta contaminação, caso exista. Dada a sua localização tem potencial para poder contaminar as águas do aquífero de base.

9.2.4.4 Medium Port Command Maintenance Shop/Site 5010

Situado na zona do porto de Praia da Vitória, no extremo leste da baía, funciona como ponto de descarga dos cargueiros de combustível e é dada como potencialmente contaminada. Dada a localização desta estrutura não se considera que existam águas subterrâneas utilizáveis nesta área. Contudo, de acordo com Schaller *et al.* (2005) CH2M HILL (2004) considera aconselhável o estudo dos solos nesta zona e ao longo dos terrenos dos *pipelines* adjacentes para verificar da sua eventual contaminação. Esta região é sobrejacente à área de interface água doce-água salgada do aquífero de base e qualquer contaminação atingirá facilmente o meio subterrâneo. O modelo de fluxo desenvolvido por Schaller *et al.* (2005) sugere a existência de fluxos na envolvente deste local orientados para o oceano e também para leste, em direcção ao sector de Santiago.

9.2.4.5 Old Running Track/Site 5014

Situado fora da Base das Lajes, imediatamente a seguir à Porta de Armas/Main Gate, é local referido como suspeito de contaminação no trabalho de Schaller *et al.* (2005). A sua localização torna-o potencial receptor de alguma da contaminação da zona da Main Gate que possa ter extravasado para o exterior da Base. Tem um enquadramento hidrogeológico similar ao da Main Gate, com um aquífero suspenso muito próximo da superfície mas eventualmente descontínuo devido às diversas perturbações de terrenos realizadas durante as actividades de construção da área. Nestas condições é de admitir também um fluxo vertical significativo que poderá alcançar o aquífero de base.

9.2.4.6 Outros Locais

Existem ainda referenciados vários outros locais avaliados durante o estudo DISCO de CH2M HILL (2004a), sumariamente citados no trabalho de Schaller *et al.* (2005) como eventualmente contaminados, mas dos quais, na bibliografia disponível, não existe informação. A localização de alguns destes locais encontra-se na Fig. 55.

10. Modelação numérica do escoamento de águas subterrâneas

10.1 Introdução

Esta secção compreende a modelação numérica da área de estudo tendo em vista auxiliar à compreensão dos processos hidrogeológicos e hidroquímicos e melhor prever a evolução na região.

O trabalho compreende (1) a formulação do modelo conceptual da área de estudo e (2) o desenvolvimento e análise de resultados dos modelos matemáticos.

O desenvolvimento dos modelos foi efectuado com recurso ao programa MODFLOW, inicialmente publicado por McDonald e Harbaugh (1998), que consiste num programa de modelação matemática em diferenças finitas de água subterrânea que funciona a três dimensões. Para uma melhor aplicação do programa MODFLOW utilizaram-se programas de interface MODFLOW, neste caso o programa Visual MODFLOW Premium versão 4.2 e o programa Groundwater Modeling System versão 6.5. Ambos os programas de interface correm a versão MODFLOW 2000.

10.2 Conceptualização

10.2.1 Considerações iniciais

Como visto anteriormente, com base nas características dos materiais litológicos, da sua disposição espacial, dos acidentes tectónicos e de outras descontinuidades, e de outra informação hidrogeológica desta região, admite-se a existência de três formações hidrogeológicas: 1) formação hidrogeológica superficial; 2) formação hidrogeológica intermédia e 3) aquífero de base (cf. secção 8.2.1).

Para fins de simplificação conceptual, e atendendo à informação disponível, considera-se a existência de dois sistemas principais (este procedimento encontra-se melhor explicado na secção 10.3.1): a) formações hidrogeológicas suspensas, de espessura variável, cujo topo corresponde à cota de terreno e a base ao sistema intermédio e b) o sistema aquífero basal.

Procedeu-se à separação das formações hidrogeológicas principais em dois modelos diferentes pelo facto do sistema aquífero basal ter uma camada não saturada entre este e as formações hidrogeológicas suspensas. Esta característica impede uma modelação conjunta dos dois sistemas.

Para as formações hidrogeológicas suspensas foi apenas modelada a formação hidrogeológica intermédia, que se encontra em níveis piezométricos inferiores aos registados no piezómetro FP6A (cf. secção 8.2.1 e Quadro 6). Verificou-se que, na zona do graben, existe uma camada mais superficial e descontínua formada por material argiloso com capacidade de retenção de água, constituindo um aquífero (a denominada formação hidrogeológica superficial). Esta camada, acima da formação hidrogeológica intermédia, não é considerada no modelo das formações hidrogeológicas suspensas.

10.2.2 Configuração dos modelos (base e topo)

Para a definição da estrutura do sistema basal considerou-se o nível piezométrico como o topo do sistema e assumiu-se que, no centro do Graben das Lajes, o aquífero basal tem uma espessura de 14 metros diminuindo esta no sentido do mar (numa fina lenticula) e aumentando para o interior da ilha.

O topo das formações hidrogeológicas suspensas corresponde à superfície do terreno (superfície topográfica), tendo sido definido através de um modelo digital terrestre (MDT).

A base das formações hidrogeológicas suspensas foi definida através das informações do relatório "Desenvolvimento de um inventário das águas subterrâneas dos Açores – Fase 3" (Novo *et al.*, 2001) e tendo em conta a informação descrita na secção 8.2.3, nomeadamente, a questão de se ter registado no furo FP3 o último nível suspenso aos 19 metros de profundidade. Dessa forma a base do aquífero resultou numa superfície variável, com uma cota máxima de 41 m e mínima de 35 m (cf. valores de interpolação da base na Fig. 66).

10.2.3 Recarga

Como vem detalhado na secção 8.4.3, o graben das Lajes é uma das áreas de **recarga** preferencial do aquífero de base da ilha Terceira.

Para efeitos da modelação das formações hidrogeológicas superficiais apresentada foram considerados os valores propostos pela equipa do LNEC no trabalho de Novo *et al.* (2001) que determinou recargas de **708 mm/ano** para a Serra de Santiago e graben das Lajes, o que equivale a volumes anuais de recarga de 4,5 hm³/ano para a Serra de Santiago e de 43,8 hm³/ano para o graben (recarga anual total = 48,3 hm³/ano para a totalidade destas duas regiões).

Para o aquífero basal desconhece-se o valor de recarga mas havendo drenância por parte dos aquíferos superficiais considera-se que o valor de recarga do aquífero basal poderá situar-se entre os 10 % e os 20 % da recarga dos aquíferos superficiais. Assim, o valor de recarga do aquífero basal situa-se entre ao 70,8 mm/ano e os 141,6 mm/ano, tendo em conta o valor de recarga obtida pelo modelo BALSEQ em Novo *et al.* (2001).

10.2.4 Condutividade hidráulica

Para o sistema aquífero basal considerou-se um valor de condutividade hidráulica constante para todo o meio de 750 m/dia (excepto na células correspondentes à falha de Santiago), de forma a obter uma melhor calibração do modelo com os valores de piezometria médios registados nos furos desenvolvidos para o Estudo.

Este valor está de acordo com a gama de valores de condutividade hidráulica dos materiais em profundidade constituintes dos Traquibasaltos dos Cinco Picos e com a média dos valores de condutividade hidráulica estimada, com base nos ensaios de bombagem nos furos desenvolvidos para o Estudo (cf. secção 8.4.2), dividindo os valores de transmissividade calculados em todos os furos (ver Quadro 10), exceptuando os furos FB6 e FB5 (que têm particularidades específicas que impedem a extrapolação regional dos respectivos valores) e o comprimentos dos respectivos ralos (ver Quadro 1). Para esta situação o valor médio de

condutividade hidráulica é de 737,7 m/dia. Se se utilizar, para cada furo, os valores de transmissividade obtidos a partir do primeiro escalão dos ensaios de bombagem (menor valor de caudal, que corresponde a uma menor perda de carga nos ralos) obtém-se o valor médio de condutividade hidráulica de 786,5 m/dia. Assim, considerou-se no modelo um valor intermédio de referência de 750 m/dia.

Não se consideraram os furos FB5 e FB6 porque estes apresentam as seguintes características que afectam o cálculo da transmissividade, em ambos os casos num contexto hidrogeológico diferente do restante aquífero: a) o furo FB5, de apenas 9,5 m de profundidade, encontra-se demasiado próximo da linha de costa e b) o furo FB6 não traduz o comportamento do aquífero basal, como comprovam as baixas condutividades eléctricas medidas durante o ensaio, eventualmente por interceptar a falha de Santiago. Esta falha constitui um acidente geológico de particular relevância dado o seu funcionamento como barreira hidráulica (cf. secção 8.4.4).

No caso das formações hidrogeológicas suspensas, por indisponibilidade de ensaios de bombagem, começou por se considerar as características dos materiais geológicos que as constituem, que foram reajustadas para a calibração do modelo. Finalmente consideraram-se dois valores de condutividade hidráulica respectivamente para a Formação Ignimbrítica das Lajes ($K_H=50$ m/d) e a Formação Traquibasáltica dos Cincos Picos ($K_H=80$ m/d).

10.3 Modelo matemático

10.3.1 Considerações gerais

A área em estudo apresenta um sistema aquífero basal e várias pequenas formações hidrogeológicas suspensas, existindo, dessa forma, uma zona não saturada entre as formações suspensas e o aquífero basal. Esta característica cria algumas dificuldades de modelação visto que os programas não permitem a inserção de zonas não saturadas entre camadas saturadas.

A resolução deste problema poderia ter sido feita tendo em conta duas hipóteses:

- a) Considerar um só modelo com três camadas em que a camada intermédia teria uma condutividade hidráulica muito inferior às camadas adjacentes. Para este caso a condutividade hidráulica vertical teria de ser inferior à horizontal de forma a simular uma camada isolante entre os aquíferos suspensos e o aquífero basal;
- b) Considerar dois modelos separados, com uma ou duas camadas, em que cada modelo corresponderia ao conjunto de formações hidrogeológicas suspensas e ao aquífero basal, respectivamente.

O problema da primeira solução é que se está a considerar um aquífero fictício (regendo-se pela Lei de Darcy) e que vai contra a realidade do caso em estudo, pois tem-se uma zona não saturada na camada intermédia.

A segunda hipótese apresenta como dificuldade a necessidade de se calcular o valor de recarga do aquífero basal dado pela drenância da zona não saturada entre as formações hidrogeológicas suspensas e o sistema aquífero basal (este valor é mais complexo de ser calculado que a recarga).

A hipótese de modelos em separado é, no entanto, a hipótese mais real e, logo, a considerada para o caso de estudo.

10.3.2 Formações hidrogeológicas suspensas

10.3.2.1 Limite do modelo matemático

Os limites considerados para o modelo do sistema basal foram os limites à escala regional. Para o modelo dos sistemas aquíferos suspensos considerou-se uma escala local delimitada pelas falhas do graben *i.e.* falha das Fontinhas e da Serra de Santiago, devido à sua potencial característica impermeável (cf. Novo *et al.*, 2010), e o limite das formações hidrogeológicas superficiais (Lajes I) obtido por interpolação.

Este limite foi, posteriormente, tido em conta por Oliveira *et al.* (2010), diminuído para uma menor área de forma a não considerar o troço das Fontinhas (cf. Novo *et al.*, 2010) e a criar um enfoque sobre a zona de estudo.

Desta forma, os limites considerados em Oliveira *et al.* (2010) para o modelo do sistema aquífero suspenso são os apresentados na Fig. 65, com uma área de 13,23 km².

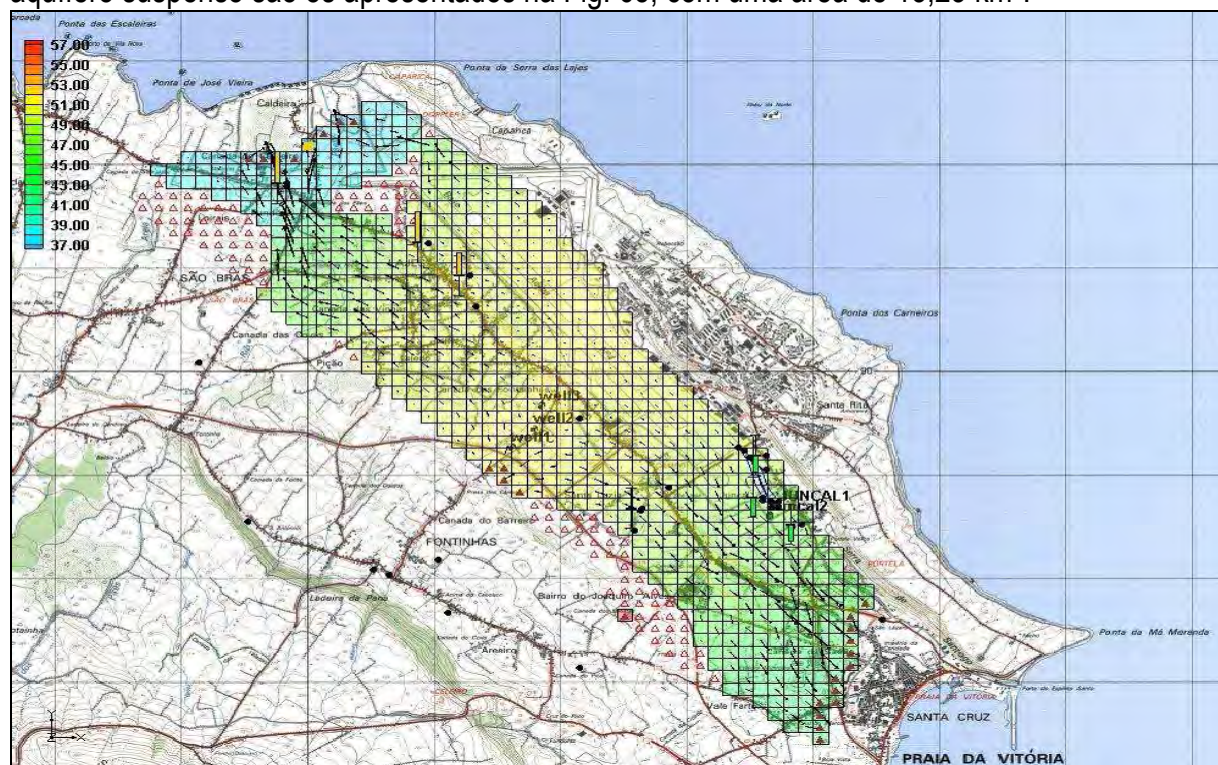


Fig. 65 – Modelo do sistema aquífero suspenso proposto por Oliveira *et al.* (2010)

Embora, em traços gerais, os limites do modelo matemático não tenham sido alterados, optou-se por delimitar o modelo numa zona central junto de Canada das Fontinhas, que corresponde ao local de variação do sentido de fluxo subterrâneo: para noroeste a circulação faz-se S-N e para sudeste o fluxo toma o sentido N-S (cf. figura anterior).

Já a sul foi definida uma nova fronteira, com base nas colunas litológicas obtidas a partir da realização dos furos do Estudo. Este novo limite, a sul, corresponde ao limite geológico do

Descarga – Considerou-se que a zona SE dos sistemas aquíferos é uma zona de saída de água. A aplicação das descargas foi possível através da atribuição de um nível piezométrico constante com o valor de 30 metros de cota;

Condutividade hidráulica – Consideraram-se valores elevados de condutividade para as duas primeiras camadas para não se considerar a formação hidrogeológica suspensa que surge em alguns locais e que funciona como “aquitardo”. Considerou-se condutividade igual para as camadas 3 e 4, e variável conforme se encontrem na Formação Ignimbrítica das Lajes ($K_H=50$ m/d) ou na Formação Traquibasáltica dos Cincos Picos ($K_H=80$ m/d);

Fluxo de entrada de água pela fronteira do modelo – O limite NW corresponde a uma zona de mudança da direcção de fluxo, tendo sido modelada com um caudal de entrada nulo.

Barreira de fluxo horizontal – Considerou-se que as falhas constituem uma barreira à passagem do fluxo. No modelo, o parâmetro que caracteriza esta resistência, designado por característica hidráulica (relação entre a condutividade hidráulica perpendicular à falha e a espessura da falha), assumiu o valor $0,1 \text{ d}^{-1}$.

10.3.2.3 Resultados

O modelo MODFLOW correu em regime estacionário tendo sido calibrado com os valores médios de piezometria dos poços CR18 e CR20 e os furos FP3A e FP6A, disponíveis nos Quadro 6 e Quadro 7.

A Fig. 67 representa, após a corrida do modelo, a distribuição espacial da piezometria, os vectores de fluxo de água subterrânea e a relação entre os valores calibrados e os valores observados em cada ponto.

Uma primeira análise sobre a piezometria modelada permite verificar que existe uma tendência de valores piezométricos mais elevados na zona oeste do modelo com uma diminuição para sudeste, sendo a direcção inicial do fluxo subterrâneo para norte, mudando de direcção no sentido SE. Tal situação já se tinha verificado no modelo proposto por Oliveira *et al.* (2010).

A Fig. 68 representa um gráfico de calibração que permite analisar a relação entre os valores piezométricos calculados e os valores observados em cada ponto de calibração.

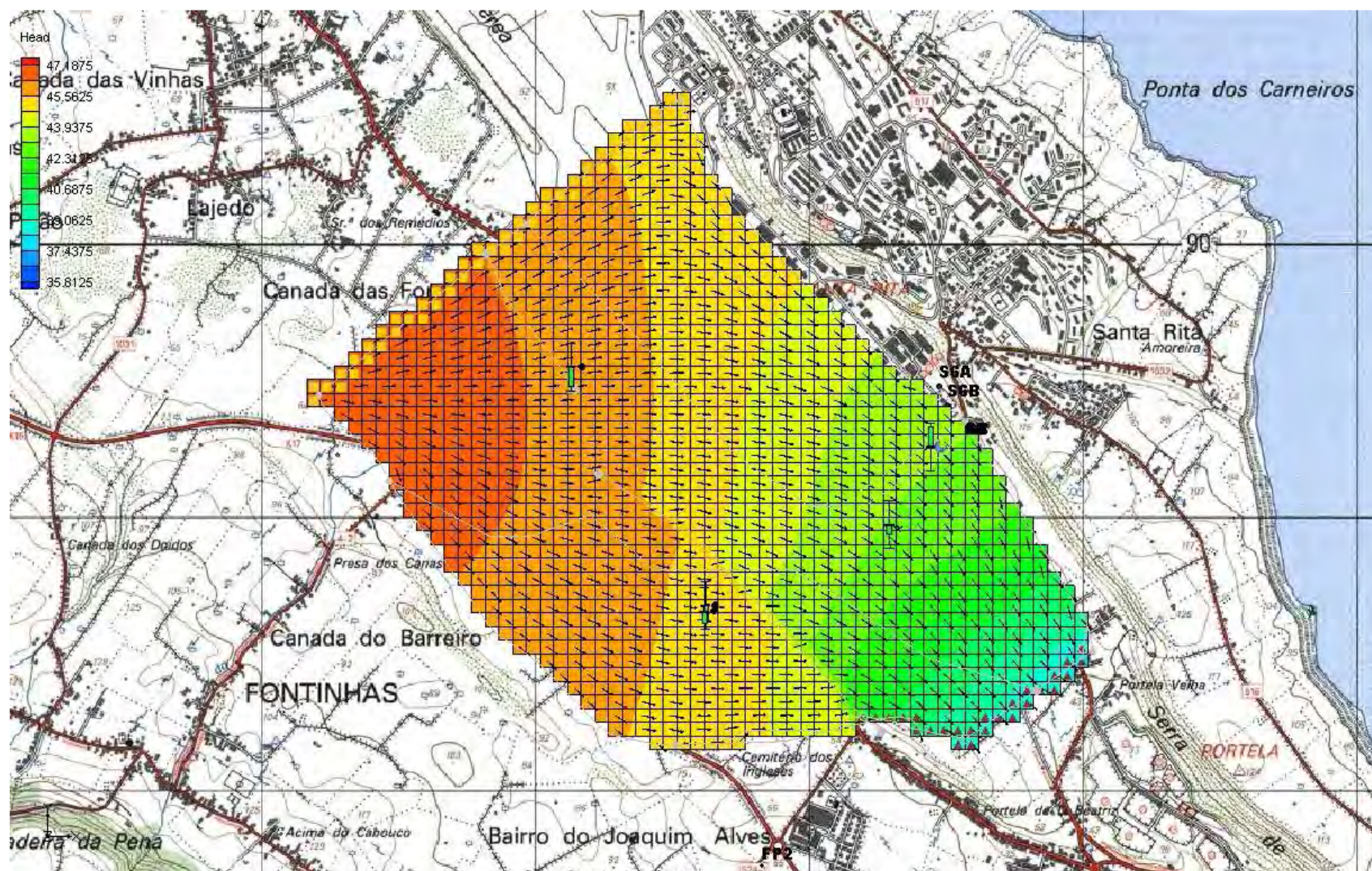


Fig. 67 – Nível piezométrico após corrida do modelo e setas de fluxo (sistemas aquíferos suspensos)

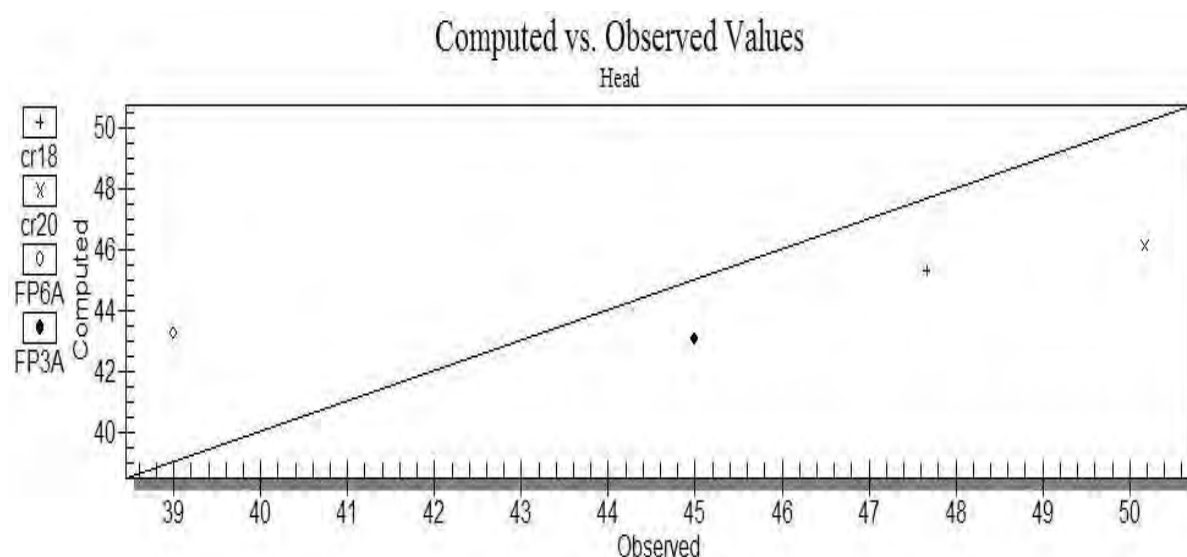


Fig. 68 – Relação entre os valores observados e os valores calculados pelo modelo (sistemas aquíferos suspensos)

Em termos de valores estatísticos de erro verificou-se que o erro médio foi de -1,58 m, a média dos erros absolutos foi de 3,26 m e a raiz quadrada da média dos quadrados dos erros foi de 3,37 m. Estes valores são melhores que os registados pelo modelo de Oliveira *et al.* (2010), que foram de 1,25 m, 4,96 m e 5,49 m, respectivamente.

Foi igualmente desenvolvida uma análise sobre o movimento das partículas no sistema aquífero. Essa análise foi possível pela utilização do programa MODPATH que funciona em conjunto com o programa MODFLOW dentro de qualquer interface MODFLOW. Esta análise permite verificar qual o trajecto percorrido por uma determinada partícula desde a célula-alvo até ao ponto de entrada da partícula no modelo, assim como o tempo percorrido neste trajecto. O processo inverso é também possível de ser analisado, ou seja, considera-se uma partícula na célula-alvo e analisa-se o seu trajecto ao longo do fluxo para jusante desta célula-alvo até a partícula sair do modelo. Um dado de entrada para o MODPATH é a porosidade total que, para este caso, foi colocada no valor por omissão, ou seja, 30 %.

As Fig. 69 e Fig. 70 representam a corrida do programa MODPATH para o trajecto de uma partícula que acabe o seu percurso numa célula junto ao Juncal e na base do modelo.

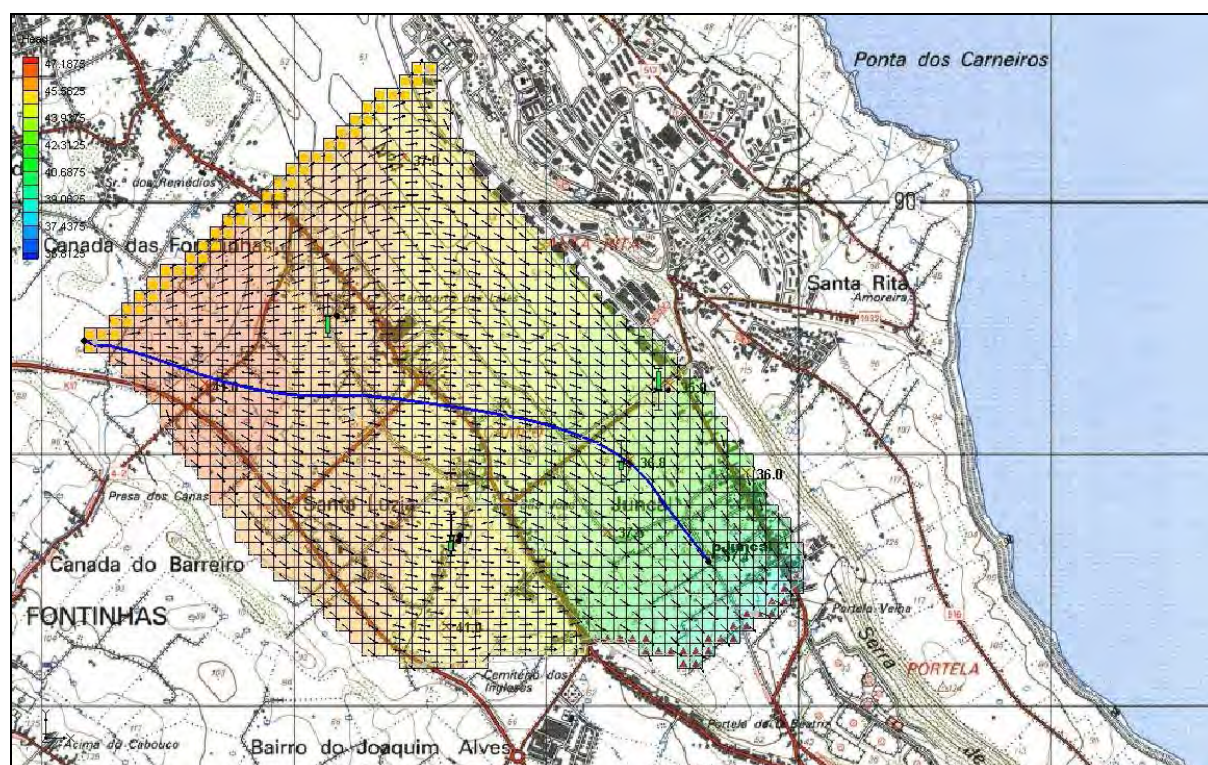


Fig. 69 – Corrida do programa MODPATH para o trajecto de uma partícula que termina o seu percurso no Juncal (nas formações hidrogeológicas suspensas)

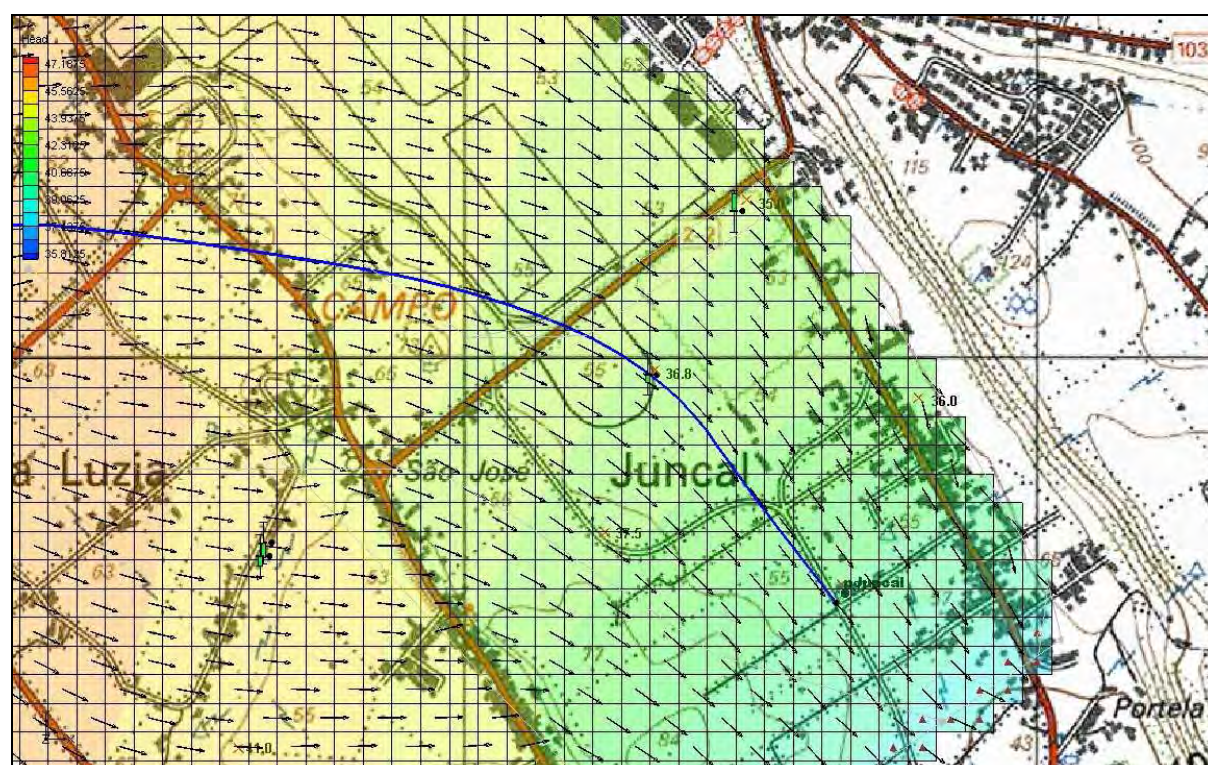


Fig. 70 – Pormenor da Corrida do programa MODPATH para o trajecto de uma partícula que termina o seu percurso no Juncal (nas formações hidrogeológicas suspensas)

10.3.3 Sistema aquífero basal

10.3.3.1 Limite do modelo matemático

A delimitação das fronteiras do modelo à escala regional é mais complexa e tem em conta a contribuição de água da zona exterior ao graben para a água subterrânea deste. Assim, utilizaram-se as cumeadas das montanhas, definindo dessa forma o limite das bacias hidrográficas das principais ribeiras. O limite regional considerado teve em conta o limite das bacias hidrográficas da ribeira de Santa Catarina, da ribeira dos Pães, da ribeira das Pedras e da ribeira de São Joãoes que aflui para a ribeira das Pedras e teve, ainda, em conta a cumuada da Serra do Cume. A Fig. 71 representa o limite regional considerado para a modelação e as ribeiras referidas em cima.



Fig. 71 – Limites gerais do modelo à escala regional

Por vezes os limites delineados para o modelo não seguiram as cumeadas devido a factores associados ao escoamento subterrâneo da água. Os locais onde se consideraram excepções foram os seguintes:

- A sul-sudeste do centro do graben, entre o monte Capitão, o Recanto e Lajedo (cf. Fig. 72), onde o limite do modelo não acompanhou o limite da bacia hidrográfica da ribeira de Santa Catarina, porque se fosse utilizado o limite da bacia estar-se-ia a entrar nas formações basálticas de Fonte de Bastardo, que não têm contribuição de água subterrânea para o graben;

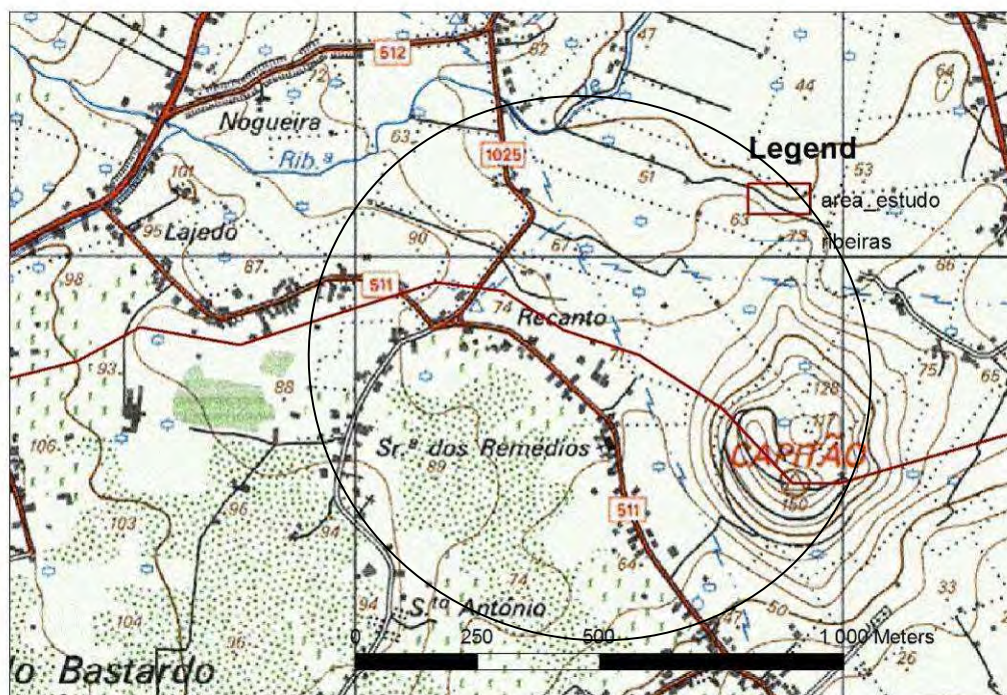


Fig. 72 – Vista em pormenor do limite na zona do Monte Capitão

- Na zona sul-sudoeste do limite, junto ao Pico da Cruz (cf. Fig. 73), onde houve uma necessidade de se contornar esse pico de forma a não se incluir, no modelo, a Formação Traquítica de Guilherme Moniz;
- Na zona sudoeste do limite, junto à confluência entre a ribeira do Cabrito com a ribeira da Areia (cf. Fig. 73), onde houve necessidade de atravessar estas duas ribeiras e seguir o limite da Formação de Brecha dos Biscoitos, visto que esta formação pouco contribui, em termos hidrogeológicos, para a zona em estudo;

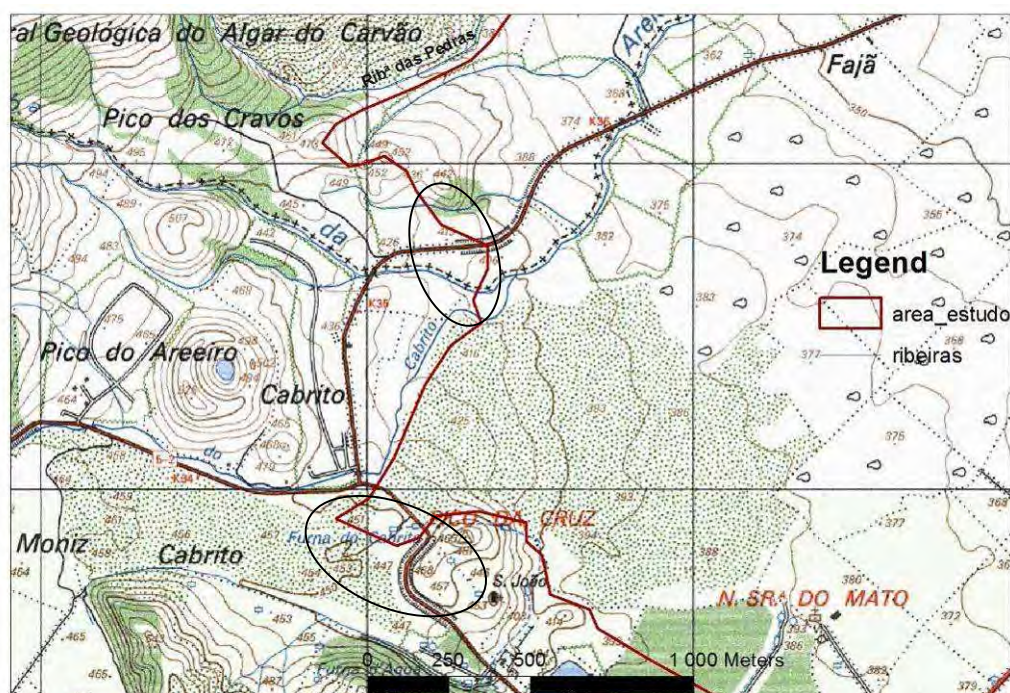


Fig. 73 – Vista em pormenor do limite na zona do Pico da Cruz

- Na Serra do Cume junto a uma falha decidiu-se considerar como limite a falha registada e não a cumeada da referida serra (cf. Fig. 74).

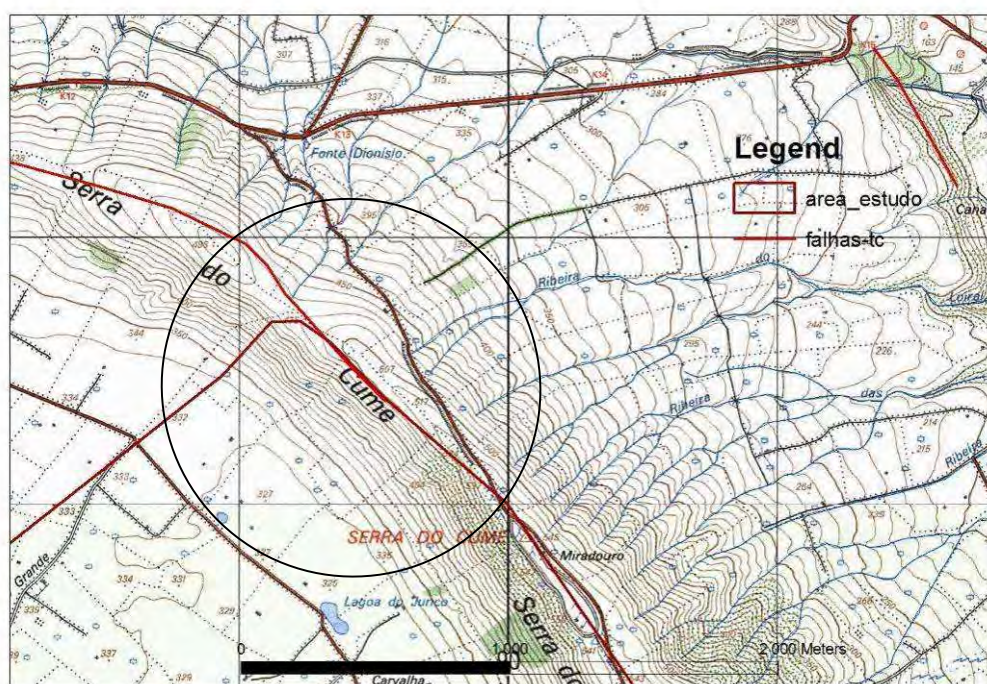


Fig. 74 – Vista em pormenor do limite na Serra do Cume

Na Fig. 71 é considerado um limite de um quilómetro de distância da costa da ilha visto que existem, como descargas do aquífero basal, algumas nascentes submarinas. No entanto, devido à influência das marés, não se consideram essas descargas e, como tal, o limite utilizado no modelo corresponde à costa da ilha Terceira.

Em termos de área de cada célula considerou-se uma malha aproximada de 250 metros por 250 metros, que foi refinada numa malha mais fina de 125 metros por 125 metros no graben das Lajes. A malha do modelo começa nas coordenadas X= 483 000, Y= 4 281 000, e termina nas coordenadas X= 498 000, Y= 4 295 000. O modelo apresenta uma só camada dividida em 89 linhas e 82 colunas.

A Fig. 75 representa o modelo com os vários objectos necessários à sua corrida (e.g. as linhas vermelhas representam as falhas) e após a atribuição de inactividade às células do modelo que estão fora do limite acima descrito.

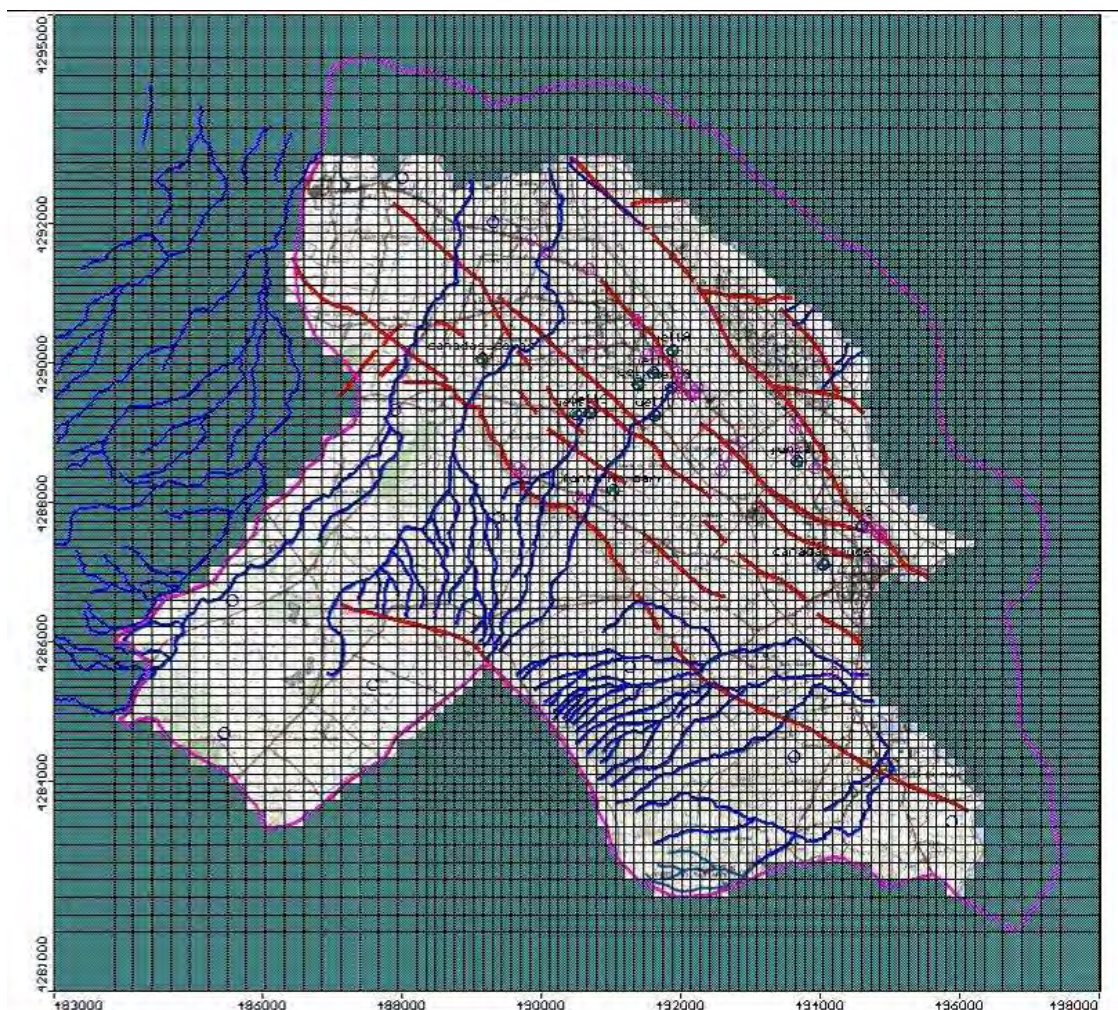


Fig. 75 – Malha MODFLOW do modelo do sistema aquífero basal

10.3.3.2 Dados de entrada

Consideraram-se os seguintes dados de entrada do modelo MODFLOW:

- a) Recarga – Após corrida e calibração do modelo dos sistemas aquíferos suspensos atribuiu-se à drenância (*i.e.* saída de água pela base dos aquíferos suspensos) o valor de 15 % da recarga natural, ou seja, o valor de 106,2 mm/ano. Considerou-se que este valor corresponde à recarga natural do sistema aquífero basal;
- b) Descarga – Atendendo ao referido na secção da conceptualização do modelo,

o sistema aquífero basal apresenta descargas para o oceano e, como tal, estas foram consideradas na zona litoral (o nível piezométrico do basal é influenciado pelas marés oceânicas, ver secção 8.4.4). A aplicação das descargas foi possível através da atribuição de um nível piezométrico constante com o valor de zero metros;

- c) Condutividade hidráulica – Considerou-se um valor constante de 750 m/dia para todo o modelo;
- d) Limites impermeáveis – Considerou-se que a falha de Santiago é um acidente geológico de baixa permeabilidade e, logo, de impedimento à passagem do fluxo. Considerou-se um valor de condutividade hidráulica muito baixo na falha.

10.3.3.3 Resultados

O modelo correu em regime estacionário tendo sido calibrado com os valores de piezometria médios registados durante as campanhas (ver Quadro 6). Para este modelo utilizaram-se valores de piezometria de alguns furos profundos da região desenvolvidos no âmbito do Estudo, nomeadamente, os valores médios dos piezómetros FP1, FP2, FP3, FP4, FP5, FP6 e FP7.

A Fig. 76 representa, após a corrida do modelo, a distribuição espacial da piezometria e os vectores do fluxo da água subterrânea.

O modelo proposto por Oliveira *et al.* (2010) apresentava um fluxo essencialmente radial no sentido do centro da ilha para o litoral, comum numa ilha oceânica. No modelo da Fig. 76 o fluxo deixa de ser totalmente radial para se concentrar essencialmente nas direcções W-E e S-N, em resultado da influência imposta pela falha que se comporta como uma barreira pouco permeável à água.

Numa comparação entre os níveis calculados pelos modelos (proposto por Oliveira *et al.* (2010) e para o modelo final) e o nível médio observado nos diferentes piezómetros, conclui-se que o actual modelo se ajusta melhor à realidade (Quadro 15).

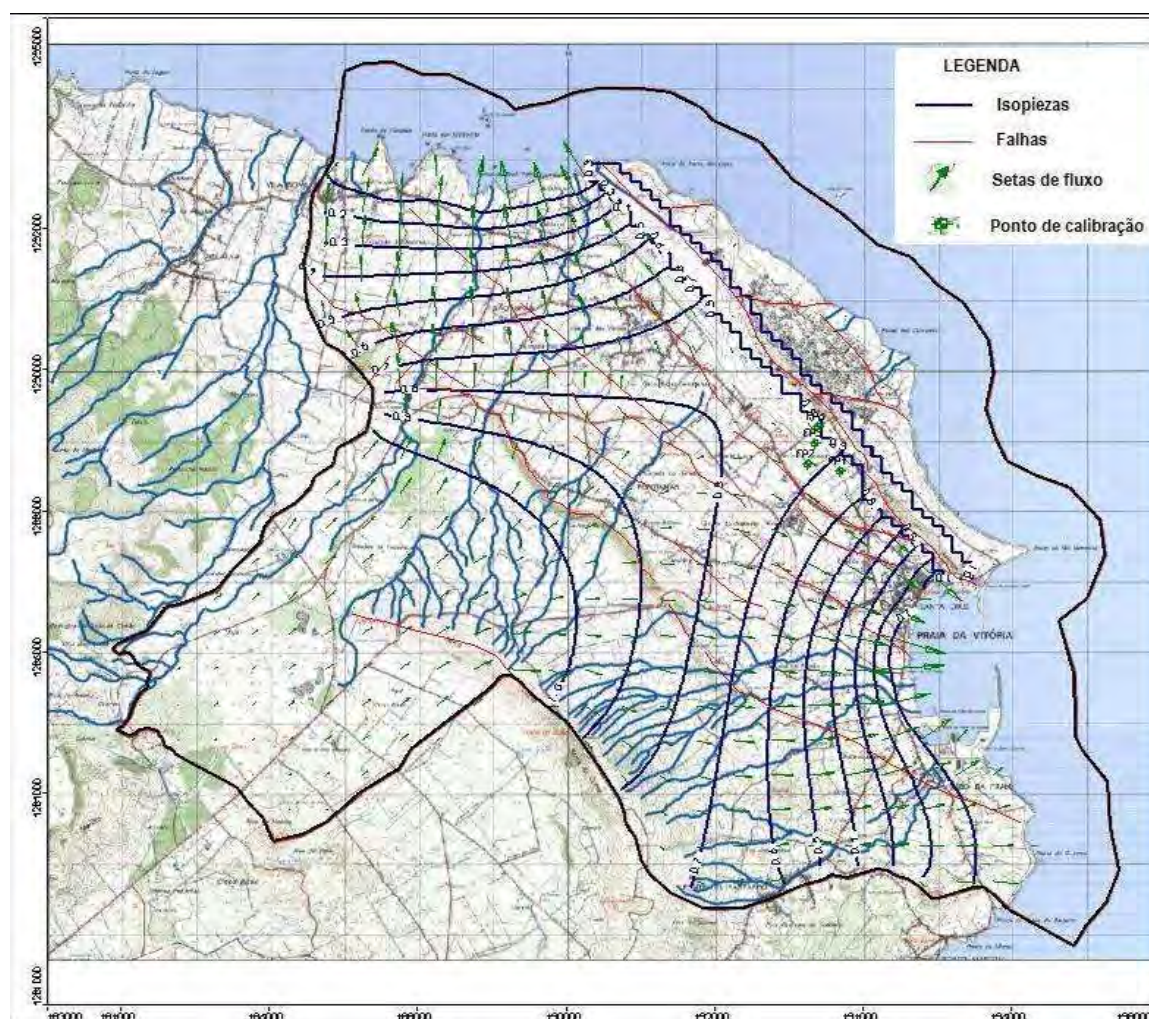


Fig. 76 - Distribuição espacial da piezometria e dos vectores de fluxo da água subterrânea no sistema basal

Quadro 15 – Comparação da média absoluta entre os valores calculados nos diferentes modelos

Furo	Nível médio observado (m)	Nível calculado no modelo proposto por Oliveira et al. (2010) (m)	Diferenças absolutas pelo modelo proposto por Oliveira et al. (2010) (m)	Nível calculado pelo modelo final (m)	Diferenças absolutas pelo modelo final (m)
FP3	0,69	0,42	0,27	0,73	0,04
FP6	0,76	0,32	0,44	0,75	0,01
FP7	0,82	0,45	0,37	0,71	0,11
FP4	0,46	0,35	0,11	0,67	0,21
MÉDIA ABSOLUTA			0,30		0,09

A Fig. 77 representa o gráfico de calibração obtido para o modelo final e tendo em conta os pontos de calibração propostos.

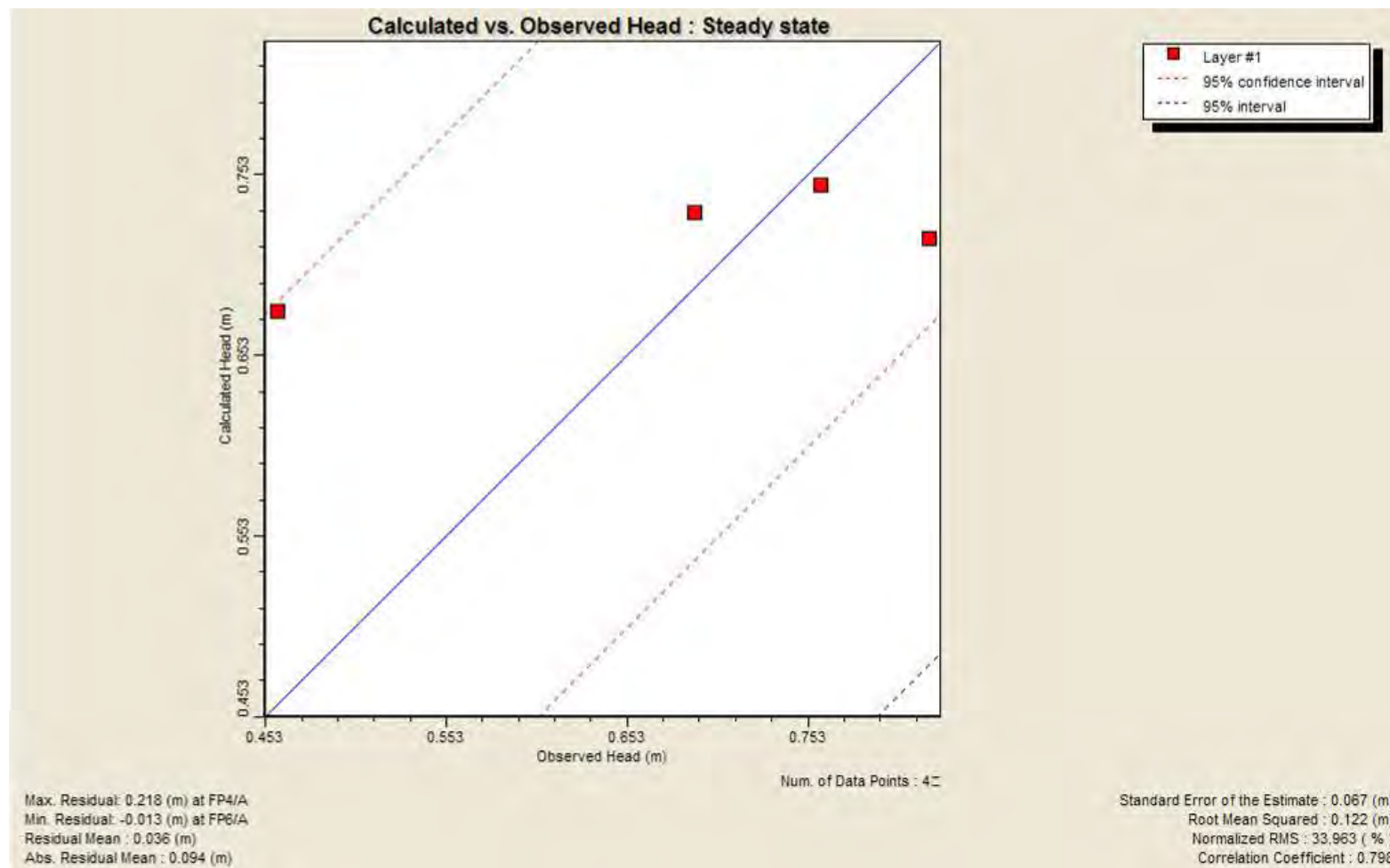


Fig. 77 - Gráfico de calibração do modelo basal

11. Vulnerabilidade dos Aquíferos à Poluição

11.1 Metodologia dos critérios geológicos e estruturais

Os aquíferos da região em estudo, de acordo com Novo *et al.* (2001), apresentam uma vulnerabilidade à poluição Alta e Muito Alta. A metodologia utilizada baseia-se na relação litologia/vulnerabilidade conforme ao método EPPNA (1998) utilizado nos Planos de Bacia Hidrográfica mas fazendo depender a avaliação da vulnerabilidade da litologia e de informação de ordem geomorfológico-estrutural (ex.: existência de zonas de caldeira). Basicamente este método faz atribuir a cada formação hidrogeológica uma classe de vulnerabilidade em função de:

- ◇ **Tipo de rochas:** sedimentares, lavas, piroclastos;
- ◇ **Grau de fracturação;**
- ◇ **Grau e tipo de preenchimento das fracturas;**
- ◇ **Grau de alteração¹¹:** condiciona a permeabilidade das formações; um maior grau de alteração tenderá a gerar uma menor permeabilidade das formações lávicas, essencialmente pela colmatação de fracturas, cavidades e zonas de brecha; o grau de alteração nos piroclastos relaciona-se de forma mais complexa com a permeabilidade, dependendo da idade, grau de consolidação e granulometria dos depósitos originais.
- ◇ **Estrutura interna das lavas** (existência e volume de tubos de lava, existência e volume de zonas de brecha face ao total da escoada, etc.),
- ◇ **Aspectos geomorfológico-estruturais:** como a existência de caldeiras e de zonas de ausência de rede de drenagem, que são consideradas áreas muito favoráveis à infiltração, sendo portanto zonas vulneráveis.

Neste **Método de Vulnerabilidade à Poluição por Critérios Geológicos e Estruturais** foram definidas cinco classes de vulnerabilidade: (1) Baixa, (2) Média, (3) Média-Alta, (4) Alta, (5) Muito Alta. No Quadro 16 apresenta-se a parametrização destas classes.

A classe “Baixa” aplica-se a zonas muito alteradas e que possuem permeabilidade muito baixa. A classe “Muito Alta” aplica-se a lavas recentes, pouco alteradas e com grande percentagem de tubos de lava e cavidades interconectadas, o que confere a estes materiais uma permeabilidade muito elevada e uma capacidade de depuração muito reduzida. As restantes classes estabelecem a gradação entre estes dois extremos. Na Fig. 78 apresenta-se o zonamento da vulnerabilidade à poluição dos aquíferos para a ilha Terceira, obtido pela aplicação desta metodologia.

¹¹ Este aspecto tem uma significativa dependência da idade da formação.

Quadro 16 – Classes de Vulnerabilidade à Poluição por Critérios Geológicos e Estruturais

Classe de Vulnerabilidade	Litologias das unidades produtivas		
	Lavas	Piroclastos	Sedimentos
Muito Alta	Com tubos lava e/ou abundantes cavidades interconectadas	--	--
Alta	Muito fracturadas e pouco alteradas; regiões de caldeira vulcânica, grande espessura de zonas de brecha pouco preenchidas	Não alterados, bem calibrados, não consolidados (*), de granulometria grosseira, muito fracturados; regiões de caldeira vulcânica	Cascalheiras; Depósitos de areias de praia, não consolidadas; Depósitos de vertente e de fajã
Média-Alta	Muito fracturadas, medianamente alteradas, espessura significativa de zona de brechas	Fracamente alterados, medianamente calibrados, granulometria média	--
Média	Medianamente fracturadas, medianamente alteradas, espessura moderada de zona de brechas	Medianamente alterados, medianamente calibrados, granulometria média a fina	--
Baixa	Muito alteradas ou muito compactas (baixa fracturação e reduzida espessura ou ausência de zonas de brecha)	Muito alterados, consolidados (*), mal calibrados	Rochas carbonatadas

*o grau de consolidação refere-se essencialmente ao grau de soldagem e/ou compactação dos materiais.

Segundo esta metodologia a região do graben das Lajes apresenta vulnerabilidade Muito Alta e Alta, com uma pequena área de vulnerabilidade Média a Alta (ex.: bordo da Serra do Cume) distribuída do seguinte modo (Novo *et al.*, 2001):

- ◇ **Serra de Santiago** – vulnerabilidade Alta devido à presença de (1) lavas com uma elevada fracturação, apesar de nalguns casos com preenchimento, (2) piroclastos bem calibrados mais ou menos alterados e muito fracturados, (3) não existe rede de drenagem desenvolvida e estruturada, indiciando infiltração muito elevada.
- ◇ **Gaben das Lajes** – vulnerabilidade Alta pois (1) não tem rede de drenagem desenvolvida ou estruturada, (2) a rede de drenagem que desce das vertentes da Serra do Cume desaparece quase integralmente ao chegar ao graben, indiciando muito elevada infiltração, (3) os níveis produtivos desenvolvem-se em unidades piroclásticas e lávicas muito fracturadas e pouco a muito pouco alteradas, (4) as formações hidrogeológicas suspensas são muito pouco espessas e muito superficiais (a sua base situa-se a 15 m, ou pouco mais, de profundidade), (5) de acordo com Menezes (1993) a condutividade hidráulica das formações piroclásticas é moderada, (6) a zona é atravessada por um numeroso conjunto de acidentes tectónicos que poderão ser potenciais condutas hidráulicas para os aquíferos mais profundos. No graben das Lajes podem definir-se ainda dois sectores:
 - **Litoral de Praia da Vitória** – vulnerabilidade Alta dado que (1) é constituído por areias bem calibradas e não consolidadas, (2) tem permeabilidades elevadas a muito elevadas, (3) o nível freático é muito superficial.
 - **Caldeira das Lajes** – vulnerabilidade Muito Alta, pois (1) é uma zona de infiltração directa (e com pouca espessura de percolação) para o aquífero de base, (2) o nível freático é bastante superficial.
- ◇ **Vila Nova/São Brás** – vulnerabilidade Média-Alta dado que (1) existe algum

desenvolvimento da rede de drenagem, indiciando infiltração significativa mas potencialmente inferior à das regiões acima referidas, (2) os níveis piroclásticos são medianamente a relativamente pouco alterados.

- ◇ **Serra do Cume** – vulnerabilidade Média-Alta devido a (1) níveis produtivos em traquibasaltos medianamente alterados e significativamente fracturados, (2) os níveis aquíferos tendem a ser superficiais, (3) há uma densa rede de drenagem bem desenvolvida que, associada ao relevo vigoroso, indicia uma infiltração moderada a baixa.

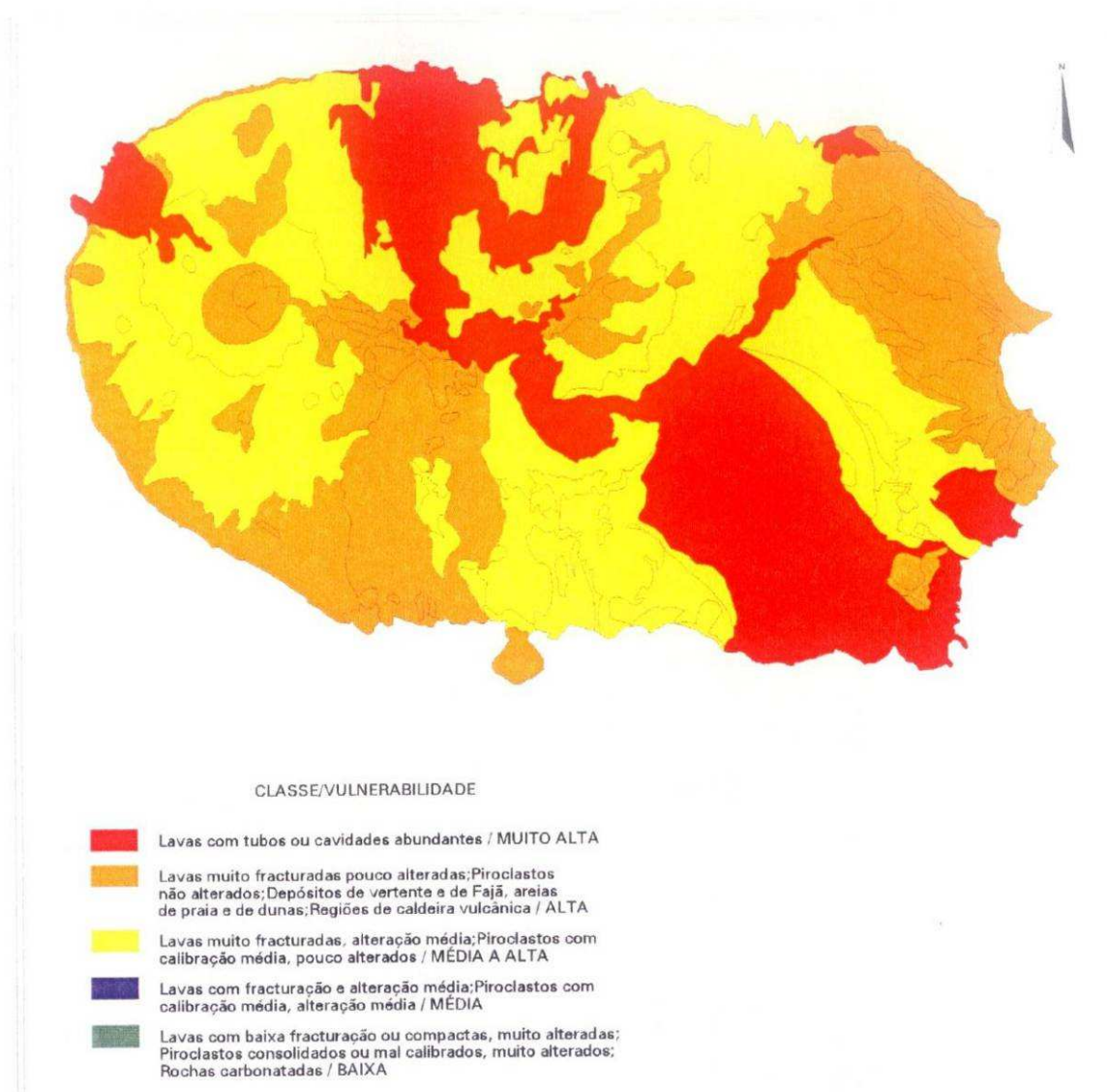


Fig. 78 – Vulnerabilidade dos aquíferos da ilha Terceira à poluição segundo a metodologia dos critérios geológicos e estruturais

Fonte: Novo *et al.* (2001)

A análise a uma escala mais detalhada, utilizando esta mesma metodologia de vulnerabilidade, leva ao seguinte zonamento de vulnerabilidade:

- ◇ **Traquibasaltos dos Cinco Picos** – Rodrigues (1993) descreve esta formação como uma sucessão de escoadas lávicas, essencialmente de tipo “aa”, por vezes muito vacuolares, a que se associam alguns níveis piroclásticos sem depósitos pomíticos. O mesmo autor refere que a maioria das lavas possui níveis escoriáceos de base pouco alterados, compreendendo cerca de 10% da espessura total da escoada¹², e nas escoadas mais espessas a parte central é muito fracturada verticalmente, com espaçamento entre fracturas entre 0,2 a 1 m junto de falhas, e entre 1 a 3 m nas restantes regiões; estas fracturas podem estar preenchidas por argilas se sobrejacentemente existirem paleossolos. Note-se que estes paleossolos, nas zonas de falha importantes, estão por vezes muito fracturados (Rodrigues, 2003). Considerando ainda que são muito permeáveis (Schaller *et al.*, 2005), estes materiais têm vulnerabilidade ALTA.
- ◇ **Ignimbritos Inferiores** – Rodrigues (1993) descreve esta formação como um conjunto de escoadas de pomitos, cinzas, blocos e elementos líticos, em regra muito alteradas e pouco consolidadas (representados na zona de São Brás sobretudo por ignimbritos pomíticos muito vesiculares). O grau de soldadura e consolidação das partículas é muito variável até mesmo dentro da mesma escoada e apesar das partes consolidadas estarem muito fracturadas, a maior parte das fracturas está preenchida por materiais de alteração (Lloyd e Collis, 1981). São materiais grosseiros e pouco consolidados, se bem que alterados pelo que se admite que esta formação tenha vulnerabilidade MÉDIA-ALTA.
- ◇ **Ignimbritos das Lajes** – Rodrigues (1993) refere que estes depósitos exibem uma variação vertical no grau de soldadura dos clastos e granulometria inter e intra-escoada. Na base da escoada os clastos tendem a ser maiores e melhor soldados – Schaller *et al.* (2005) referem que a soldagem na base é em regra muito forte – mas o grau de soldagem vai diminuindo para o topo, o mesmo se verificando com a granulometria; os topos das escoadas tendem a ter compactação moderada, com sinais de alteração nalguns casos (Rodrigues, 1993; Schaller *et al.*, 2005). Ocorre também variação lateral do tamanho dos clastos na escoada, com os clastos maiores – por vezes de grande dimensão – na sua zona central, correspondente aos centros de emissão, e ao longo de estreitas faixas centrais da escoada (Lloyd e Collis, 1981). O grau de fracturação dos níveis mais compactos é muito variável e mais intenso nas proximidades de falhas; é também muito frequente nas zonas basais e centrais das escoadas (Schaller *et al.*, 2005); as fracturas são sobretudo verticais, com espaçamento de 0,25 m nas zonas afectadas por falhas e até 5 m nas restantes (Rodrigues, 1993). Considerando as litologias, grau de consolidação, densidade de fracturação e a sua alta permeabilidade considera-se que estes materiais possuam vulnerabilidade ALTA.
- ◇ **Basaltos Superiores** – são escoadas de lavas e tefritos, com largo predomínio das lavas face aos depósitos piroclásticos (tefritos); as lavas, basálticas, são na sua maior parte muito vacuolares e ocorrem em escoadas que em geral não excedem os 5 m de espessura e algumas, nas zonas de maior declive, têm importantes cavidades e

¹² E no caso de escoadas mais básicas surge também, com menor espessura, uma brecha de topo.

tubos de lava (Schaller *et al.*, 2005; Rodrigues, 1993). Na base das lavas há níveis escoriáceos pouco alterados e de pequena espessura (0,3 a 1 m); o interior das lavas tem uma densidade de fracturação muito elevada, com espaçamentos não superiores a 2,5 m, cujas aberturas variam entre alguns mm e 0,5 m e normalmente não têm qualquer preenchimento; a fracturação horizontal é muito menos importante, tendo as fracturas uma abertura pequena (Rodrigues, 1993). Devido à pequena alteração e compactação dos depósitos, os piroclastos tendem a ser friáveis, soltos, de granulometria algo grosseira e com elevada percentagem de vazios entre os clastos. Assim, considera-se que estes materiais têm vulnerabilidade MUITO ALTA (cf. Quadro 16).

- ◇ **Basaltos Superiores (escoadas do Algar do Carvão)** – basaltos muito recentes (2115 ± 115 anos; cf. Rodrigues, 1993), com frequentes tubos de lava, pelo têm vulnerabilidade MUITO ALTA (cf. Quadro 16).
- ◇ **Cascalheiras, dunas e areias de praia** – materiais de vulnerabilidade ALTA (cf. Quadro 16).

Refinando a metodologia anterior, usando os parâmetros geologia, profundidade ao nível de água e condutividade hidráulica (cf. Quadros 11 e 12), então o zonamento de vulnerabilidade para (1) o aquífero superior e (2) o aquífero de base será:

- ◇ **Formações hidrogeológicas suspensas** – admitida uma espessura saturada da ordem dos 10 m ou um pouco menos (excepto basaltos superiores) e transmissividades de $10 \text{ m}^2/\text{d}$ (Schaller *et al.*, 2005), a permeabilidade será de $1 \text{ m}/\text{d}$. Assim, em função das litologias aflorantes, tem-se:
 - **Traquibasaltos dos Cinco Picos** – vulnerabilidade alta para o parâmetro litologia (cf. Quadro 16), vulnerabilidade média para o parâmetro condutividade hidráulica (cf. Quadro 17) e vulnerabilidade alta para o parâmetro profundidade (cf. Quadro 18) pois a maioria dos poços que captam este aquífero têm níveis de água entre 10 m a 20 m de profundidade. Assim a vulnerabilidade global é ALTA.
 - **Ignimbritos inferiores** – vulnerabilidade média a alta da litologia (cf. Quadro 16) e vulnerabilidade média para a condutividade hidráulica (cf. Quadro 17). Não existem dados para a profundidade ao nível mas, considerando a espessura destes materiais (cerca de 20 m) e admitindo que também aqui a espessura saturada possa ser de 10 m ou um pouco menos, então a profundidade ao nível de água seria da ordem dos 10 m, pelo que a vulnerabilidade para este parâmetro é alta (cf. Quadro 18). A vulnerabilidade global é MÉDIA-ALTA.
 - **Ignimbritos das Lajes** – vulnerabilidade alta para a litologia (cf. Quadro 16) e média para a condutividade hidráulica (cf. Quadro 17). A maior parte dos poços tem profundidades ao nível de água de 10 m ou superiores, o que corresponde a uma vulnerabilidade alta (cf. secção 11.2); contudo na zona do Juncal e numa estreita faixa ao longo da falha de Santiago esta profundidade é inferior a 10 m e na época húmida chega a aflorar à

superfície do solo, o que equivale a uma vulnerabilidade muito alta (cf. Quadro 18). A vulnerabilidade global é assim:

- **Zona do Juncal** – vulnerabilidade MUITO ALTA.
- **Restante área de afloramento dos ignimbritos das Lajes** – vulnerabilidade ALTA.
- o **Basaltos superiores** – vulnerabilidade muito alta para a litologia (cf. Quadro 16) e condutividade hidráulica dado que as características litológicas de fracturação e porosidade indiciam serem materiais de condutividades muito elevadas (cf. Quadro 17). A espessura das escoadas é em geral igual ou inferior a 5 m pelo que, se se admitir a presença de níveis produtivos nestes materiais¹³, a profundidade ao nível de água cai na classe de vulnerabilidade muito alta (cf. Quadro 18). A vulnerabilidade global resultante é MUITO ALTA.
- o **Basaltos superiores (escoadas do Algar do Carvão)** – vulnerabilidade muito alta para o parâmetro litologia (cf. Quadro 16), condutividade hidráulica (cf. Quadro 17) e para a profundidade (cf. Quadro 18). Deste modo a vulnerabilidade global é MUITO ALTA.
- ◇ **Aquífero de base** – as sondagens dos furos de abastecimento indicam estarem as zonas de captação em basaltos fracturados e/ou escórias, consistentes com as formações traquibasálticas dos Cinco Picos (Praia Ambiente, 2009; Allen e Hoshall, 1990) pelo que neste aquífero se consideraram apenas as formações dos Traquibasaltos dos Cinco Picos e, no litoral, as areias de praia e os depósitos de cascalheiras de praia:
 - o **Zona Litoral** – as litologias são areias de praia, dunas, cascalheiras e as formações da base da Caldeira das Lajes; a profundidade varia entre 0 e 10 m, definindo a bordadura litoral N e S; a permeabilidade está compreendida entre os valores definidos para os traquibasaltos dos Cinco Picos (na caldeira das Lajes), 20-100 m/d para areias grosseiras e 100-1 000 m/d para cascalheiras. Assim, tem-se:
 - **Litoral Norte e Caldeira das Lajes** – vulnerabilidade alta da litologia (cf. Quadro 16), muito alta para a permeabilidade (cf. Quadro 17) e muito alta para a profundidade (cf. Quadro 18). A vulnerabilidade global é assim MUITO ALTA.
 - **Litoral Sul** – vulnerabilidade alta da litologia (cf. Quadro 16), alta para a permeabilidade (cf. Quadro 17) e muito alta para cotas inferiores a 10 m a profundidade (cf. Quadro 18), pelo que a vulnerabilidade global é ALTA-MUITO ALTA.
 - o **Zona Interior** – toda a zona tem cotas superiores a 10 m, portanto o nível piezométrico, admitindo que está aproximadamente ao nível do mar, ocorre a profundidades superiores a 10 m no graben e acima dos 70 m na

¹³ Note-se que só existe uma captação localizada sobre estas escoadas, o poço CR 23, com profundidade do nível de água aos 16,29 m (cf. Quadro 1), e se se considerar que as espessuras são iguais ou inferiores a 5 m, então este estará a captar nos ignimbritos das Lajes.

maior parte da serra de Santiago e zona das Fontinhas; a permeabilidade tem valores acima de 100 m/d (cf. Plano Regional da Água, DRAOTRH, 2001)¹⁴; os Traquibasaltos dos Cinco Picos constituem a litologia do aquífero. Assim a vulnerabilidade é:

- **Sector central do graben** – vulnerabilidade alta para a litologia (cf. Quadro 16), muito alta para a permeabilidade (cf. Quadro 17) e média para a profundidade (cf. Quadro 18). Vulnerabilidade global ALTA.
- **Sectores das Fontinhas e Serra de Santiago** – alta vulnerabilidade para a litologia (cf. Quadro 16), muito alta para a permeabilidade (cf. Quadro 17) e baixa para a profundidade (cf. Quadro 18). Vulnerabilidade MÉDIA-ALTA.

Quadro 17 – Classes de vulnerabilidade para o parâmetro condutividade hidráulica

Classe de Vulnerabilidade	Condutividade hidráulica (m/d)
Muito Alta	> 100
Alta	20 – 100
Média	1 – 20
Baixa	< 1

Quadro 18 – Classes de vulnerabilidade para o parâmetro profundidade ao nível de água

Classe de Vulnerabilidade	Profundidade ao Nível de Água (m)
Muito Alta	< 10 m
Alta	10 – 20
Média	20 – 70
Baixa	> 70

11.2 Metodologia DRASTIC

A aplicação da metodologia DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) (cf. Anexo I para descrição da metodologia) aos sistemas aquíferos superficial e de base resulta em:

- ◇ **Parâmetro D:** as profundidades nas formações hidrogeológicas suspensas e no aquífero basal) variam ao longo do ano, com as épocas húmidas a registar uma redução da profundidade. No aquífero de base a proximidade ao litoral é também outro factor determinante da profundidade; na zona litoral a cotas iguais ou inferiores a 10 m admitiu-se que apenas ocorre o aquífero de base, ou seja, as formações hidrogeológicas suspensas fundem-se progressivamente com o de base. A classificação deste parâmetro é assim:
 - **Formações hidrogeológicas suspensas** – atribuiu-se a classe de profundidade D = 9,1 a 15,2 m (índice D = 5) a quase toda a área pois a profundidade ao nível de água é em geral na ordem dos 10 a 15 m. Na *área do Juncal* o nível freático facilmente sobe acima da superfície topográfica, no Inverno, e durante a época seca tende a ser inferior a 9 m

¹⁴ Schaller *et al.* (2005) usaram no seu modelo matemático valores de 1 000 m/d.

- pelo que aqui se atribuiu a classe 1,5-4,6 m (índice D = 9), pois considera-se que este intervalo de valores poderá representar uma média entre as profundidades na época das chuvas e na época seca.
- o **Aquífero de base** – sendo que o nível piezométrico do aquífero de base se localizará, segundo modelos teóricos e dados de várias captações, a cotas próximas do nível do mar, tem-se o zonamento:
 - **Cotas topográficas acima dos 30 m** – classe D > 30,5 m (índice D = 1).
 - **Cotas topográficas entre 10 e 30 m** – embora neste intervalo de profundidades possam ser definidas 3 classes, optou-se por considerar apenas uma classe representativa de um valor médio (em função da área que cada uma das diferentes classes apresentaria) a qual foi a classe D = 15,2 a 22,9 m (índice D = 3).
 - **Cotas topográficas inferiores a 10 m** – corresponde à zona litoral e Caldeira das Lajes, sendo representada pela classe D = 4,6 a 9,1 m (índice D = 7) pois a área com cotas abaixo dos 4 m é muito reduzida.
 - ◇ **Parâmetro R:** Schaller *et al.* (2005) apontam valores de recarga de 272 mm para a totalidade da área do graben das Lajes e Serra de Santiago e Novo *et al.* (2001) atribuem valores gerais de 708 mm/ano. Assim:
 - o **Formações hidrogeológicas suspensas** – a classe será R > 254 mm (índice R = 9).
 - o **Aquífero de base** – admite-se que a recarga seja essencialmente a resultante da drenância dos aquíferos sobrejacentes, e significativa, dada a produtividade deste aquífero. Isto é apoiado pela ausência de rede de drenagem na vasta maioria da área, associada a uma fracturação intensa das formações (e em grande proporção sem preenchimentos isolantes significativos) e uma reduzida espessura das formações hidrogeológicas suspensas. Embora não se conheçam os valores desta transferência de água admitiu-se um valor da ordem dos 142 mm (índice R = 7) por este expressar alta transferência por drenância e ao mesmo tempo uma retenção significativa de água no sistema superficial.
 - ◇ **Parâmetro A:** nas formações hidrogeológicas suspensas consideram-se as várias formações aflorantes; no aquífero de base as zonas de emissão dos Basaltos Superiores são muito localizadas e de reduzida expressão em área pelo que apenas se consideraram os Traquibasaltos dos Cinco Picos¹⁵ e, nas zonas litorais, os depósitos de areias e calhaus, visto a bordadura litoral pertencer ao aquífero de base. Assim o zonamento deste parâmetro é:
 - o **Formações hidrogeológicas suspensas** – em função do tipo de materiais tem-se:
 - **Traquibasaltos dos Cinco Picos e Basaltos inferiores** – são essencialmente lavas, por vezes muito vacuolares, com brechas

¹⁵ As quais são o substrato da zona do graben e remanescente região leste da ilha.

de base e densidade apreciável de fracturação, pelo que se atribuiu a classe A = Basaltos, considerando-se um índice A = 9, pois é o valor mais comum atribuído a esta classe.

- ***Ignimbritos inferiores*** – materiais mais ou menos soltos, com granulometria entre as areias e balastros, por vezes mais grosseira, um pouco alterados e com algum teor de argila. Correspondem assim à classe A = Areia e balastro, e dado o grau de alteração, com índice A = 6.
 - ***Ignimbritos das Lajes*** – são materiais em geral soltos, com granulometria entre as areias e balastros, por vezes mais grosseira, e grau de alteração baixo a muito baixo. Assim atribuiu-se a esta formação a classe A = Areia e balastro, com o índice A = 8.
 - ***Basaltos superiores*** – são essencialmente lavas basálticas muito vacuolares e com frequência com cavidades e tubos de lava, sendo representados pela classe A = Basaltos, com o índice A = 10, devido aos muitos vacúolos destas lavas.
 - ***Areias de praia, Dunas e areias*** – são materiais soltos, bem calibrados, da granulometria das areias, pelo que se atribui a estas litologias a classe A = Areia e balastro, com o índice A = 9, devido à granulometria e grande calibração destes materiais.
 - ***Areias e argilas*** – são materiais soltos, finos, com um amplo intervalo granulométrico, pelo que se atribuiu a classe A = classe A = Areia e balastro, com o índice A = 6, devido à percentagem significativa de argilas e siltes.
- o ***Aquífero de base*** – os furos que captam neste aquífero tipicamente exploram lavas basálticas fracturadas ou, no caso do furo do Areeiro/Fontinhas, escórias; os poços de maré exploram as areias e cascalheiras litorais. O zonamento deste parâmetro é, portanto:
- ***Traquibasaltos dos Cinco Picos*** – dado o tipo de litologias atribuiu-se a esta formação a classe A = Basaltos, com um índice A = 8, pois as suas fracturas encontram-se muitas vezes preenchidas, e sofrem a compactação causada pelas formações sobrejacentes, entre outros aspectos que podem minorar a capacidade transmissiva destes materiais.
 - ***Areias de praia e depósitos de cascalheiras*** – estes materiais são representados pela classe A = Areia e balastro com índice A = 9 dado serem muito bem calibrados, com alta porosidade e reduzida proporção de finos.
 - ***Areias e argilas*** – representadas pela classe A = classe A = Areia e balastro, com o índice A = 6, pois são materiais soltos, finos, com um amplo intervalo granulométrico, em que ocorre uma percentagem significativa de argilas e siltes.

- ◇ **Parâmetro S:** na ausência de uma carta da textura dos solos, a classificação utilizada baseia-se nas observações de campo da vista de Maio de 2009 e nas características dos materiais das formações geológicas que constituem a rocha-mãe do substrato pedológico. Daqui resulta a seguinte classificação:
 - **Formações hidrogeológicas suspensas** – essencialmente andossolos, de textura algo grosseira e muito permeáveis, conforme as observações de campo. A sua classificação será, assim:
 - **Basaltos superiores** – materiais muito pouco alterados a inalterados, com cobertura de solos mínima a inexistente, a que se atribuiu a classe S = Fino ou ausente (índice S = 10).
 - **Dunas e areias de praia** – representados pela classe S = Areia (índice S = 9).
 - **Depósitos de cascalheiras** – representados pela classe S = Balastro (índice 10).
 - **Ignimbritos das Lajes** – considerando o material parental, em especial a sua granulometria, a sua baixa alteração e a sua alta permeabilidade (indicada pela ausência de linhas de água), admitiu-se que estes solos seriam representados pela classe S = Franco arenoso (índice S = 6).
 - **Areias e argilas** – solos francos, onde que apesar da componente argilosa se deve considerar um comportamento mais próximo do franco siltoso, dada a presença de areias, pelo que se atribuiu a classe S = Franco siltoso (índice S = 4).
 - **Restantes formações** – sendo também muito permeáveis mas tendo os materiais parentais maior alteração do que os dos ignimbritos das Lajes, admite-se que tenham maior teor de argila. A classe S = Franco (índice S = 5) será assim a mais representativa destes solos.
 - **Aquífero de base** – zonamento idêntico ao das formações hidrogeológicas suspensas porque o solo se refere à zona de alteração à superfície do terreno. Os paleossolos existentes em profundidade foram considerados como camadas confinantes, as quais se associam ao parâmetro I.
- ◇ **Parâmetro T:** este parâmetro foi obtido através da análise do modelo digital de terreno, construído a partir das cartas topográficas 1:25 000 da região, do Instituto Cartográfico do Exército. Assim:
 - **Formações hidrogeológicas suspensas** – segundo o zonamento de declives tem-se:
 - **Caldeira das Lajes e zonas litorais de praia** – a Caldeira das Lajes é uma zona de topografia suave, dominada por declives pertencentes às classes $T < 2\%$ (índice T = 10) e subsidiariamente por declives das classes T = 2 a 6% (índice T = 9) e T = 6 a 12% (índice T = 5). As zonas litorais de praia são dominadas por

declives pertencentes às classes $T = 2$ a 6% (índice $T = 9$), em especial no sector entre Ribeira de Santo Antão e porto de Praia da Vitória, e em especial no sector entre Praia da Vitória e São Lázaro $T = 6$ a 12% (índice $T = 5$).

- **Zona central do graben** – esta região tem uma topografia dominada por zonas planas, representadas pelas classes $T < 2\%$ (índice $T = 10$) e $T = 2$ a 6% (índice $T = 9$), e alguns relevos de reduzida expressão topográfica, representados sobretudo pela classe $T = 6$ a 12% (índice $T = 5$).
- **Serra de Santiago** – área de declives pouco acentuados no topo, dominados pela classe $T = 6$ a 12% (índice $T = 5$) e, subsidiariamente, por zonas de declives das classes $T = 2$ a 6% (índice $T = 9$), $T < 2\%$ (índice $T = 10$).
- **Sector de São Brás-Fontinhas-Vale Farto** – zona de declive pouco acentuado a moderado, dominado pela classe $T = 6$ a 12% (índice $T = 5$), gradando para NW para declives das classes $T = 2$ a 6% (índice $T = 9$) e $T < 2\%$ (índice $T = 10$).
- **Serra do Cume** – zona de declives acentuados, dominados pelas classes $T > 18\%$ (índice $T = 1$), $T = 12$ a 18% (índice $T = 3$) e $T = 6$ a 12% (índice $T = 5$).
- **Escarpas de Santiago e das Fontinhas e zonas de arriba litoral** – região de elevados declives, representados pela classe $T > 18\%$ (índice $T = 1$).
- **Aquífero de base** – zonamento idêntico ao das formações hidrogeológicas suspensas pois este parâmetro representa a superfície actual do terreno e não quaisquer paleotopografias
- ◇ **Parâmetro I:** nas formações hidrogeológicas suspensas considerou-se a natureza das unidades aflorantes pois neste aquífero constituirão a zona vadosa. No aquífero de base, além dos materiais da faixa litoral, considerou-se como zona vadosa toda a coluna de materiais até este aquífero, o que obriga a considerar a presença de paleossolos. O zonamento deste parâmetro resulta assim em:
 - **Formações hidrogeológicas suspensas** – neste sistema aquífero considerou-se:
 - **Traquibasaltos dos Cinco Picos e Basaltos inferiores** – definidos pela classe $I =$ Basaltos, com um índice $I = 9$.
 - **Ignimbritos inferiores e Areias e argilas** – definidos pela classe $I =$ Areia e balastro com quantidades significativas de silte e argila, com a atribuição de um índice $I = 6$.
 - **Ignimbritos das Lajes** – definidos igualmente pela classe $I =$ Areia e balastro com percentagem significativa de silte e argila, com índice $I = 8$, dado a alteração destes materiais ser muito menor que a dos ignimbritos inferiores.
 - **Basaltos superiores** – definidos pela classe $I =$ Basaltos, com

índice $I = 10$, pois são materiais muito vacuolares.

- o **Aquífero de base** – na zona vadosa deste aquífero deve sempre considerar-se o efeito da existência de paleossolos, excepto nas zonas litorais, onde o aquífero aflora à superfície. Note-se que não se atribui a classe $I =$ camada confinante porque a circulação vertical é muito importante (é a principal fonte de recarga), existindo antes níveis semi-permeáveis. Deste modo tem-se:
 - **Zonas de litoral de praia e de calhaus** – definidas pela classe $I =$ Areia e balastro, com índice $I = 9$.
 - **Ignimbritos inferiores e das Lajes** – definidos pela classe $I =$ Areia e balastro com percentagem significativa de silte e argila, pois embora a coluna litológica seja constituída por materiais piroclásticos e lavas (ignimbritos = cerca de 20 a 25 m de espessura; lavas e piroclastos dos traquibasálticas > 30 m espessura) optou-se por escolher esta classe em vez da classe Basaltos para reflectir o efeito da sucessão de unidades piroclásticas; a presença de camadas semi-permeáveis ao longo da sucessão litológica leva à atribuição do índice $I = 5$.
 - **Traquibasaltos dos Cinco Picos e Basaltos superiores** – definidos pela classe $I =$ Basalto, com índice $I = 7$, valor este escolhido para reflectir a presença de níveis semi-impermes. Não se diferencia entre as zonas de afloramento de basaltos recentes e traquibasaltos porque: (1) os basaltos recentes são muito permeáveis e pouco espessos, donde o seu efeito depurador será pouco significativo face à percolação até ao nível de base; (2) a existência de níveis de cozimento na base dos basaltos superiores diluir-se-á face à protecção acumulada do conjunto dos semi-impermes mais profundos.
 - **Areias e argilas** – definidos pela classe $I =$ Areia e balastro com quantidades significativas de silte e argila; dado que ocorrem na zona litoral onde o aquífero de base está em ligação directa com a superfície, não se considera a protecção devida a camadas semi-impermes, donde atribui-se o índice normal para esta classe, ou seja, o índice $I = 6$.
- ◇ **Parâmetro C:** foram considerados os valores de condutividades hidráulicas do Plano Regional da Água (DRAOTRH, 2001), Rodrigues (2002) e Schaller *et al.* (2005), obtendo-se, o seguinte zonamento:
 - o **Formações hidrogeológicas suspensas** – não se conhecendo as suas condutividades hidráulicas, a classificação baseou-se nos valores considerados por Schaller *et al.* (2005) e outra bibliografia para as várias formações, e utilizadas nesta fase de desenvolvimento do modelo matemático obtendo-se:
 - **Basaltos superiores** – admitem-se elevadas condutividades

hidráulicas devido a serem muito vacuolares, desenvolverem cavidades, tubos de lava, níveis escoriáceos pouco alterados e uma densidade de fracturação muito elevada, pelo que se lhes atribui a classe $C = K > 81,5 \text{ m/d}$ (índice $C = 10$).

- **Traquibasaltos dos Cinco Picos** – as condutividades hidráulicas seguem os valores propostos na literatura para este tipo de litologias, pelo que se lhes atribuiu a classe $C = K > 81,5 \text{ m/d}$ (índice $C = 10$).
 - **Ignimbritos das Lajes e Dunas e areias de praia** – admitiram-se condutividades hidráulicas conforme os valores propostos na literatura para estes tipos de materiais, pelo que se lhes atribuiu a classe $C = 4,1 \text{ a } 12,2 \text{ m/d}$ (índice $C = 2$).
 - **Restantes formações** – representadas pela classe $C = K < 4,1 \text{ m/d}$ (índice $C = 1$), pois Schaller *et al.* (2005) definiu uma transmissividade de $10 \text{ m}^2/\text{dia}$, obtendo uma boa calibração do seu modelo matemático, e para uma espessura saturada de 10 a 15 m a condutividade obtida é da ordem de 1 a 2 m/d, localmente um pouco menos.
- o **Aquífero de base** – representado pela classe $C = K > 81,5 \text{ m/d}$ (índice $C = 10$) pois o Plano Regional da Água (DRAOTRH, 2001), e admitindo que os valores se referem a captações no aquífero de base, indica condutividades de 730 m/d (para o sistema Graben) e de 145 m/d (para o sistema Ignimbritos das Lajes). Rodrigues (2002) atribuiu para todo o aquífero condutividades entre 500 a 1500 m/d, e Schaller *et al.* (2005) considerou valores da ordem dos 1 000 m/d.

A cartografia do zonamento DRASTIC é apresentada nas Fig. 79, Fig. 80, Fig. 81, Fig. 82, Fig. 83, Fig. 84, Fig. 85 e Fig. 86 para as formações hidrogeológicas suspensas.

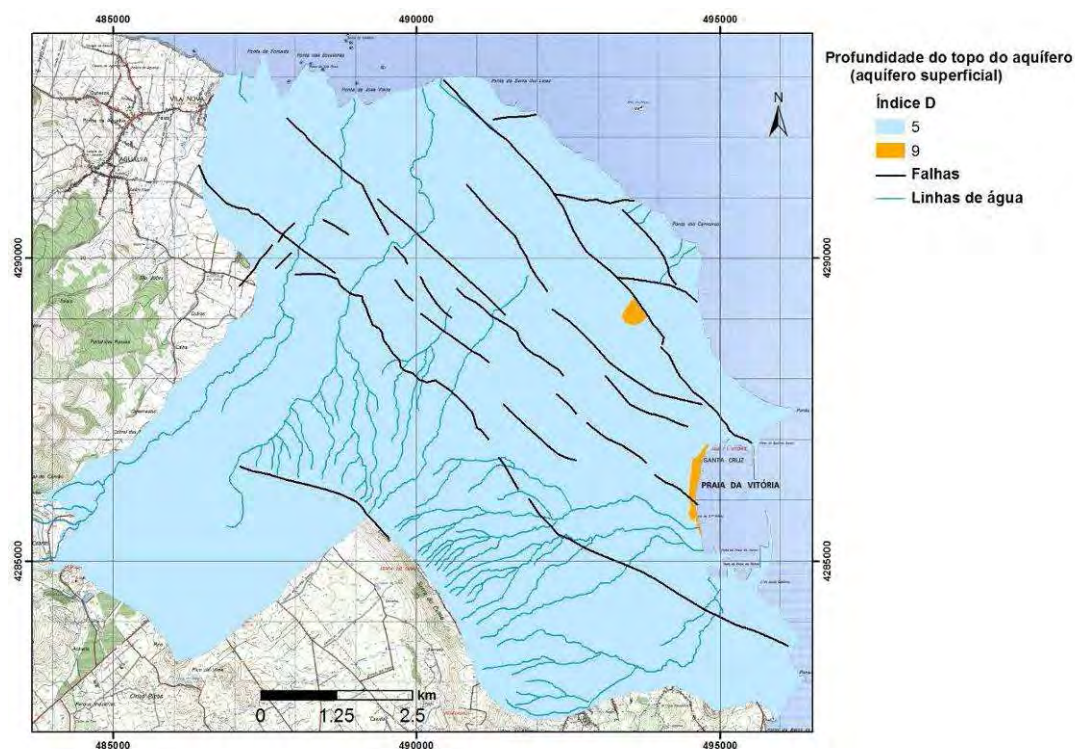


Fig. 79 – Zonamento do parâmetro D (profundidade ao nível de água) para as formações hidrogeológicas suspensas

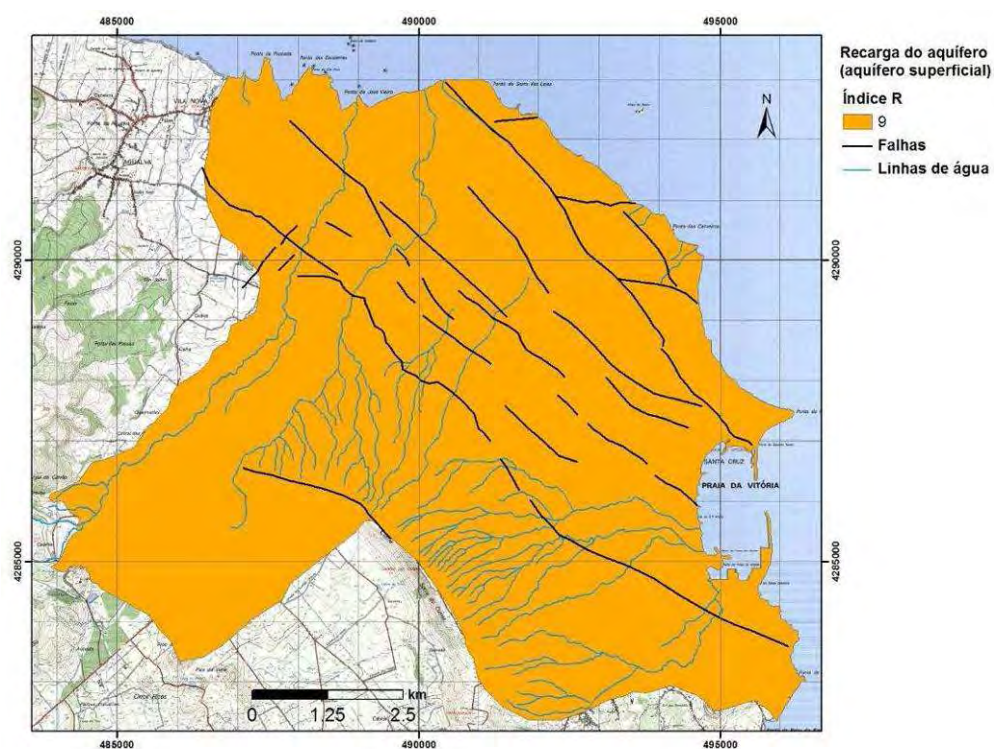


Fig. 80 – Zonamento do parâmetro R (recarga) para as formações hidrogeológicas suspensas

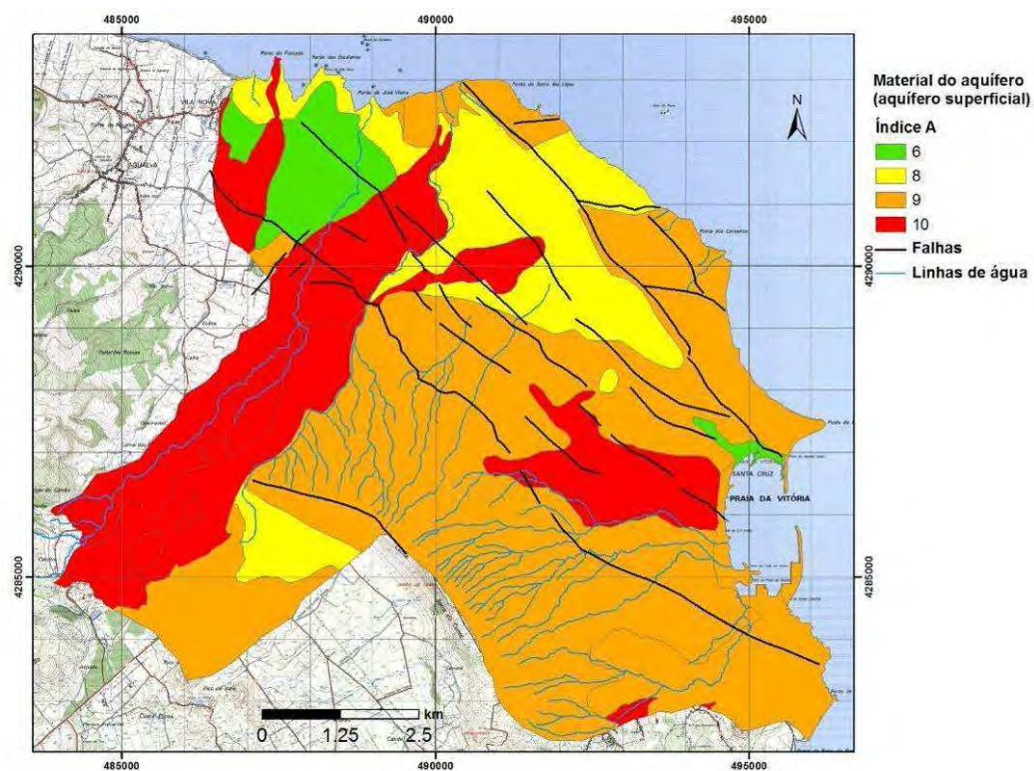


Fig. 81 – Zonamento do parâmetro A (material do aquífero) para as formações hidrogeológicas suspensas

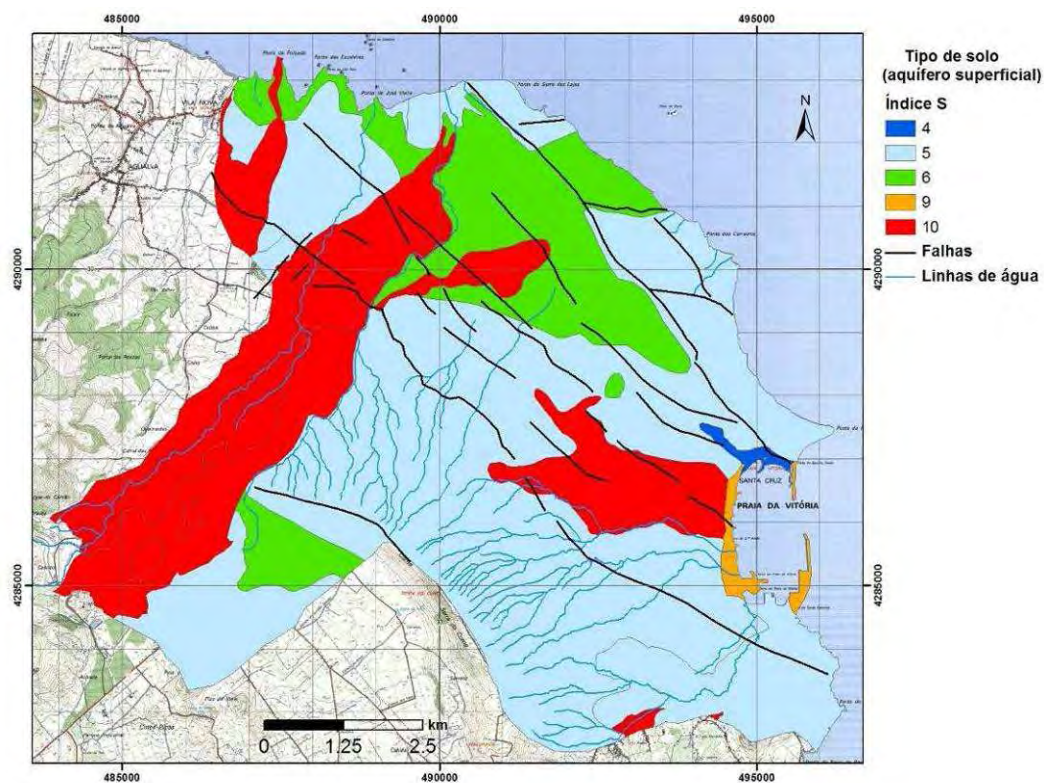


Fig. 82 – Zonamento do parâmetro S (natureza do solo) para as formações hidrogeológicas suspensas

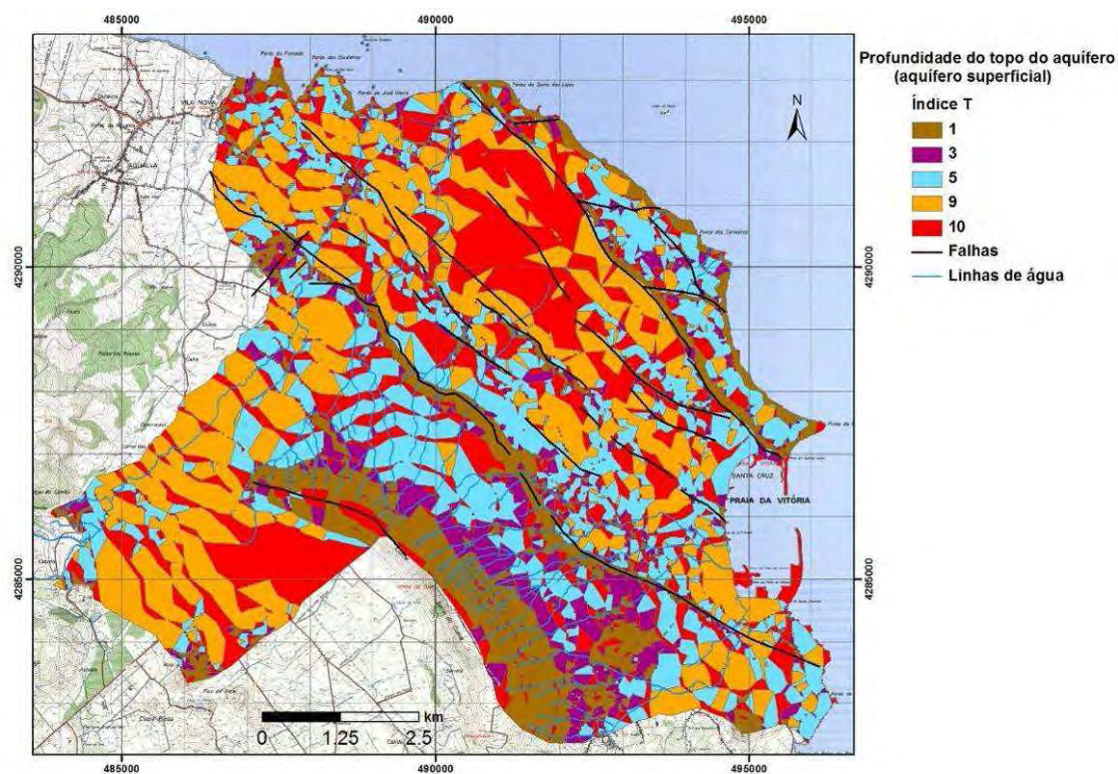


Fig. 83 – Zonamento do parâmetro T (topografia) para as formações hidrogeológicas suspensas

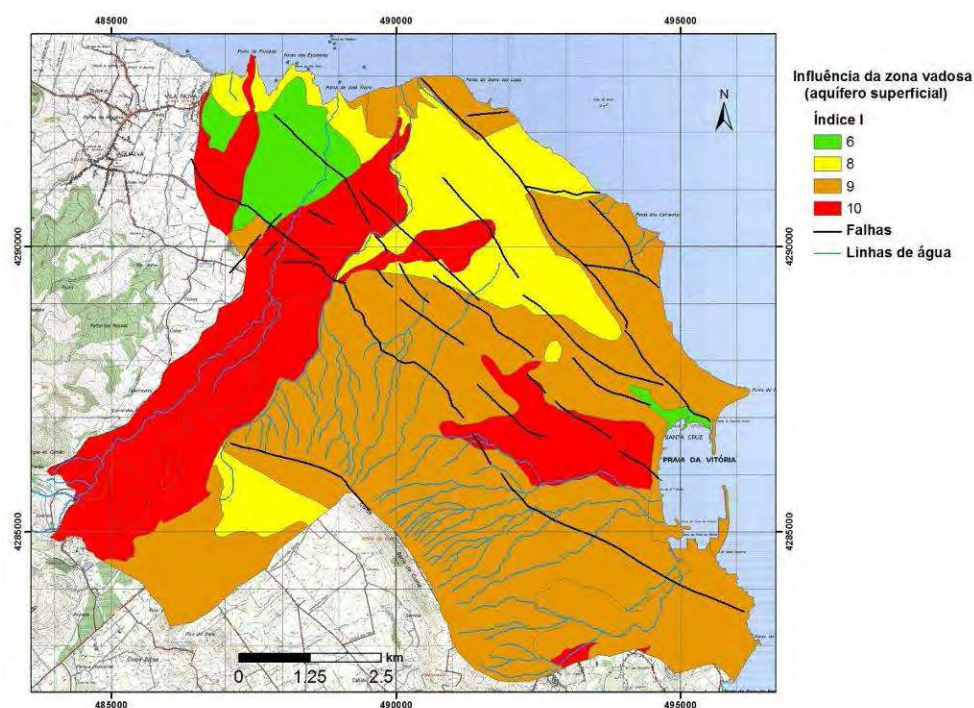


Fig. 84 – Zonamento do parâmetro I (influência da zona vadosa) para as formações hidrogeológicas suspensas

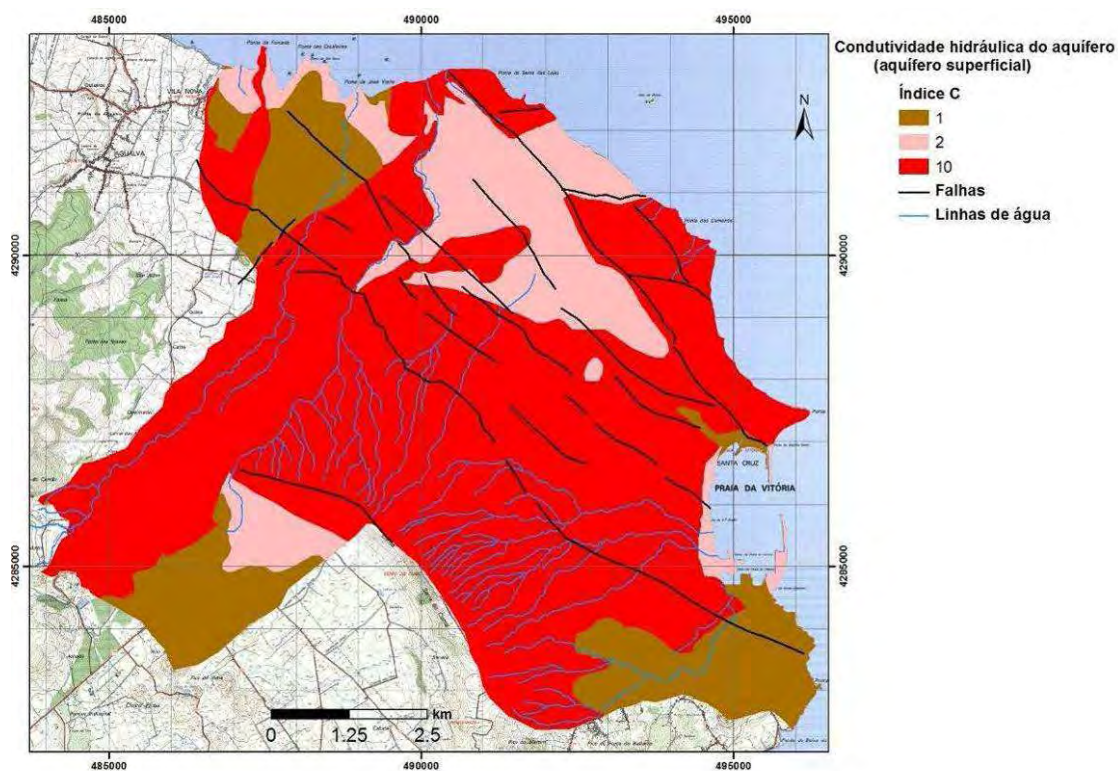


Fig. 85 – Zonamento do parâmetro C (condutividade hidráulica) para as formações hidrogeológicas suspensas

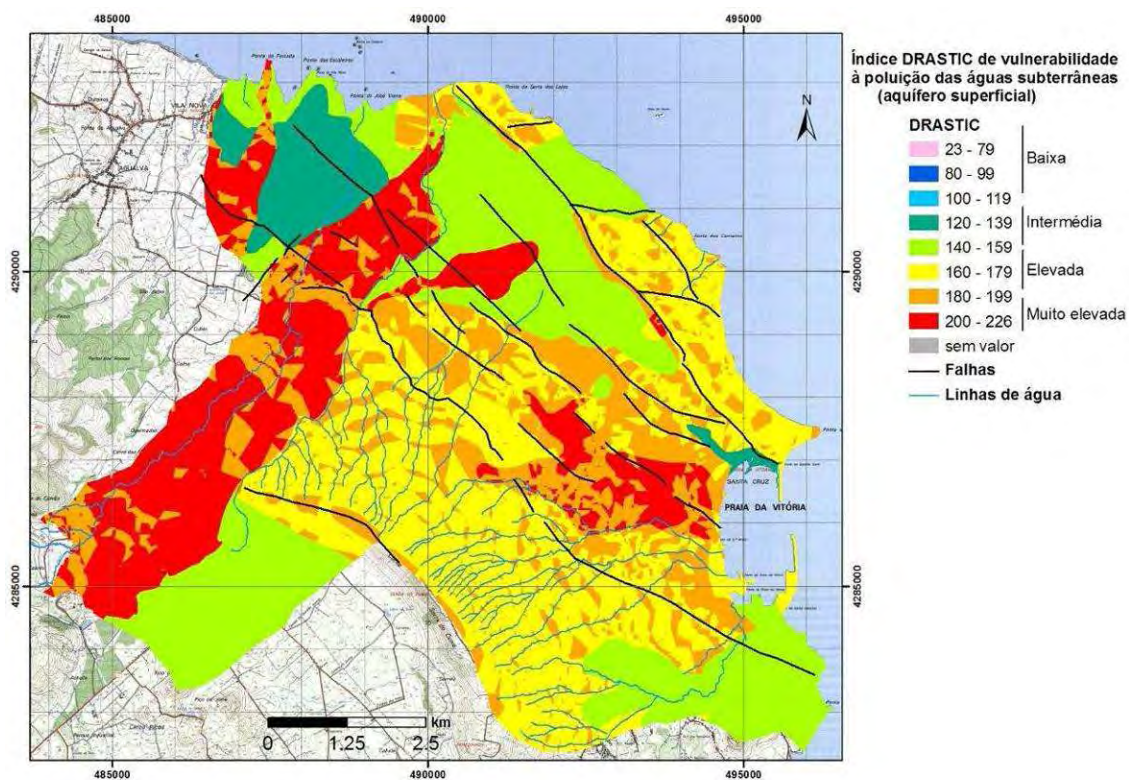


Fig. 86 – Índice DRASTIC de vulnerabilidade à poluição para as formações hidrogeológicas suspensas

O Zonamento DRASTIC para o sistema aquífero de base apresenta-se nas Fig. 87, Fig. 88, Fig. 89, Fig. 90, Fig. 91, Fig. 92, Fig. 93 e Fig. 94.

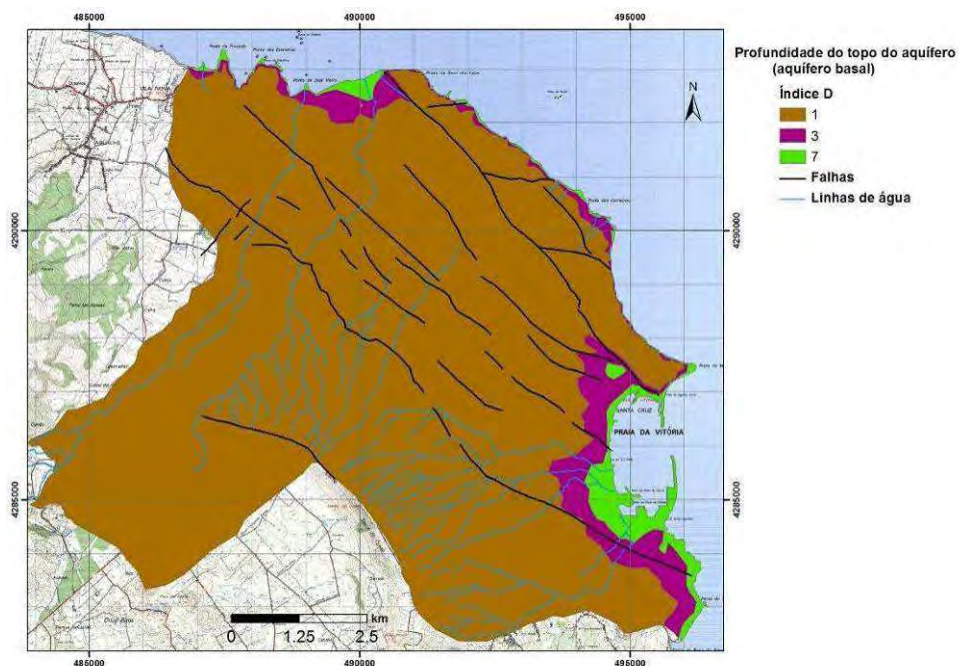


Fig. 87 – Zonamento do parâmetro D (profundidade ao nível de água) para o sistema aquífero de base

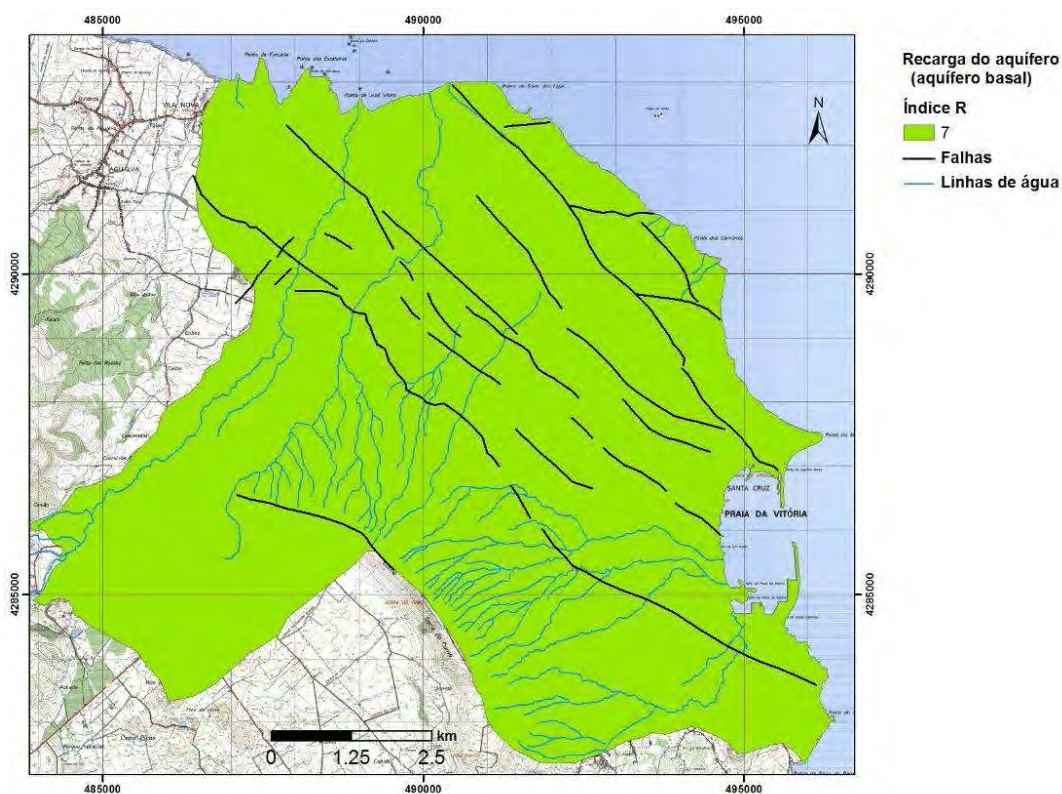


Fig. 88 – Zonamento do parâmetro R (recarga) para o sistema aquífero de base

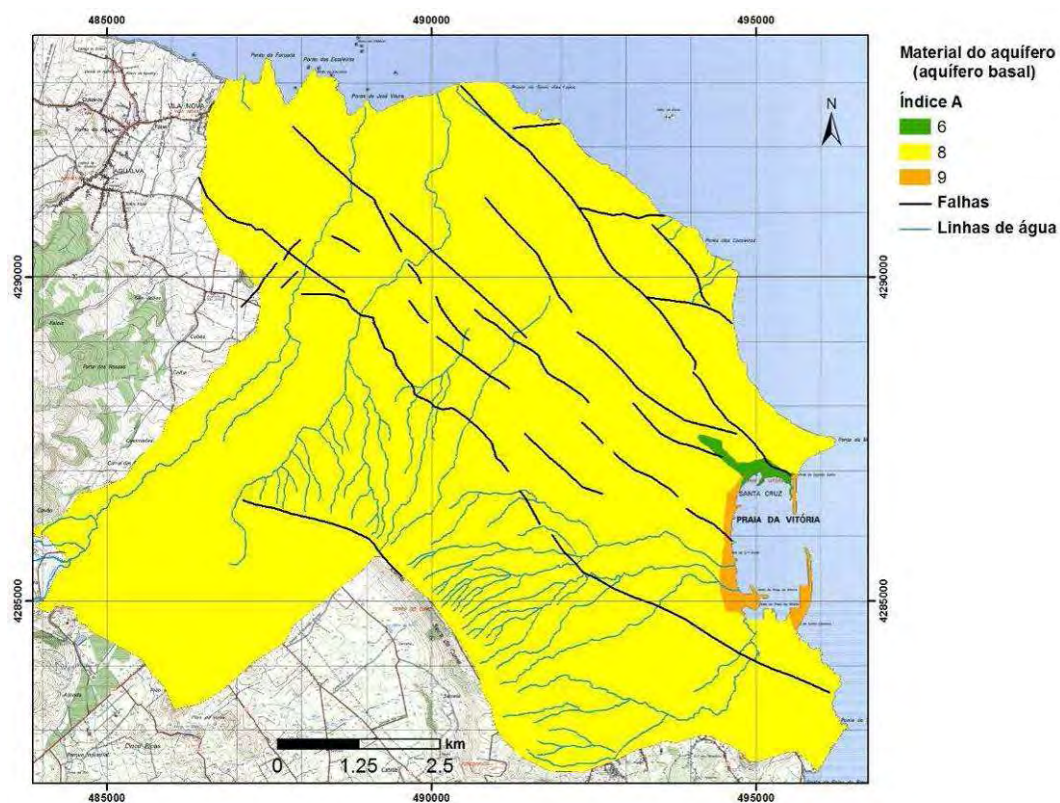


Fig. 89 – Zonamento do parâmetro A (material do aquífero) para o sistema aquífero de base

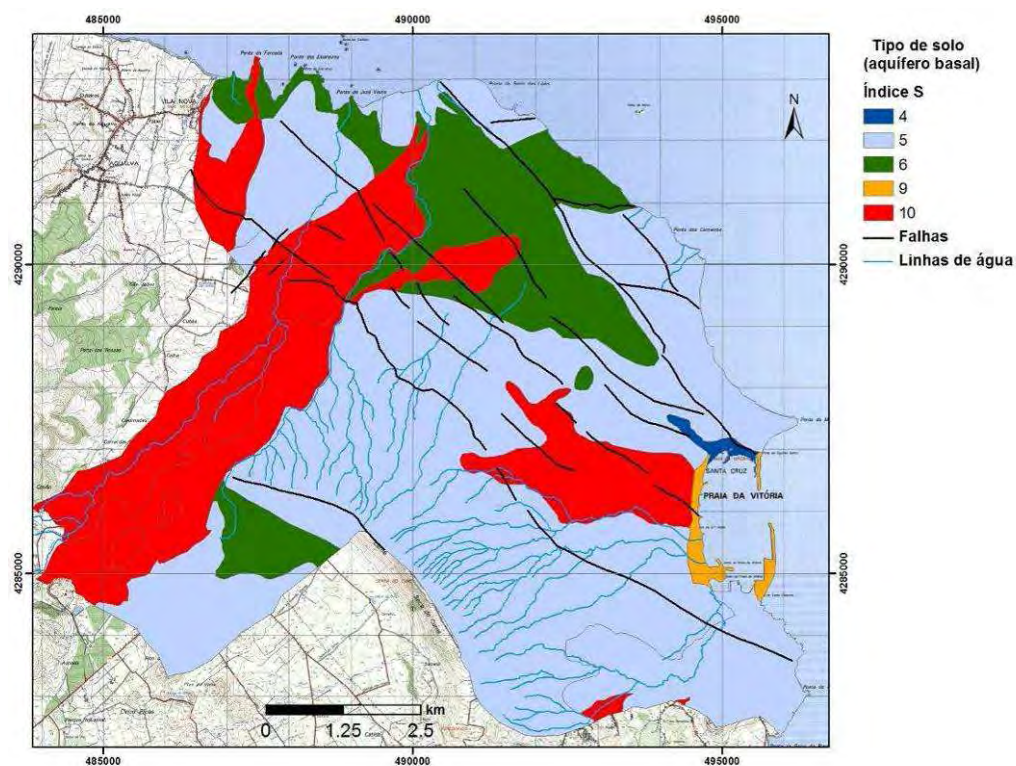


Fig. 90 – Zonamento do parâmetro S (natureza do solo) para o sistema aquífero de base

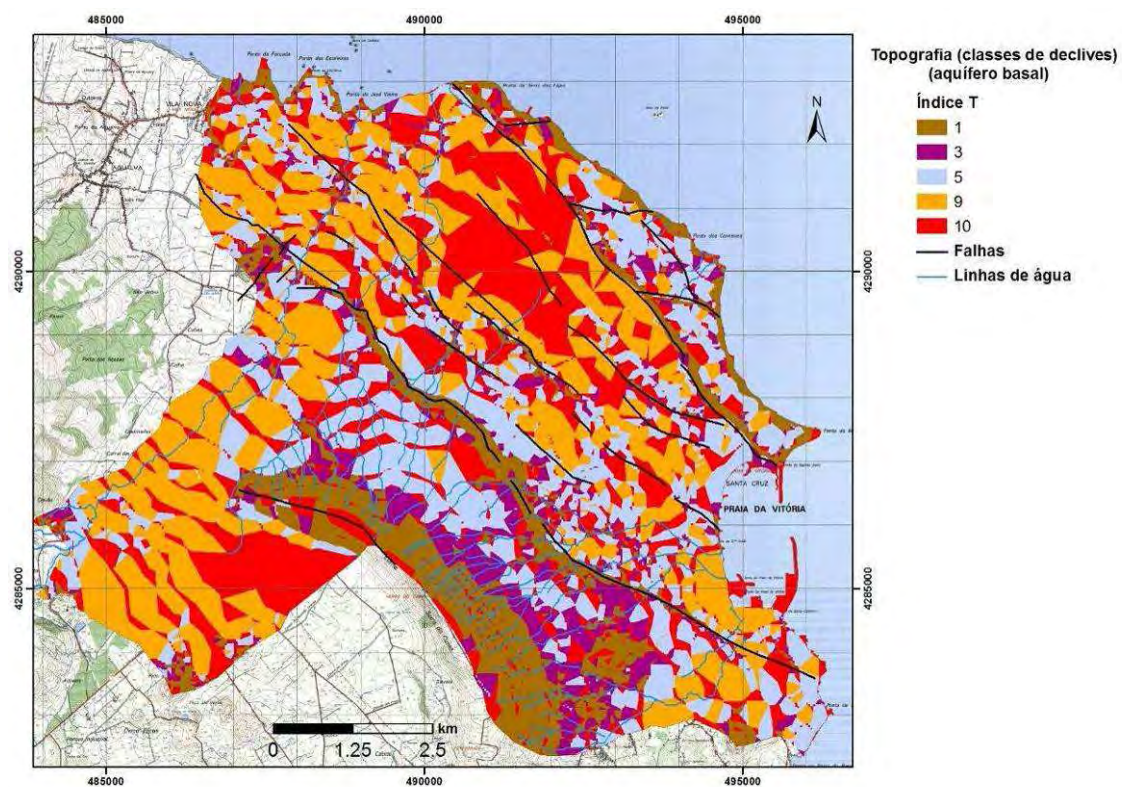


Fig. 91 – Zonamento do parâmetro T (topografia) para o sistema aquífero de base

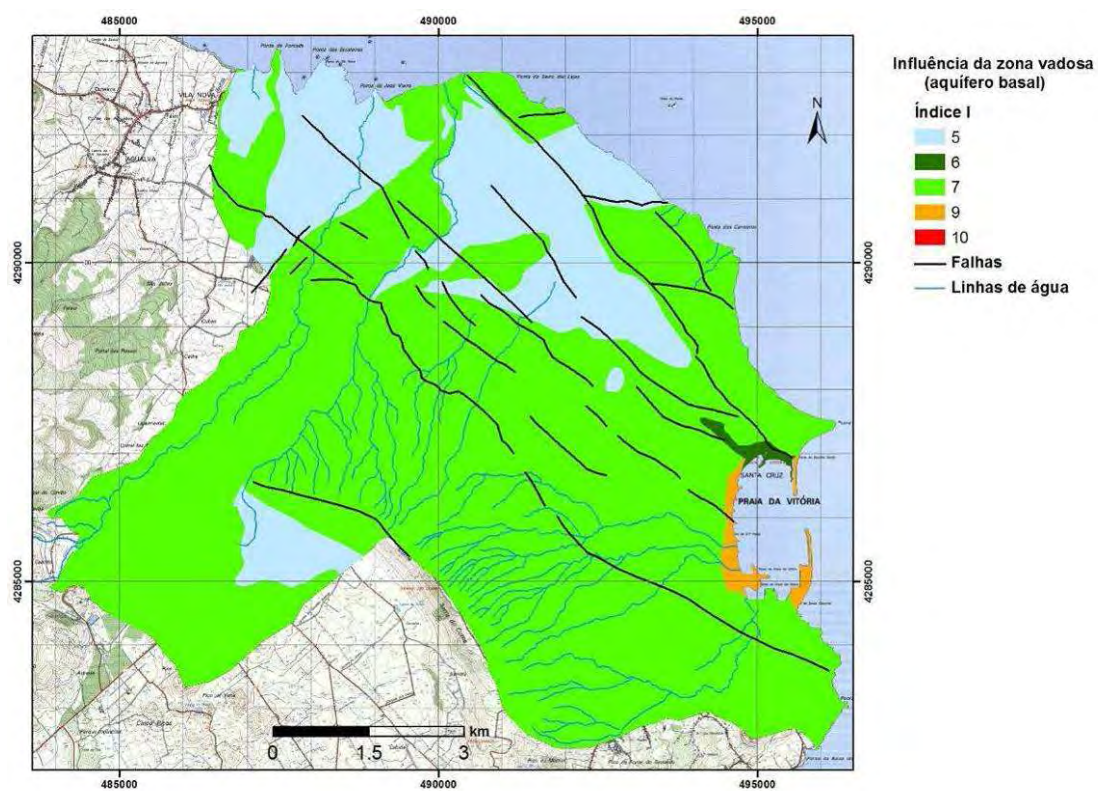


Fig. 92 – Zonamento do parâmetro I (influência da zona vadosa) para o sistema aquífero de base

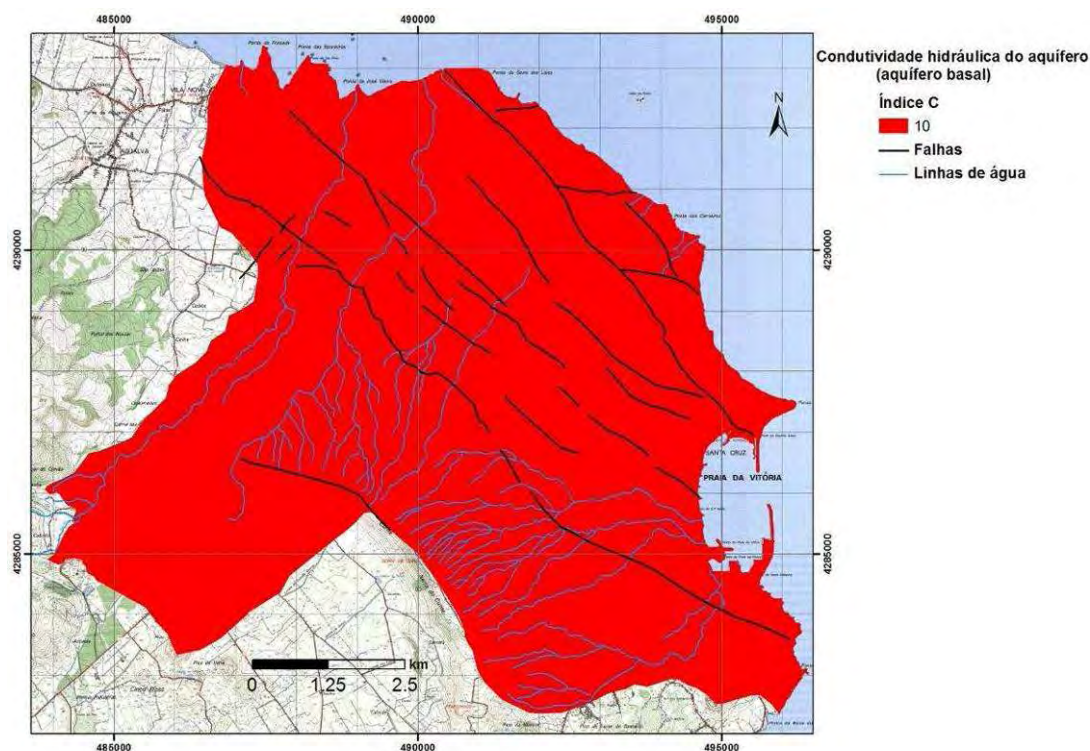


Fig. 93 – Zonamento do parâmetro C (condutividade hidráulica) para o sistema aquífero de base

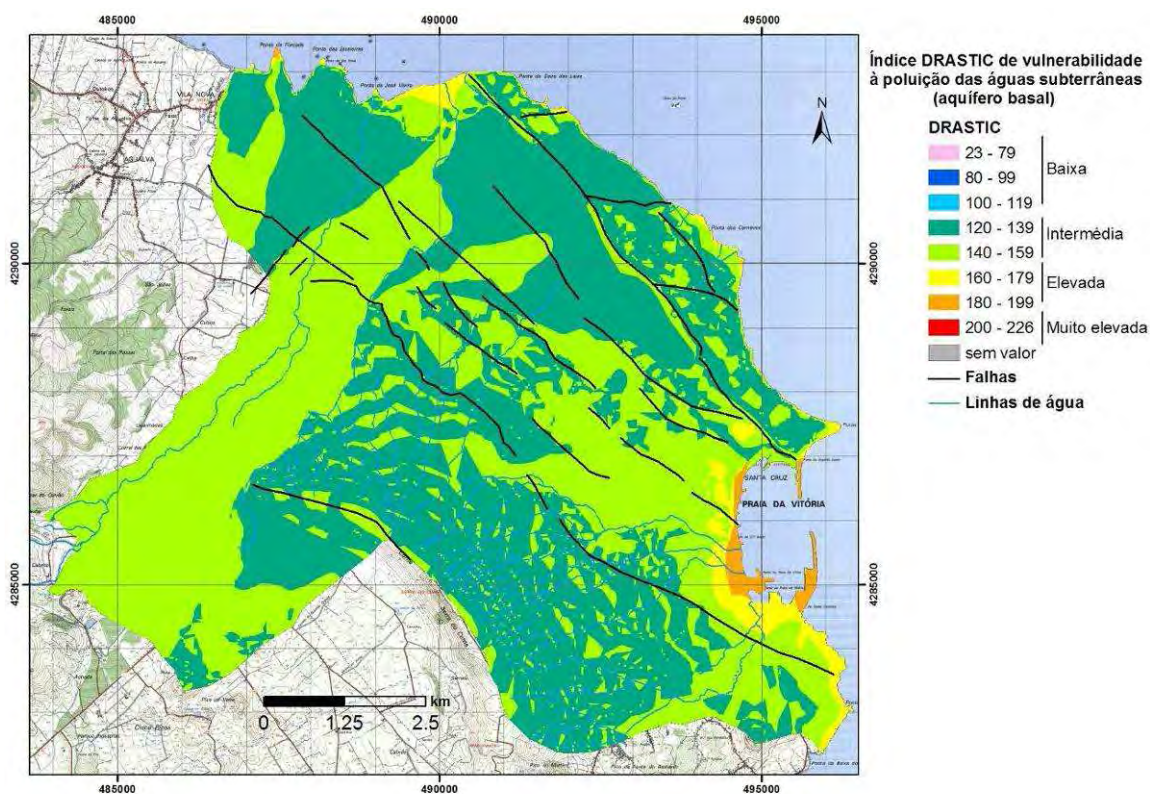


Fig. 94 – Índice DRASTIC de vulnerabilidade à poluição para o sistema aquífero de base

12. Qualidade das Águas Subterrâneas

12.1 Considerações gerais

Neste capítulo apresenta-se uma síntese do estado de conhecimentos relativo à qualidade das águas subterrâneas da área de estudo, procurando caracterizar as principais áreas poluídas e identificar os poluentes a elas associados.

O objectivo final da análise apresentada é caracterizar o risco potencial, a prazo, para os meios receptores nomeadamente da água para consumo humano na Ilha, resultante de situações de poluição associadas às infra-estruturas da Base das Lajes.

O trabalho foi desenvolvido com base num extenso programa de monitorização realizado entre Maio e Dezembro de 2010 que compreendeu um conjunto de infra-estruturas, pré-existent e instaladas para este Estudo, localizadas no concelho de Praia da Vitória, num total de 54 pontos de amostragem de águas subterrâneas apresentados na Fig. 42, cujas características são descritas no Quadro 1. Nesses pontos foram realizadas 90 recolhas para análise química completa, compreendendo 129 parâmetros químicos diferentes (elementos de campo, iões maiores, metais pesados e hidrocarbonetos), num total de 11 610 análises químicas.

Os pontos amostrados foram:

- cinco captações para abastecimento público da CMPV e o furo do Juncal 2;
- 17 poços de largo diâmetro;
- seis furos no aquífero basal (instalados pela firma Aqualis no decurso deste Estudo);
- dez piezómetros (instalados pela firma Aqualis no decurso deste Estudo), sete dos quais no aquífero basal e os restantes em aquíferos suspensos localizados durante as perfurações;
- cinco piezómetros (instalados pela firma Mota-Engil no decurso deste Estudo) nos aquíferos suspensos encontrados durante os trabalhos de recolha de solos para amostragem;
- dez piezómetros de monitorização, cinco localizados nas áreas contaminadas de *South Tank Farm* e os restantes junto à Porta de Armas;

Foram, ainda, efectuadas análises no *North Sewage* Lajes e na fonte da Caldeira das Lajes.

As duas campanhas de monitorização principais tiveram lugar nos meses de Maio e de Setembro de 2010 e foram conduzidas conjuntamente por técnicos do LNEC e da AmbiPar Control. Esta última teve a seu cargo todo o processo de realização de análises químicas, da cadeia de custódia e de controlo de qualidade. Em relatório separado apresenta-se o "Relatório de ensaios – Amostragem e análise de águas subterrâneas" da autoria de José Morais. As campanhas intermédias foram efectuadas apenas por técnicos do LNEC.

O Quadro 19 apresenta uma síntese das datas de amostragem e do tipo de amostra recolhida em cada local amostrado.

Quadro 19 - Síntese das datas de amostragem e do tipo de amostra recolhida em cada local

TIPO	DESIGNAÇÃO	Tipo de amostragem (1.ª à 3.ª campanha)	1.ª Amostragem (Maio 2010)			2.ª Amostragem (Junho 2010)		3.ª Amostragem (Julho 2010)	4.ª Amostragem (Setembro 2010)						5.ª Amostragem (Outubro 2010)	6.ª Amostragem (Dezembro 2010)	Tipo de amostragem (4.ª à 6.ª campanha)
Poços	CR9	M		29-05-2010													-
	CR11	M		29-05-2010													-
	CR12	M		29-05-2010													-
	CR13	M		29-05-2010													-
	CR17	M		29-05-2010													-
	CR18	M + dupl.		29-05-2010													-
	CR22A	M		29-05-2010													-
	CR23	M		30-05-2010													-
	CR25	M		29-05-2010													-
	CR25A	M		29-05-2010													-
	CR33	M		29-05-2010													-
	CR35	M		29-05-2010													-
	CR41	M			31-05-2010												-
	CR42	M		30-05-2010													-
	CR44	M		30-05-2010													-
	CR46A	M		30-05-2010													-
Furos abastecimento CNPV	Poço 5	T		30-05-2010													-
	Areeiro-Fontinhas	R + dupl.			31-05-2010						24-09-2010						R
	Canada das Covas	R	28-05-2010								24-09-2010						R
	Fontinhas-Barreiro	R	28-05-2010								24-09-2010						R
	Juncal 1	R			31-05-2010						24-09-2010						R
	Pico Celeiro	R	28-05-2010								24-09-2010						R
Disco Site 5001	Juncal 2	R				26-06-2010				18-09-2010							R
	MW04, Site 5001	T + dupl.			31-05-2010												-
	MW10, Site 5001	T			31-05-2010												-
	MW08, Site 5001	T			31-05-2010												-
	MW09, Site 5001	T			31-05-2010												-
	MW017, Site 5001	T			31-05-2010												-
Disco Site 3001	MW01, Site 3001	-									27-09-2010						S; F (só PCB e PAH)
	MW02, Site 3001	-									27-09-2010						S (+ F só PCB e PAH)
	MW05, Site 3001	-									27-09-2010						S (+ F só PCB e PAH)
	MW06, Site 3001	-									27-09-2010						S (+ F só PCB e PAH) + dupl.
	MW07, Site 3001	-									27-09-2010						S (+ F só PCB e PAH)
Novos piezómetros	S1B	M			31-05-2010						24-09-2010						S
	S5A	M	28-05-2010								24-09-2010						S (+ F só PCB e PAH)
	S5B	M	28-05-2010								24-09-2010						S (+ F só PCB e PAH)
	S6A	M	28-05-2010								24-09-2010						S (+ F só PCB e PAH)
	S6B	M	28-05-2010								24-09-2010						S (+ F só PCB e PAH)
	FP1	T				26-06-2010					26-09-2010						S (+ F só PCB e PAH)
	FP2	-									26-09-2010						S (+ F só PCB e PAH) + M
	FP3	T				25-06-2010					25-09-2010						S (sem PCB e PAH)
	FP3A	-									25-09-2010						S (+ F só PCB e PAH); M+dupl.
	FP5	T				25-06-2010					26-09-2010						S (+ F só PCB e PAH)
	FP6	-									25-09-2010						S (+ F só PCB e PAH); T+2dupl.
	FP6A	-									25-09-2010						S; F
	FP6B	-									25-09-2010						S; F + dupl
	FP7	T				26-06-2010					26-09-2010						S (+ F só PCB e PAH)
	Juncal 2 (FP4)	-									27-09-2010						M
Novos furos	FB1	-									24-09-2010						R
	FB2	-														02-10-2010	R
	FB3	R						23-07-2010			25-09-2010						S (sem PCB e PAH)
	FB5	R		30-05-2010							26-09-2010						S (+ F só PCB e PAH)
	FB6	-															R
	FB7	-								17-09-2010							2
Branco e outros	Branco campo	1												24-10-2010			R
	Norte sewage Lajes	R															-
	Fonte Caldeira das Lajes	R															-
	TOTAL	47															

Além do conjunto de análises referidas foram efectuadas oito amostras completas de duplicados e quatro brancos de campo que confirmaram a fiabilidade dos resultados obtidos. Esta análise bem como a descrição completa dos métodos utilizados, critérios de calibração, análises de controlo em laboratório e de toda a cadeia de custódia é apresentada em pormenor no Anexo 3 (Morais, 2010a).

O conjunto de resultados começou por ser analisado à luz da legislação Portuguesa em vigor para os parâmetros definidos para a qualidade das águas subterrâneas na origem, decorrente da aplicação da Directiva-Quadro da Água (DQA) e da Lei da Água. Para os parâmetros não contemplados naquela legislação foram utilizados os valores paramétricos definidos no Decreto-Lei n.º 306/2007 para a qualidade da água destinada ao consumo humano. Por fim, para os restantes parâmetros não definidos na legislação portuguesa foram utilizadas as normas do Canadá relativas aos standards para condições de águas subterrâneas potáveis. Optou-se por esta legislação estrangeira por ser das mais completas, juntamente com a legislação Holandesa, mas a mais recente (datada de 27 de Julho de 2009) e em sintonia com o definido na legislação imposta pela DQA de definição de standards de qualidade na origem. Em síntese, e por sequência, são os seguintes documentos utilizados:

- NQ - Normas de Qualidade, Anexo I da DAS, DL 208/2008;
- LQ - Limiar de Qualidade, Anexo II e VII da DAS, DL 208/2008 (definido em INAG, 2009);
- VP - Valor Paramétrico, DL 306/2007 Qualidade da água destinada ao consumo humano;
- Canadá - *Standards in a Potable Groundwater Condition* (Table 2).

Procurou-se enquadrar a vasta e nova informação obtida durante este Estudo, integrando-a e analisando-a também à luz do conhecimento disponível em estudos anteriores, cujas referências e sínteses são apresentadas na secção seguinte.

12.2 Elementos consultados

Os estudos hidrogeológicos anteriormente realizados na área de estudo, para além da análise dos dados globais sobre a Ilha apresentados por Rodrigues (2002) são apresentados em seguida procurando-se posteriormente analisar a eventual evolução no tempo de aspectos de quantidade e de qualidade.

a) Allen e Hoshall (1990)

O objectivo deste estudo foi analisar a situação dos seis furos de abastecimento da Base das Lajes, existentes à data, e efectuar recomendações para a instalação de novos furos para a extracção de um caudal adicional. Nos furos existentes foram realizados ensaios de caudal e foi extraída água para análise química e, por vezes, bacteriológica.

b) Cleary, C., Kachek, D., Liefer, T. e Zruba, R., 1997 - Environmental Survey for 3 Sites. Lajes Field, Azores, Portugal, Final Report. April 2007

Um dos objectivos do plano de trabalhos do estudo foi avaliar os problemas potenciais de 30 áreas identificadas como áreas de preocupação ("areas of concern" – AOC). Desse conjunto foi decidida a análise de três locais: *South Tank Farm/AOC-1*; *Cabrito Fuel Tank Area/AOC-17* e *Cova das Cinzas Tank Area/AOC-26*. Nesses locais foram efectuadas 35 sondagens.

O objectivo do trabalho foi, para cada um dos locais, determinar áreas potencialmente contaminadas por armazenamento de combustível e operações associadas. Os trabalhos de campo decorreram em Agosto e Setembro de 1996.

A análise da qualidade das águas subterrâneas foi efectuada em nove piezómetros, todos localizados na *South Tank Farm/AOC-1*. Nas outras áreas não foi encontrado o nível freático até as profundidades perfuradas, pelo que não foram instalados piezómetros. Presentemente na ACO1 apenas existem cinco desses nove piezómetros (MW04, MW08, MW09, MW010, MW017), tendo sido assumida a sua destruição em trabalhos desenvolvidos na área (CH2M HILL, 2004).

c) **CH2M HILL, J., 2004 - Data Summary Report on Groundwater Sampling at Lajes Field, Azores, Portugal – October 2004**

CH2M HILL (2004) realizou um estudo sobre a qualidade das águas subterrâneas na área da base das Lajes. Incluiu a análise das águas subterrâneas dos oito furos de abastecimento da Base e de cinco furos de monitorização localizados na *South Tank Farm/AOC-1*. No total foram recolhidas 13 amostras de água e duas amostras da fase líquida sobrenadante.

d) **CH2M HILL, J., 2005 - Data Summary Report on Groundwater Sampling at Lajes Field, Azores, Portugal – February 2005**

CH2M HILL (2005) realizou um estudo hidrogeológico inicial da Base das Lajes, com base nos dados recolhidos em 2003/2004.

e) **Bhate Associates, 2008 – Risk Assessment Summary of Findings for Sites 5001 (South Tank Farm), 3001 (Main Gate Area) and Data Gap Sampling at Lajes Field, Azores, Portugal**

Bhate Associates (2008) efectuou uma análise do risco para os locais *South Tank Farm*, *Main Gate Area* e *Data Gap Sampling*. O objectivo do estudo foi efectuar uma simulação da análise do risco com base do modelo RADSS (Risk Assessment Data Support System) versão 1.2. Esta análise foi realizada com base em dados históricos de diversos autores e em novos dados de uma campanha de monitorização efectuada em Junho de 2006, no decurso desse mesmo estudo.

f) **AMEC, 2009 - Site Characterization Selected Sites at Lajes Field Project N.º 775290045: Lajes Field.**

Esta informação é resultante de um conjunto de documentos recebidos por email da Base das Lajes, componente USAF. Tratam-se de tabelas de resultados de análises de águas subterrâneas em Novembro de 2009 e sua comparação com os limites vigentes na legislação do Canadá e Holanda.

12.3 Caracterização da qualidade das águas subterrâneas nos aquíferos suspensos

12.3.1 Porta de Armas (Main Gate, DISCO Site 3001)

Neste local foram efectuadas recolhas em cinco dos sete piezómetros instalados pela AMEC e em dois novos piezómetros instalados pela Mota-Engil no decorrer do presente Estudo (Fig. 95). O LNEC foi informado que os piezómetros MW03 e MW04 continham produto sobrenadante e os mesmos seriam sujeitos a bombagem em Outubro de 2010 para recuperação, pelo que não foi permitida a recolha de água nesses pontos.

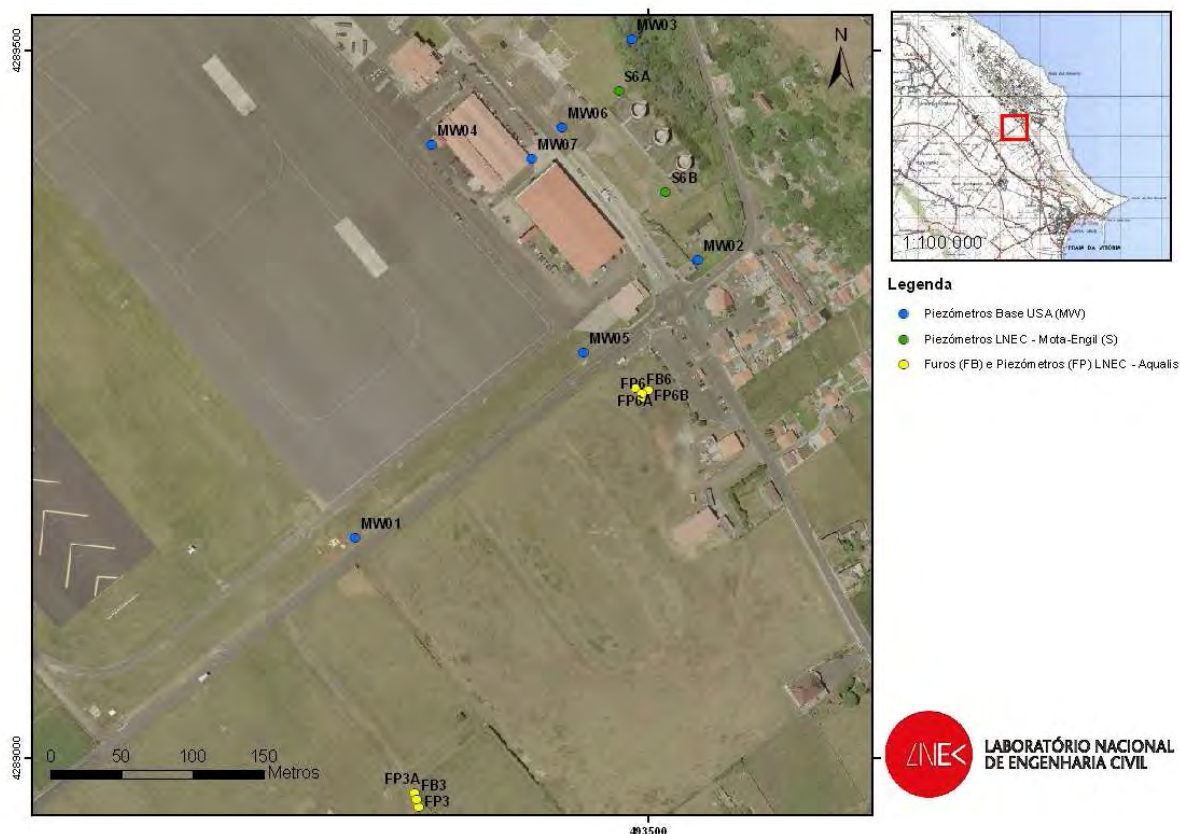


Fig. 95 – Localização dos pontos de amostragem de águas na área junto à Porta de Armas

A recolha de amostras de água para análise química nos cinco pontos (MW01, MW02, MW05, MW06 e MW07) foi realizada num só período, a 27 de Setembro de 2010. Já a recolha nos novos piezómetros (S6A e S6B) foi efectuada em dois períodos distintos, a 28 de Maio e a 27 de Setembro de 2010.

Uma vez que estes piezómetros de pouca profundidade captam aquíferos superficiais, sem aparente continuidade lateral, as recolhas foram efectuadas visando caracterizar a eventual presença de hidrocarbonetos retidos nesses níveis, com possibilidade de contribuir para uma migração da poluição para níveis inferiores. Nesse contexto, procurou-se também complementar a informação existente em estudos anteriores (Bathe Associates, 2006 e AMEC, 2009), retirando não só amostras representativas mas também amostras de água no contacto do nível piezométrico, para analisar a presença de hidrocarbonetos sobrenadantes (LNAPL), e em profundidade, procurando encontrar os hidrocarbonetos mais densos do que a água (DNAPL).

Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 20.

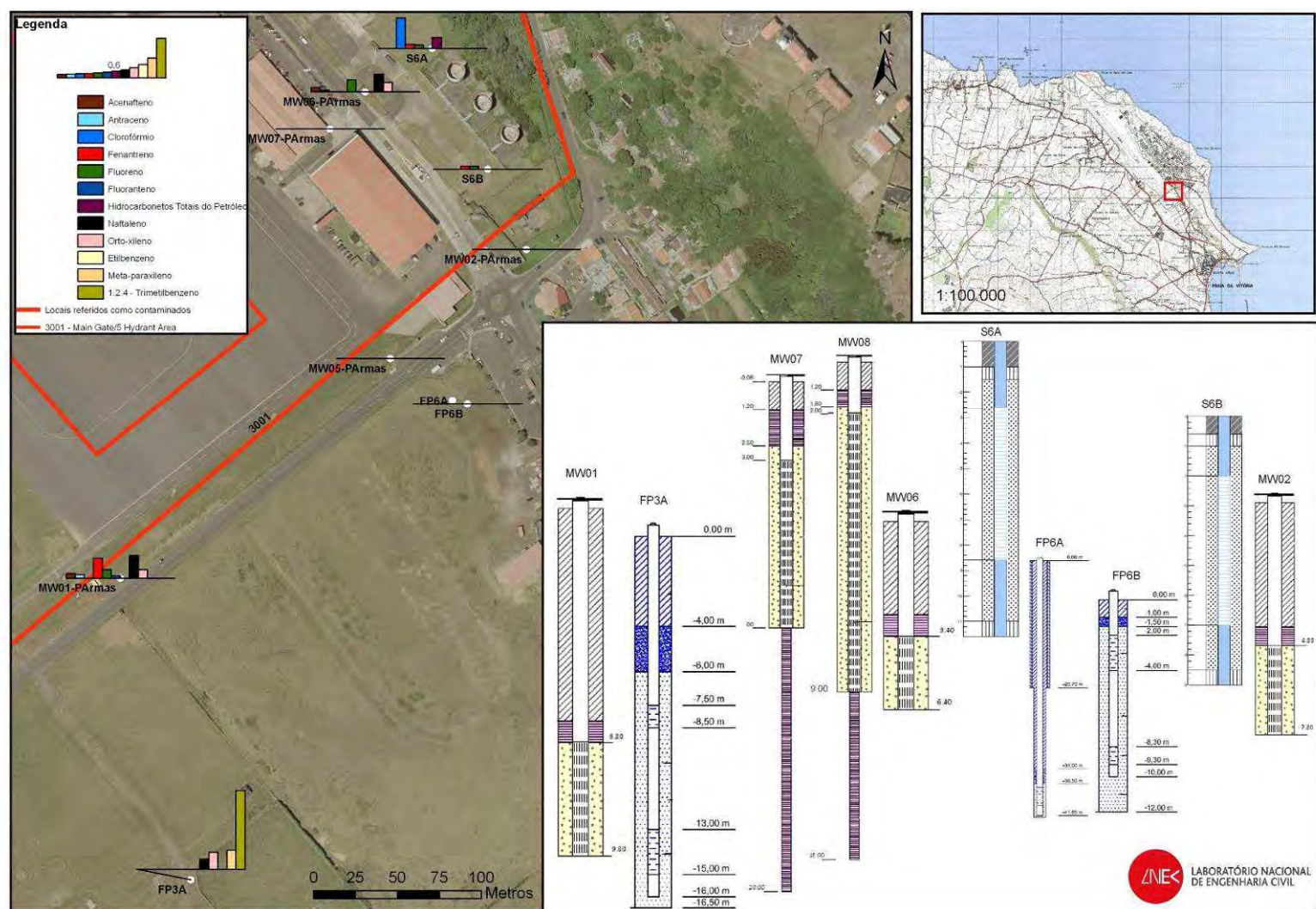
A análise dos resultados obtidos (Quadro 20 e Fig. 98) permite confirmar a presença de diversos PAHs (acenafteno, antraceno, fluoranteno, fluoreno, naftaleno, fenantreno), de VOCs (clorofórmio), de hidrocarbonetos totais do petróleo e, dentro do grupo dos BTEX, de orto-xileno. A Fig. 97 representa as concentrações de hidrocarbonetos mais elevadas observadas em cada ponto de água, em 2010, independentemente da profundidade de recolha. Corresponde, assim, ao pior cenário de poluição. Embora na Fig. 98 os resultados obtidos para o ponto FP6A (superfície) estejam representados, estes não foram projectados no mapa da Fig. 97, por precaução, uma vez que se supõe poderem ter sido originados pelo processo construtivo do furo, aspecto a confirmar em análises posteriores (de facto já se procurou esclarecer este aspecto numa nova recolha em Dezembro de 2010 mas os frascos quebraram na viagem para o laboratório (situado em Praga) devido às temperaturas inferiores a zero, cf. Fig. 96).



Fig. 96 – Aspecto dos frascos de recolha de água do ponto FP6A, chegados ao laboratório em Dezembro de 2010

Quadro 20 – Resultados das análises químicas efectuadas em cinco piezómetros AMEC e dois piezómetros LNEC_Mota-Engil junto à Porta de Armas (DISCO Site 3001)

			Designação local Método amostragem Hora amostragem	MW01-PArmas Fundo Set-10	MW01-PArmas Superficial Set-10	MW02-PArmas Fundo Set-10	MW02-PArmas Superficial Set-10	MW05-PArmas Fundo Set-10	MW05-PArmas Superficial Set-10	MW06-PArmas Fundo Set-10	MW06-PArmas Superficial Set-10	MW07-PArmas Fundo Set-10	MW07-PArmas Superficial Set-10	Mai-10 11:37	S6A Fundo Set-10	Superficial Set-10	Mai-10 19:34	S6B Fundo Set-10	Superficial Set-10 9:11					Norma	Valor	N.º ocorrências acima do valor	
Método	Análise	Unidade	Limite quantificação	0,01	20,3	20,7	22,0	20,9	23,7	22,3	23,2	21,3	22,8	21,5	20,7	20,9	19,2	20,5	21,4	Mínimo 19,2	Máximo 23,7	Média 21,5	Mediana 21,35				
SMEWW 2550	Temperatura	°C		0,05	6,7	6,7	6,8	6,9	7,0	6,9	6,9	6,8	7,0	6,8	6,7	6,8	6,3	6,8	6,7	6,27	6,98	6,8	6,8	LQ	5,5:9	1	
SMEWW 4500 H° B	pH	Sorensen		v	592	613	1016	695	611	575	654	627	702	604	545	553	587	347	400	396	347	1016	594,8	598	LQ	2500	0
Parâmetros agregados																											
W-PHI-PHO	Índice de fenóis	mg/L	0,005		<0,005		0,014		<0,005		0,005		<0,005	<0,005		0,014	<0,005		0,013	<0,005	0,014	0,012	<0,005	Canadá	0,89	0	
Inorgânicos não metálicos																											
W-ACID-PCT	Acidez pH 4.5	mmol/L	0,15		<0,15		<0,15		<0,15		<0,15		<0,15	<0,15		<0,15	<0,15		<0,15	<0,15	<1,0	<0,15					
W-ACID-PCT	Acidez pH 8.3	mmol/L	0,15		0,304		0,16		0,165		0,309		0,304	0,168		0,304	0,168		0,15	0,15	0,36	0,24	0,23				
W-CO2F-C2	Agressividade CO2	mg/L	0		0		1,16		2,04		0		0	0		0	0		4,68	0,0	4,7	2,6	0,0				
W-AUK-PCT	Alcalinidade pH 4.5	mmol/L	0,15		4,14		2,74		2,59		5,44		5,13	5,05		4,95	1,94		1,71	1,71	5,44	3,74	4,14				
W-AUK-PCT	Alcalinidade pH 8.3	mmol/L	0,15		<0,15		<0,15		<0,15		<0,15		<0,15	<0,15		<0,15	<0,15		<0,15	<0,15	<1,0	<0,15					
W-CO2F-C2	Carbonatos	mg/L	0		0		0		0		0		0	0		0	0		0	0,0	0,0	<1,0	0,0				
W-Cl-IC	Cloretos	mg/L	1		55,7		69,7		123		31		33,6	42,9		41,7	43,6		61,6	31,0	123,0	55,9	43,6	LQ	250	0	
W-CO2F-C2	Dióxido de carbono livre, CO2	mg/L	0		13,4		7,06		13,6		10		16,5	13,4		7,4	6,62		6,6	16,5	10,6	10,0					
W-CO2F-C2	Bicarbonato	mg/L	0		252		167		332		313		308	302		118	104		104,0	332,0	228,2	252,0					
W-NO3-IC	Nitratos, N	mg/L	0,5		<0,5		16,7		<0,5		<0,5		<0,5	<0,5		0,952	2,65		<0,5	16,7	6,8	<0,5					
W-NO3-IC	Nitratos	mg/L	2		<2		74,1		<2		<2		<2	<2		4,21	11,7		<2	74,1	30,0	<2	NQ	50	1		
W-SO4-IC	Sulphate as SO4 2-	mg/L	5		33,5		72,6		6,54		12,5		23,8	17,5		8,95	13,5		6,5	72,6	22,1	13,5	LQ	250	0		
W-CO2F-C2	Total de dióxido de carbono livre, CC	mg/L	0		195		128		121		253		236	239		92,6	81,9		81,9	253,0	175,3	195,0					
Metais em solução / Cátions maiores																											
W-METAXFL1	Alumínio - Al	mg/L	0,01		0,026		0,144		<0,01		0,011		0,013	2,36		0,769	0,954		0,652	<0,01	2,36	0,62	0,14	VP	0,2	0	
W-METAXFL1	Antimônio - Sb	mg/L	0,01		<0,01		<0,01		<0,01		<0,01		<0,01	<0,01		4,86	0,101		<0,01	<0,01	<1,0	<1,0	<1,0	VP	0,005	0	
W-METAXFL1	Arsénio - As	mg/L	0,005		<0,005		<0,005		<0,005		<0,005		<0,005	<0,0063		<0,005	<0,006		<0,005	<0,005	<0,006	<0,006	<0,005	LQ	0,01	0	
W-METAXFL1	Bário - Ba	mg/L	0,0005		0,00995		0,00594		0,00108		0,0187		0,00776	0,00928		0,027	0,0229		0,0134	0,0011	0,0928	0,0022	0,0134	Canadá	1	0	
W-METAXFL1	Berílio - Be	mg/L	0,0002		<0,0002		<0,0002		<0,0002		<0,0002		<0,0002	0,00034		0,00042	0,00034		<0,0002	<0,0002	0,0004	0,0011	<0,0002	Canadá	0,004	0	
W-METAXFL1	Boro - B	mg/L	0,01		0,076		0,121		0,124		0,398		0,337	0,310		0,322	0,310		0,322	0,076	0,398	0,254	0,310	Canadá	5	0	
W-METAXFL1	Cádmio - Cd	mg/L	<0,0004		<0,0004		<0,0004		<0,0004		0,00045		<0,0004	<0,0004		0,0007	<0,0004		<0,0004	<0,0004	0,0006	<0,0004	<0,0004	LQ	0,005	0	
W-METAXFL1	Cálcio - Ca	mg/L	0,005		41		24,6		14,5		59,1		28,4	28,2		19,6	10,4		9,8	9,8	59,1	26,2	24,6				
W-METAXFL1	Crómio - Cr	mg/L	0,001		<0,001		<0,001		<0,001		<0,001		<0,001	<0,001		<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<1,0	<1,0	<1,0	VP	0,05	0	
W-METAXFL1	Cobalto - Co	mg/L	0,002		<0,002		<0,002		<0,002		<0,002		<0,002	0,00028		<0,002	<0,002		<0,002	<0,002	0,003	0,003	<0,002	Canadá	0,0038	0	
W-METAXFL1	Cobre - Cu	mg/L	0,002		0,002		<0,002		0,0022		<0,002		<0,002	0,0058		<0,002	0,0026		<0,002	<0,002	0,006	0,003	<0,002	VP	2	0	
W-METAXFL1	Ferro - Fe	mg/L	0,002		2,35		0,0243		0,278		8,22		4,44	6,14		0,827	6,14		0,354	0,024	8,22	2,522	0,827	VP	0,2	3	
W-METAXFL1	Chumbo - Pb	mg/L	0,005		<0,005		<0,005		<0,005		<0,005		<0,005	0,0198		0,0798	0,0123		<0,005	<0,005	0,080	0,037	<0,005	LQ	0,01	0	
W-METAXFL1	Lítio - Li	mg/L	0,001		<0,001		<0,001		<0,001		<0,001		<0,001	<0,001		<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<1,0	<1,0	<1,0				
W-METAXFL1	Magnésio - Mg	mg/L	0,003		13,3		13,2		14,6		22		22,9	22,1		4,57	4,6		<1	<1	22,9	14,4	13,3				
W-METAXFL1	Manganês - Mn	mg/L	0,0005		0,946		0,00402		2,37		4,53		0,609	9,23		6,96	0,111		0,0343	0,0402	2,3	2,8	0,9460				
W-HG-AFSL	Mercurio - Hg	µg/L	0,01		0,073		<0,01		<0,01		<0,01		<0,01	<0,01		0,02	<0,01		0,028	<0,01	0,073	0,040	<0,01	LQ	1	0	
W-METAXFL1	Molibdênio - Mo	mg/L	0,002		<0,002		0,0042		0,008		0,0042		<0,002	0,0058		0,0032	0,0022		0,0042	<0,002	0,008	0,005	0,0042	Canadá	0,07	0	
W-METAXFL1	Níquel - Ni	mg/L	0,002		<0,002		<0,002		<0,002		<0,002		<0,002	0,0057		<0,002	<0,002		<0,002	<0,002	0,006	0,006	<0,002	VP	0,02	0	
W-METAXFL1	Fósforo - P	mg/L	0,01		0,028		0,109		0,05		0,026		0,128	0,142		0,341	0,142		0,129	<0,01	0,341	0,119	0,109				
W-METAXFL1	Potássio - K	mg/L	0,015		3,83		6,33		12,7		5,4		11,2	10,6		5,16	6,2		3,83	21,400	9,202	6,33		VP	0,01	0	
W-METAXFL1	Selénio - Se	mg/L	0,01		<0,01		<0,01		<0,01		<0,01		<0,01	<0,01		<0,01	<0,01		<0,01	<0,01	<1,0	<1,0	<1,0	Canadá	0,0015	0	
W-METAXFL1	Prata - Ag	mg/L	0,001		<0,001		<0,001		<0,001		<0,001		<0,001	<0,001		<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<1,0	<1,0	<1,0	Canadá	200	0	
W-METAXFL1	Sódio - Na	mg/L	0,03		48,7		79,1		56		37,4		60,7	44,5		51,7	49,5		50,8	37,4							



(*) N.B. - há incerteza na origem das concentrações do piezómetro FP6A (cf. Fig. 98)

Fig. 97 – Concentração em hidrocarbonetos diversos em piezómetros superficiais localizados junto à área da Porta de Armas

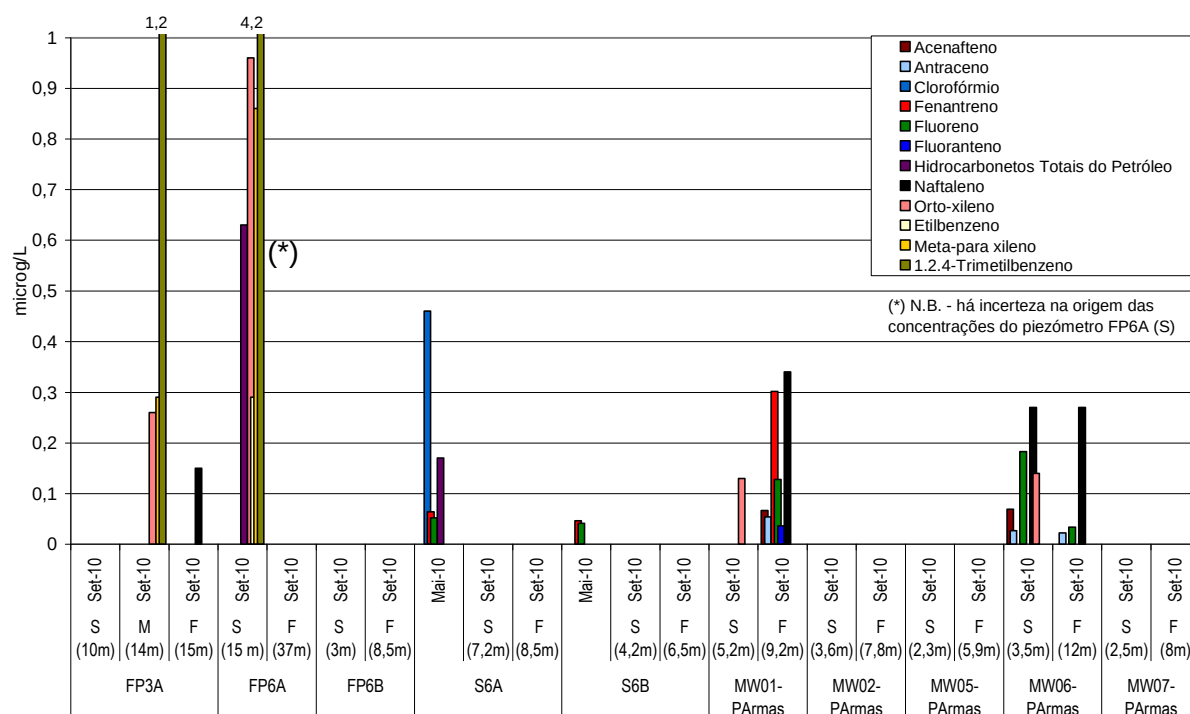


Fig. 98 – Concentração em PAHs, TPH e BTEX em dez piezómetros localizados em aquíferos suspensos, na área junto à Porta de Armas

Pese embora o facto das concentrações em hidrocarbonetos analisadas estarem todas abaixo dos valores standard (cf. Quadro 20), a presença destes elementos nas águas subterrâneas denuncia, por si só, poluição do local, que seria confirmada como estando acima dos valores admissíveis, se as águas dos piezómetros MW03 e MW04 tivessem sido analisadas, pois aí os valores certamente ultrapassam os limites, como se verificou no passado (AMEC, 2009). O MW02 e MW05 não apresentaram resultados acima do limite de detecção na amostragem realizada em Setembro de 2010, sendo possível que esse facto resulte de ter havido amostragens na semana anterior.

O decréscimo de concentração entre as amostragens de Maio e de Setembro (p.e. S6A e S6B) também se pode dever ao decréscimo de vários metros verificado no nível piezométrico e, assim, à amostragem efectuada a profundidades diferentes.

Ainda de referir na Fig. 98 que as amostras recolhidas no contacto com o nível piezométrico (assinaladas como “superfície”) e as amostras recolhidas no fundo do furo (assinaladas como “fundo”) apresentam claras diferenças de concentração dos PAHs analisados (que são todos os elementos da figura com excepção do orto-xileno). Esta diferença não é explicada apenas com uma análise da sua densidade. Na realidade há compostos mais densos do que a água (o caso do antraceno) que surge em ambas as profundidades para alguns pontos, e.g. MW06. Uma das explicações possíveis para a diferença encontrada poderá dever-se à maior proximidade do MW06 de uma fonte de contaminação, enquanto que no MW01 houve algum tempo de migração da poluição entretanto infiltrada para horizontes mais profundos. A presença de hidrocarbonetos no piezómetro FP3A indica que o escoamento nas formações suspensas se processa naquela direcção.

Os resultados globais obtidos confirmam os de análises anteriores (cf. Bathe Associates, 2006

e AMEC, 2009) que também referem contaminação por BTEX, VOCs, GRO e DRO. No Quadro 21 apresentam-se os valores obtidos em diferentes estudos realizados, apenas para os elementos que apresentaram, em alguma ocasião, valores acima do limite de detecção utilizado.

A Fig. 99 apresenta uma síntese desses dados. Chama-se a atenção para o facto de nem em todas as ocasiões se terem analisado os mesmos parâmetros. Apenas o ponto MW07 não apresentou nunca concentrações acima dos limites de detecção para nenhum dos parâmetros analisados. Dos restantes pontos, são os locais MW03 e MW04 aqueles cujas concentrações estão muito acima dos valores standard. No entanto, como se pode observar pelo pormenor no canto superior direito da Fig. 99, muitos outros locais apresentam em algum momento concentrações assinaláveis, embora quase imperceptíveis à escala do gráfico principal.

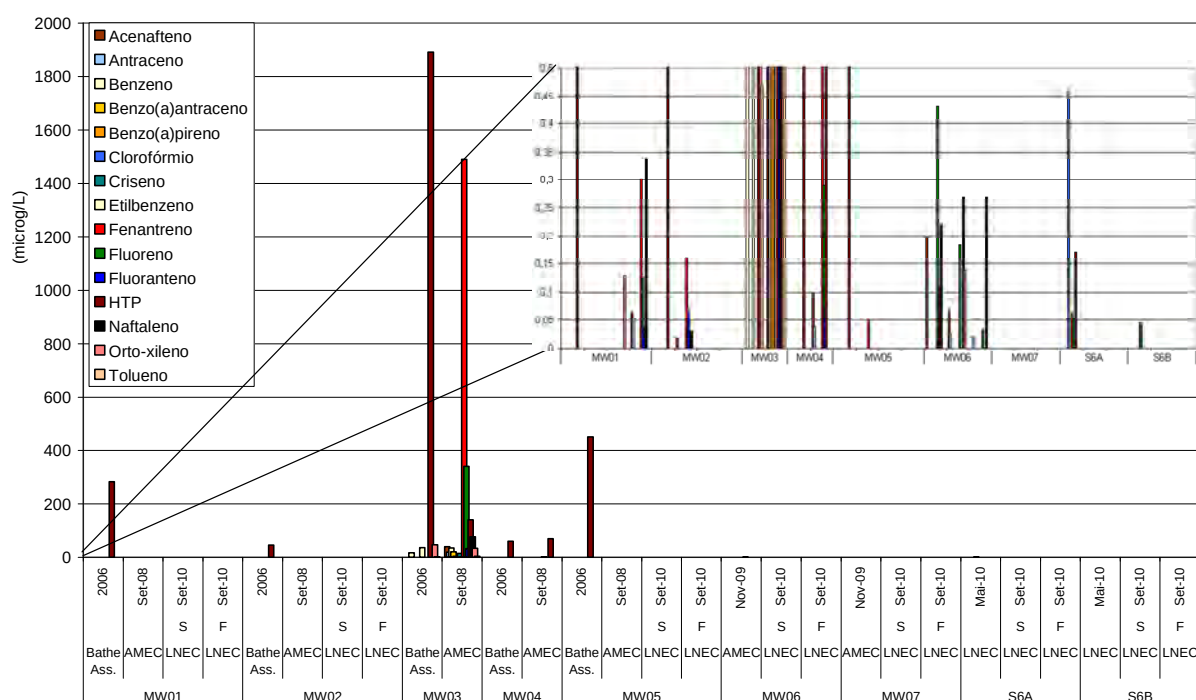


Fig. 99 – Concentração em PAHs, TPH e BTEX entre 2006 e 2010, em piezómetros na área junto à Porta de Armas

Quadro 21 – Qualidade das águas subterrâneas na área da Main Gate entre 2006 e 2010 para hidrocarbonetos

		MW01				MW02				MW03		MW04		MW05				MW06			MW07			S6A		S6B				
		Bathe Ass.	AMEC	LNEC	LNEC	Bathe Ass.	AMEC	LNEC	LNEC	Bathe Ass.	AMEC	Bathe Ass.	AMEC	Bathe Ass.	AMEC	LNEC	LNEC	AMEC	LNEC	LNEC	AMEC	LNEC	LNEC	LNEC	LNEC	LNEC	LNEC	LNEC		
		2006	Set-08	Set-10	S	2006	Set-08	Set-10	S	2006	Set-08	2006	Set-08	2006	Set-08	Set-10	S	Nov-09	Set-10	S	Nov-09	Set-10	S	Mai-10	Set-10	S	Mai-10	Set-10		
Hidrocarbonetos Totais do Petróleo - HTP																														
	mg/L	HTP	283	< l.d.	-	<0,1	46	< l.d.	-	<0,1	1891	140	60	69	451	< l.d.	-	<0,1	0,11	-	<0,1	<0,1	-	<0,1	0,17	-	<0,1	<0,1	-	<0,1
BTEX		BTEX	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,13	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	99,7	68,7	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,14	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	
	µg/L	Benzeno	-	< l.d.	-	<0,2	-	< l.d.	-	<0,2	16,13	34,5	-	< l.d.	-	< l.d.	-	<0,2	< 1	-	<0,2	< 1	-	<0,2	<0,2	-	<0,2	<0,2	-	<0,2
	µg/L	Etilbenzeno	-	-	-	<0,1	-	-	-	<0,1	35,87	-	-	-	-	-	-	<0,1	< 1	-	<0,1	< 1	-	<0,1	<0,1	-	<0,1	<0,1	-	<0,1
	µg/L	Meta-para xileno	-	< l.d.	-	<0,2	-	< l.d.	-	<0,2	-	-	-	< l.d.	-	< l.d.	-	<0,2	< 1	-	<0,2	< 1	-	<0,2	<0,2	-	<0,2	<0,2	-	<0,2
	µg/L	Orto-xileno	-	< l.d.	-	0,13	-	< l.d.	-	<0,1	47,23	34,2	-	< l.d.	-	< l.d.	-	<0,1	< 1	-	0,14	< 1	-	<0,1	<0,1	-	<0,1	<0,1	-	<0,1
	µg/L	Tolueno	-	-	-	<1	-	-	-	<1	0,47	-	-	-	-	-	-	<1	< 1	-	<1	< 1	-	<1	<1	-	<1	<1	-	<1
Compostos Orgânicos Voláteis Halogenados																														
	µg/L	Clorofórmio	-	-	<0,3	-	-	-	<0,3	-	-	-	-	-	-	-	<0,3	-	-	<0,3	-	-	<0,3	0,46	-	<0,3	<0,3	-	<0,3	
Hidrocarbonetos Aromáticos Polinucleares (PAH)		PAHs	< l.d.	< l.d.	0,12	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	57,1	< l.d.	0,038	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,2	0,022	0,096	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	
	µg/L	Acenafteno	-	-	0,066	<0,01	-	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	<0,01	-	0,2	<0,01	0,069	<0,05	<0,01	-	<0,01	<0,01	-	<0,01	<0,01	-	<0,01
	µg/L	Antraceno	-	< l.d.	0,054	<0,02	-	< l.d.	<0,02	-	-	19	-	0,038	-	< l.d.	<0,02	-	< 0,01	0,022	0,027	< 0,01	<0,02	-	<0,02	<0,02	-	<0,02	<0,02	-
	µg/L	Benzo(a)antraceno	-	< l.d.	<0,01	<0,01	-	< l.d.	<0,01	-	-	21	-	< l.d.	-	< l.d.	<0,01	-	< 0,01	<0,01	<0,01	< 0,01	<0,01	-	<0,01	<0,01	-	<0,01	<0,01	-
	µg/L	Benzo(a)pireno	-	< l.d.	<0,02	<0,02	-	< l.d.	<0,02	-	-	3,1	-	< l.d.	-	< l.d.	<0,02	-	-	<0,02	<0,02	-	<0,02	-	<0,02	<0,02	-	<0,02	<0,02	-
	µg/L	Criseno	-	< l.d.	<0,01	<0,01	-	< l.d.	<0,01	-	-	14	-	< l.d.	-	< l.d.	<0,01	-	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-	<0,01	<0,01	-	<0,01	<0,01	-
	µg/L	Fluoranteno	-	< l.d.	0,036	<0,03	-	0,07	<0,03	-	-	32	-	0,071	-	< l.d.	<0,03	-	0,013	<0,03	<0,03	<0,01	<0,03	-	<0,03	<0,03	-	<0,03	<0,03	-
	µg/L	Fluoreno	-	-	0,128	<0,02	-	-	<0,02	-	-	-	-	-	-	-	<0,02	-	0,43	0,034	0,183	<0,05	<0,02	-	0,052	<0,02	-	0,041	<0,02	-
	µg/L	Naftaleno	-	< l.d.	0,34	<0,1	-	0,031	<0,1	-	-	77	-	< l.d.	-	< l.d.	<0,1	-	0,22	0,27	0,27	<0,05	<0,1	-	<0,1	<0,1	-	<0,1	<0,1	-
	µg/L	Fenantreno	-	< l.d.	0,302	<0,03	-	0,16	<0,03	-	-	1490	-	0,66	-	0,051	<0,03	-	<0,05	<0,03	<0,03	<0,05	<0,03	-	0,064	<0,03	-	0,046	<0,03	-
	µg/L	Pireno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,058	-	-	<0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Os resultados permitem concluir que:

- há bastante heterogeneidade de concentrações entre as amostras realizadas em diferentes períodos e, também, a diferentes profundidades; esta variação pode dever-se ao seguinte conjunto de factores principais:
 - o a amostragem a diferentes profundidades, por vezes como resultado da variação do nível piezométrico;
 - o a migração dos poluentes encontrados num período para outros horizontes;
 - o a manutenção da fonte de contaminação com entrada de poluentes aumentada em época de recarga;
 - o a diminuição de poluentes após a sua recolha em processos de amostragem e/ou reabilitação.
- no DISCO Site 3001 há pelo menos duas plumas separadas de TPH com LNAPL no MW04 (que amostra as formações hidrogeológicas suspensas) e no MW03 (que amostra um nível mais profundo) (de acordo com AMEC, 2009) cujas concentrações estão acima dos valores permitidos;
- o sentido do escoamento subterrâneo nas formações suspensas processa-se, essencialmente, para SSE, observando-se concentrações de hidrocarbonetos no piezómetro FP3A;
- os hidrocarbonetos localizados a jusante do DISCO Site 3001, declarado como contaminado, não excedem os limites standard para os parâmetros que os têm definidos (cf. Quadro 20).

12.3.2 Poços localizados no concelho de Praia da Vitória

No período de 28 a 31 de Maio de 2010 foi realizada a única campanha para a recolha de amostras de água para análise química em 17 poços localizados no concelho de Praia da Vitória (Fig. 100).

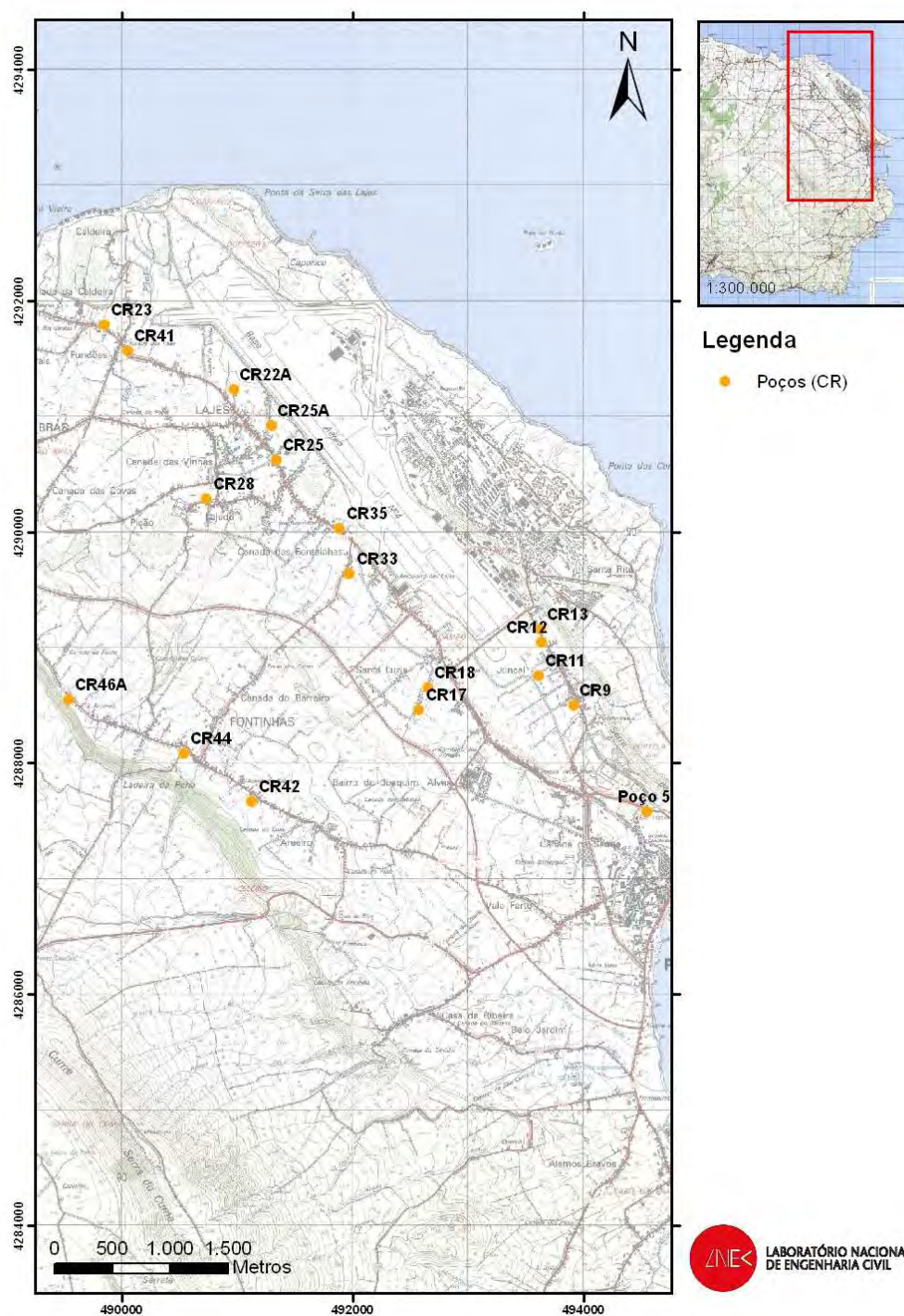


Fig. 100 – Localização dos poços amostrados na área de estudo

Esta análise visou realizar uma primeira caracterização geral das águas do concelho, o mais abrangente possível, e utilizando todas as infra-estruturas disponíveis. Foram excluídos todos os poços onde se registaram utilizações indevidas, a maioria devido à sua conversão em fossas sépticas.

Esta informação complementa a disponível em estudos anteriores e a recolhida nas novas infra-estruturas instaladas durante este Estudo, que se encontram mais centralizadas em torno das áreas potencialmente contaminadas. As recolhas efectuadas nos poços procuraram ser

representativas. Contudo, como a maioria dos poços não se encontra em funcionamento, apenas foi possível efectuar a recolha com balde inox ou bomba de fraca potência, com recolha de amostra sensivelmente a meio da coluna de água.

Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 22.

Como seria de esperar pela diversidade de localizações e de profundidades de recolha, com poços a captar pequenos aquíferos superficiais locais e outros aquíferos intermédios, a água apresenta características muito variadas, de fácies maioritariamente cloretada sódica e ainda bicarbonatada sódica (Fig. 101).

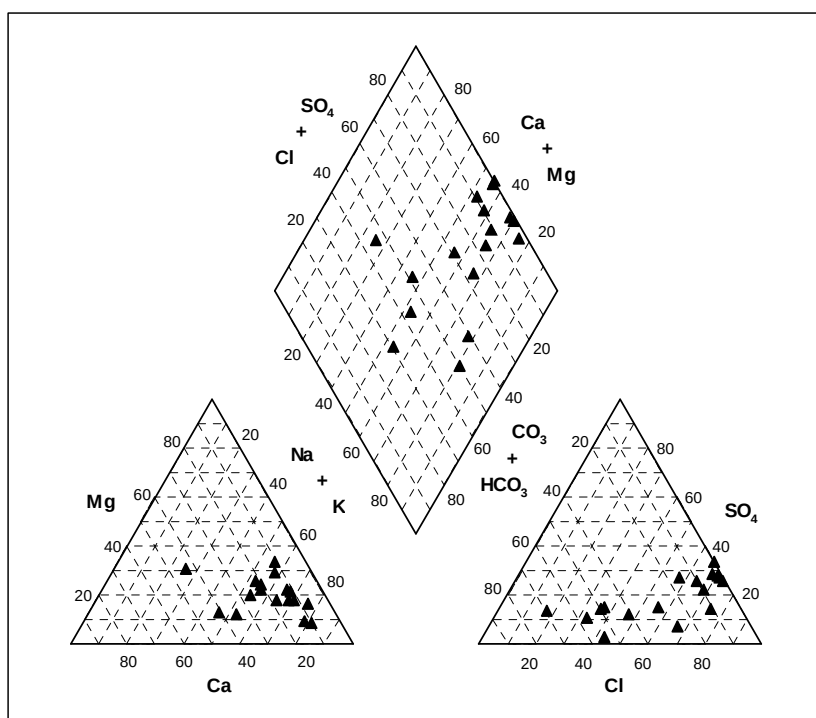


Fig. 101 – Diagrama de Piper para as águas de poços no concelho de Praia da Vitória

NQ - Normas de Qualidade, Anexo I da DAS, DL 208/2008
LQ - Limiar de Qualidade, Anexo II e VII da DAS, DL 208/2008 (definido em INAG, 2009)
VP - Valor Paramétrico, DL 306/2007 Qualidade da água destinada ao consumo humano

A análise dos resultados obtidos permite constatar a presença de diversos elementos acima dos valores standard utilizados. Um dos parâmetros é o nitrato que se encontra acima dos 50 mg/L em dez dos 17 pontos, com um valor de mediana de 80,8 mgNO₃/L, chegando ao valor máximo de 379 mgNO₃/L no ponto CR22A, muito possivelmente como resultado da densidade agro-pecuária (Fig. 102) e por efeito de contaminação dos muitos poços utilizados como fossas sépticas.



Fig. 102 – Ocupação agro-pecuária na ilha Terceira

Há diversos metais pesados com concentrações na água acima dos respectivos valores standard, nomeadamente: Al, Fe, Pb, Mn e V. Em todos os casos estas concentrações podem dever-se ao meio geológico por onde circulam, embora possam ter outras origens.

Relativamente à presença de hidrocarbonetos, a maioria das análises realizada é inferior ao limite de detecção. Há, contudo, quatro excepções para os seguintes elementos: clorofórmio, metil tert-butil éter (MTBE), PCB 52 e PCB 101. O clorofórmio é o único dos quatro elementos que aparece nas áreas potencialmente contaminadas. Desse modo, é mais provável que o aparecimento destes elementos se deva a contaminação local por rejeição directa.

12.3.3 Cabrito Fuel Tank Area/AOC-17

Nesta área foi efectuado um conjunto de oito sondagens referidas em Cleary *et al.* (1997). A profundidade das perfurações efectuadas, entre os 1,4 e os 4,7 m, não permitiu que se atingisse o nível freático, pelo que não foram nem instalados piezómetros nem recolhidas águas subterrâneas. Desconhece-se, assim, a qualidade dessas águas.

No trabalho acima referido constatou-se que a contaminação aparece localizada a cerca de 0,6 a 1,2 m abaixo da superfície do terreno, sendo a sua fonte o petróleo. Detectou-se a presença de TPH-DRO nos solos analisados.

12.3.4 Cinder Pit Fuel Tanks/Site 5002/AOC-26

Cleary *et al.* (1997) apresentam os resultados dos trabalhos de prospecção realizados em Agosto e Setembro de 1996. Foram efectuadas 12 sondagens para recolha de solos, com

profundidades que variaram entre 1,5 e 10,5 m. Em nenhum dos locais se atingiu o nível freático, pelo que não foram instalados piezómetros.

Desconhece-se a qualidade das águas subterrâneas subjacentes. Contudo, a presença nos solos analisados de TPH-DRO, por vezes acima dos valores de actuação definidos em Cleary *et al.* (1997), indicia que possa haver contaminação em profundidade. Neste local, os mesmos autores referem que a contaminação surge a profundidades de cerca de 1 m abaixo da superfície do terreno.

12.4 Caracterização da qualidade das águas subterrâneas no aquífero basal

12.4.1 Furos de captação para abastecimento ao concelho de Praia da Vitória

A recolha de amostras de água para análise química nos cinco furos de captação para abastecimento localizados no concelho de Praia da Vitória (Fig. 103) foi realizada em dois períodos diferentes: 28 e 31 de Maio, e 24 de Setembro de 2010, sensivelmente correspondentes ao final das épocas húmida e seca.

As recolhas foram efectuadas visando obter uma amostra representativa da água dos furos. Em quase todos os casos os furos encontravam-se em captação, sendo a excepção o Juncal 1 que foi posto a trabalhar durante o tempo suficiente para a recolha de uma amostra representativa.

Os resultados das análises químicas são apresentados no Quadro 23.

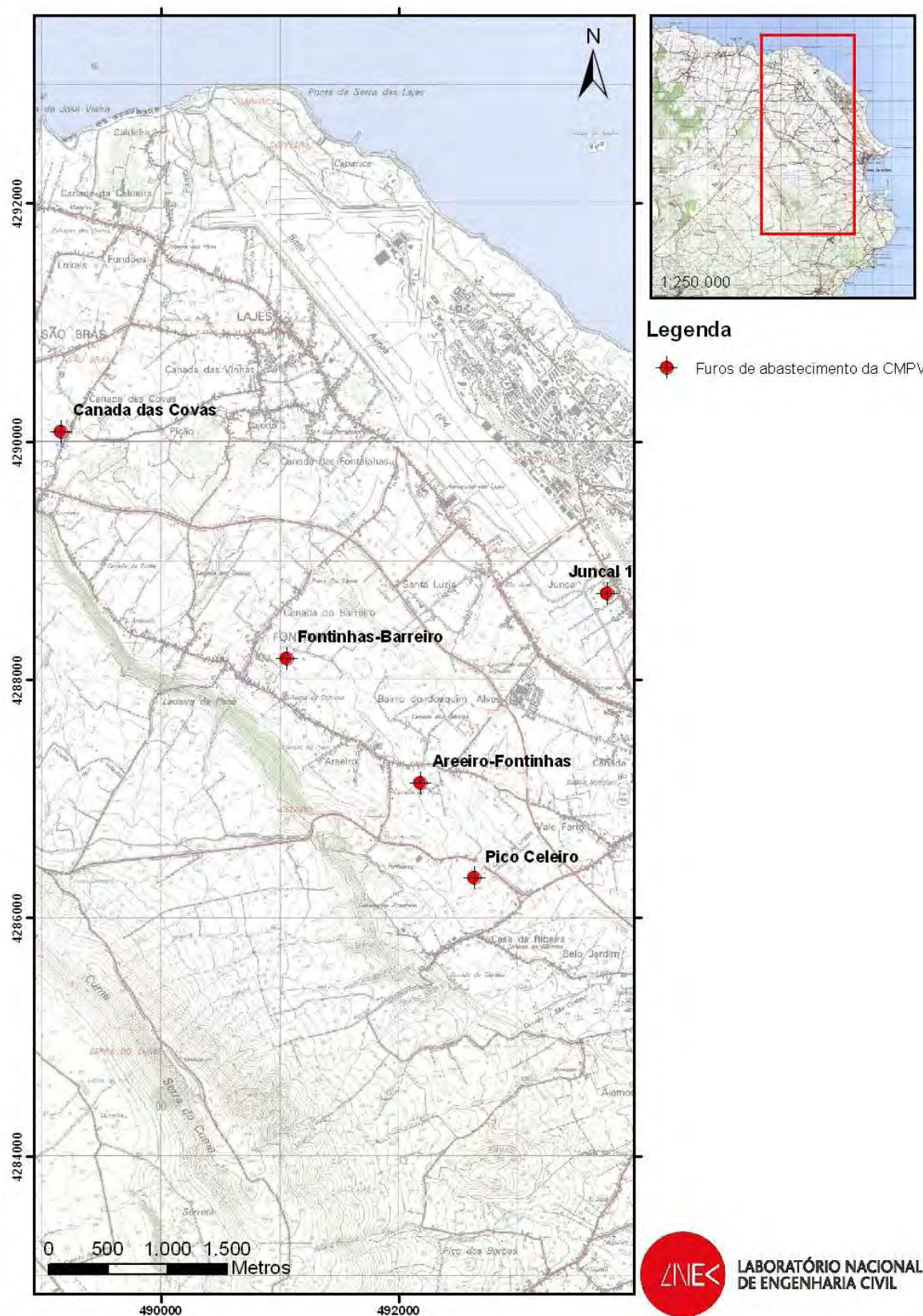


Fig. 103 – Localização dos furos de abastecimento da CMPV

Quadro 23 – Resultados das análises químicas efectuadas nas águas furos de captação para abastecimento do Praia da Vitória

			Designação local	Areiro-Fontinhas		Canada das Covas		Canada das Covas		Fontinhas-Barreiro		Fontinhas-Barreiro		Pico Celeiro		Pico Celeiro		Juncal 1		Juncal 1							
			Método amostragem	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba						
			Data amostragem	31-05-2010	24-09-2010	28-05-2010	24-09-2010	28-05-2010	24-09-2010	28-05-2010	24-09-2010	28-05-2010	24-09-2010	28-05-2010	24-09-2010	31-05-2010	24-09-2010	31-05-2010	24-09-2010	31-05-2010	24-09-2010						
			Hora amostragem	13:50		16:34				15:42				15:15		14:00		14:00									
Método	Análise	Unidade	Limite quantificação																		Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Norma	Valor	N.º ocorrências acima do valor
SMEWW 2550	Temperatura	oC	0,01	17,6	17,9	17,8	17,8	20,4	20,8	18,4	18,5	21,2	23,2	17,8	23,2	19,6	18,5				6,59	7,51	7,1	7,25	LQ	5,5; 9	0
SMEWW 4500 H° B	pH	Sorensen	0,05	7,10	7,51	6,20	6,59	7,13	7,43	6,80	7,25	6,80	6,81	6,59	7,51	7,1	7,25				513	1419	914,4	869	LQ	2500	0
NP EN 27888-1996	Condutividade eléctrica	µS/cm (20°C)	v	635	647	582	869	1225	1124	446	513	1674	1419	513	1419	914,4	869										
Parâmetros agregados																											
W-PHI-PHO	Índice de fenóis	mg/L	0,005	0,008	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,008	<0,005	0,005	0,01	0,008	<0,005	0,010	0,008	0,000	Canadá	0,89	0						
Inorgânicos não metálicos																											
W-ACID-PCT	Acidez pH 4.5	mmol/L	0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	< l.d.	<0,15									
W-ACID-PCT	Acidez pH 8.3	mmol/L	0,15	<0,15	<0,15	0,17	0,205	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	0,231	0,231	<0,15	<0,15	0,23	0,21	<0,15									
W-CO2F-CC2	Agressividade CO2	mg/L	0	0	3,92	0	7,48	0	3,23	0	3,62	0	4,01	0	0	7,5	4,5	1,6									
W-ALK-PCT	Alcalinidade pH 4.5	mmol/L	0,15	0,798	0,894	0,949	1,44	1,07	1,1	0,82	0,856	2,6	2,65	0,80	2,65	1,32	1,01										
W-ALK-PCT	Alcalinidade pH 8.3	mmol/L	0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	< l.d.	<0,15										
W-CO2F-CC2	Carbonatos	mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	< l.d.	0,0										
W-CL-IC	Cloretos	mg/L	1	131	185	129	256	353	334	81,5	41,7	389	379	41,7	389,0	227,9	220,5	LQ	250	5							
W-CO2F-CC2	Dióxido de carbono livre, CO2	mg/L	0	4,64	4,20	7,46	9	5,07	3,71	4,08	3,86	10,2	10,2	3,7	10,2	6,2	4,9										
W-CO2F-CC2	Bicarbonato	mg/L	0	48,7	54,6	57,9	87,9	65,2	66,9	50	52,2	159	162	48,7	162,0	80,4	61,6										
W-NO3-IC	Nitratos, N	mg/L	0,5	7,67	5,92	2,46	2,72	1,98	1,6	9,85	6,56	4,83	4,82	1,6	9,9	4,8	4,8										
W-NO3-IC	Nitratos	mg/L	2	33,9	26,2	10,9	12	8,75	7,1	43,6	29	21,4	21,3	7,1	43,6	21,4	21,4	NQ	50	0							
W-SO4-IC	Sulphate as SO4 2-	mg/L	5	19,1	23,7	22,2	34,5	50,6	41	12,5	12,3	46,1	44,7	12,3	50,6	30,7	29,1	LQ	250	0							
W-CO2F-CC2	Total de dióxido de carbono livre, CO2	mg/L	0	39,8	43,6	49,2	72,4	52,1	52	40,2	41,5	125	127	39,8	127,0	64,3	50,6										
Metais em solução / Cátions maiores																											
W-METAXFL1	Alumínio - Al	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	< l.d.	<0,01	VP	0,2	0							
W-METAXFL1	Antimônio - Sb	mg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	< l.d.	<0,01	VP	0,005	0							
W-METAXFL1	Arsénio - As	mg/L	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	< l.d.	<0,005	LQ	0,01	0							
W-METAXFL1	Bário - Ba	mg/L	0,0005	0,00154	0,00199	0,00311	0,00691	0,00506	0,00518	0,00317	0,00321	0,0105	0,0103	0,0015	0,0105	0,0051	0,0041	Canadá	1	0							
W-METAXFL1	Berílio - Be	mg/L	0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	< l.d.	<0,0002	Canadá	0,004	0							
W-METAXFL1	Boro - B	mg/L	0,01	0,026	0,033	0,031	0,035	0,038	0,026	0,03	0,109	0,105	0,026	0,026	0,109	0,049	0,034	Canadá	5	0							
W-METAXFL1	Cádmio - Cd	mg/L	0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	0,00044	<0,0004	<0,0004	<0,0004	0,00043	<0,0004	0,0004	0,0004	<0,0004	LQ	0,005	0							
W-METAXFL1	Cálcio - Ca	mg/L	0,005	16,6	18,5	9,03	27,6	26,9	12,2	11,9	35	32,1	9,0	35,0	20,7	17,9											
W-METAXFL1	Crómio - Cr	mg/L	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	< l.d.	<0,001	VP	0,05	0							
W-METAXFL1	Cobalto - Co	mg/L	0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	< l.d.	<0,002	Canadá	0,0038	0							
W-METAXFL1	Cobre - Cu	mg/L	0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	< l.d.	<0,002	VP	2	0							
W-METAXFL1	Ferro - Fe	mg/L	0,002	0,0064	0,0031	0,0055	0,108	0,0294	0,0198	<0,002	0,0021	<0,002	<0,002	<0,002	0,11	0,025	0,004	VP	0,2	0							
W-METAXFL1	Chumbo - Pb	mg/L	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	< l.d.	<0,005	LQ	0,01	0							
W-METAXFL1	Lítio - Li	mg/L	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,0029	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,003	0,003	<0,001										
W-METAXFL1	Magnésio - Mg	mg/L	0,003	13,4	14,6	9,46	18,7	21,6	20,4	9,85	9,28	39,2	34,3	9,3	39,2	19,1	16,7										
W-METAXFL1	Manganeso - Mn	mg/L	0,0005	0,00195	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,00291	0,00257	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,00291	0,0	<0,0005	VP	0,05	0							
W-HG-AFSFL	Mercurio - Hg	µg/L	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	< l.d.	<0,01	LQ	1	0							
W-METAXFL1	Molibdeno - Mo	mg/L	0,002	<0,002	<0,002	0,0044	<0,002	0,0024	0,0057	<0,002	<0,002	0,0023	0,003	<0,002	0,006	0,004	0,0002	Canadá	0,07	0							
W-METAXFL1	Níquel - Ni	mg/L	0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,0021	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,002	0,002	<0,002	VP	0,02	0							
W-METAXFL1	Fósforo - P	mg/L	0,01	0,072	0,07	0,111	0,093	0,085	0,076	0,107	0,093	0,123	0,116	0,07	0,123	0,095	0,093										
W-METAXFL1	Potássio - K	mg/L	0,015	4,91	5,44	6,17	9,17	8,8	4,46	4,19	13,8	13,2	4,19	13,800	7,889	7,46											
W-METAXFL1	Selénio - Se																										

A análise dos resultados obtidos permite constatar que a água de abastecimento apresenta boa qualidade, sendo apenas o cloreto, e num caso o sódio e o vanádio, os três parâmetros que podem apresentar valores acima dos valores standard utilizados. Em relação à concentração de cloretos, enquanto que no furo de Fontinhas – Barreiro e de Juncal 1 se observa alguma estabilidade, ou mesmo decréscimo na campanha pós-Verão, o furo da Canada das Covas apresenta uma concentração de quase o dobro em relação à 1.^a campanha, concordante com o aumento de condutividade eléctrica. Se compararmos este valor com informação fornecida pela CMPV ao LNEC por e-mail, em 2010-03-08, Quadro 24 relativamente à qualidade das águas subterrâneas dos furos de abastecimento de água, vemos uma oscilação da concentração que deverá continuar a ser controlada pela entidade abastecedora.

Quadro 24 – Concentrações hidroquímicas nos furos de abastecimento de água da CMPV

Furo	Cloretos (mg/L)	Sódio (mg/L)	Condutividade eléctrica (µS/cm)
Juncal 1	372	188	1 455
Areeiro	153	99	663
Fonte Bastardo	197	115	774
Pico Celeiro	17	86	158
Canada das Covas	131	95	609
Barreiro	367	178	1 394

O valor de sódio mais elevado observou-se também na amostra do Juncal 1 com maior concentração de cloretos, resultante de processos de intrusão marinha.

A presença de vanádio acima do valor definido na legislação do Canadá, 0,0062 mgVn/L, para condições standard em condições de águas subterrâneas potáveis não impede que todas as amostras de água apresentem uma concentração inferior a 0,25 mgVn/L, valor acima do qual a água não é potável (cf. mesma legislação). O vanádio é um elemento ubíquo, com uma abundância na crosta terrestre da mesma ordem de grandeza do Ni, Cu, Zn e Pb (Alloway, 1990); a sua presença em ambientes ígneos em associação com magmas básicos é referida na literatura. Contudo, o mesmo autor refere o V como o principal elemento traçador de produtos de petróleo, em especial da sua fracção pesada, embora enfatize a sua elevada retenção com a fracção da matéria orgânica do solo. Os resultados apresentados na Fig. 104 permitem observar que este elemento não apresenta concentrações mais elevadas junto aos locais contaminados, nem da *South Tank Farm* nem junto à Porta de Armas, pelo que a presença deste elemento se deverá ao ambiente geológico onde circulam as águas subterrâneas.

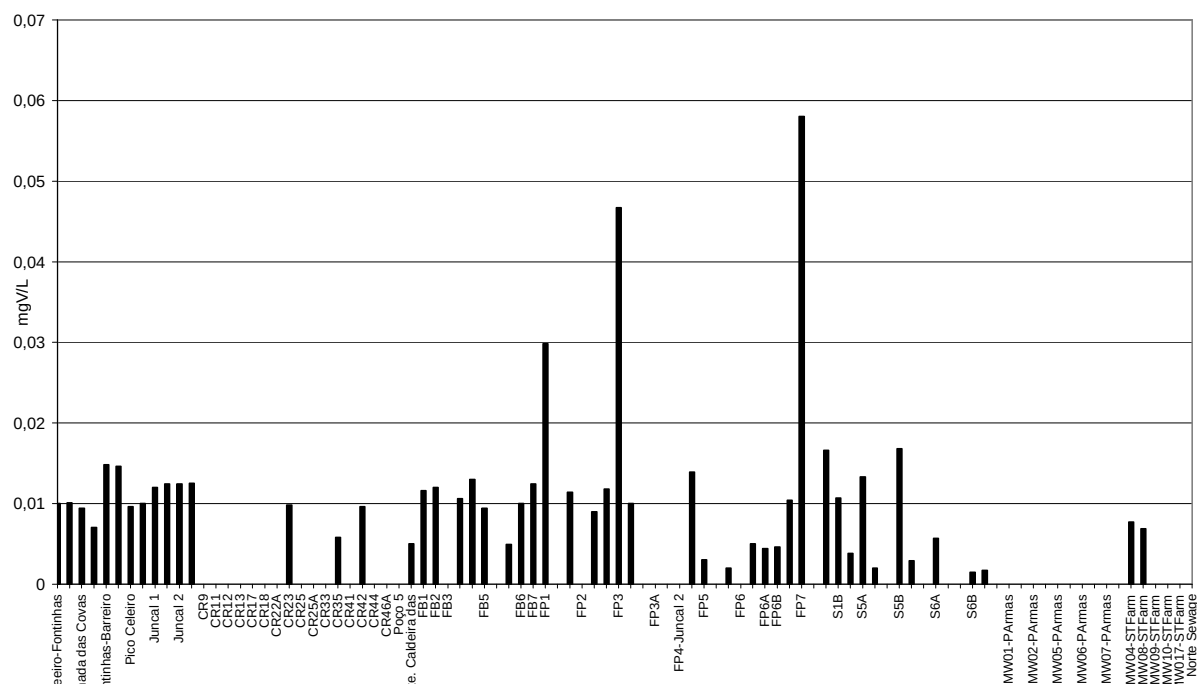


Fig. 104 – Distribuição da concentração do vanádio nos pontos de água amostrados

Observa-se uma estabilidade química nas águas dos furos (cf. Fig. 105), com excepção do furo da Canada das Covas que apresenta oscilação de diversos parâmetros, tratando-se de águas com fácies clorética sódica.

Ainda de referir que as análises de hidrocarbonetos revelaram que todos os resultados são inferiores aos limites de qualidade utilizados, sendo a grande maioria inferiores ao próprio limite de detecção. Contudo, não é de desprezar a detecção, embora não confirmada na segunda análise efectuada, de baixas concentrações relativas à presença de alguns hidrocarbonetos nos furos do Pico Celeiro e do Juncal 1, no primeiro caso relativo a acenafeno e no segundo a antraceno, fenantreno e fluoreno, todos claramente abaixo dos limites standard. A sua localização a jusante de locais referidos como contaminados (e.g. Porta de Armas), onde estes elementos foram detectados (Fig. 106), impele a continuada futura análise destes parâmetros de forma a monitorizar a eventual evolução da situação.

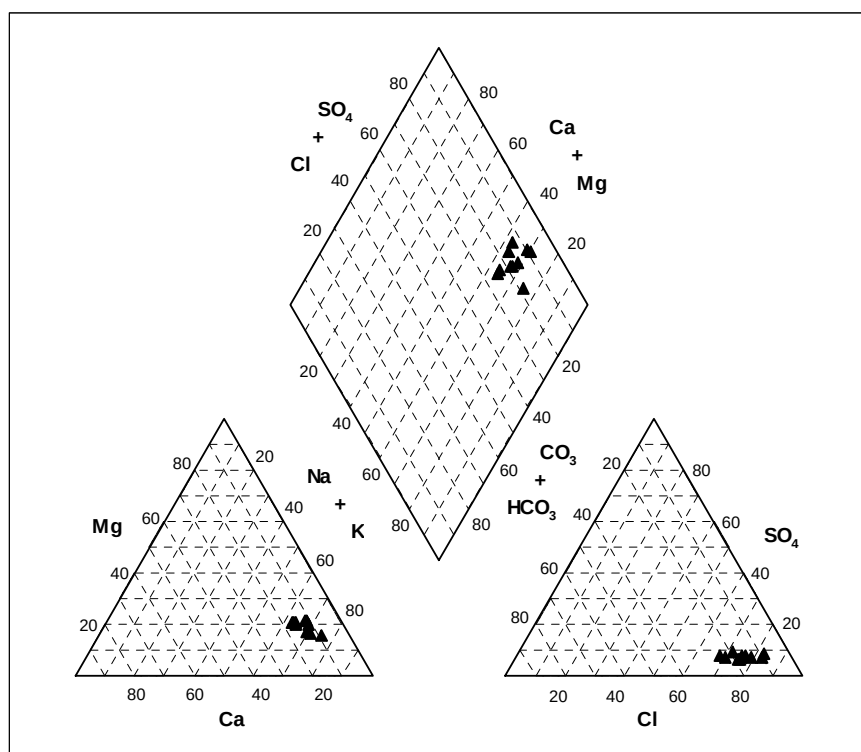


Fig. 105 – Diagrama de Piper para as águas de abastecimento público da CMPV

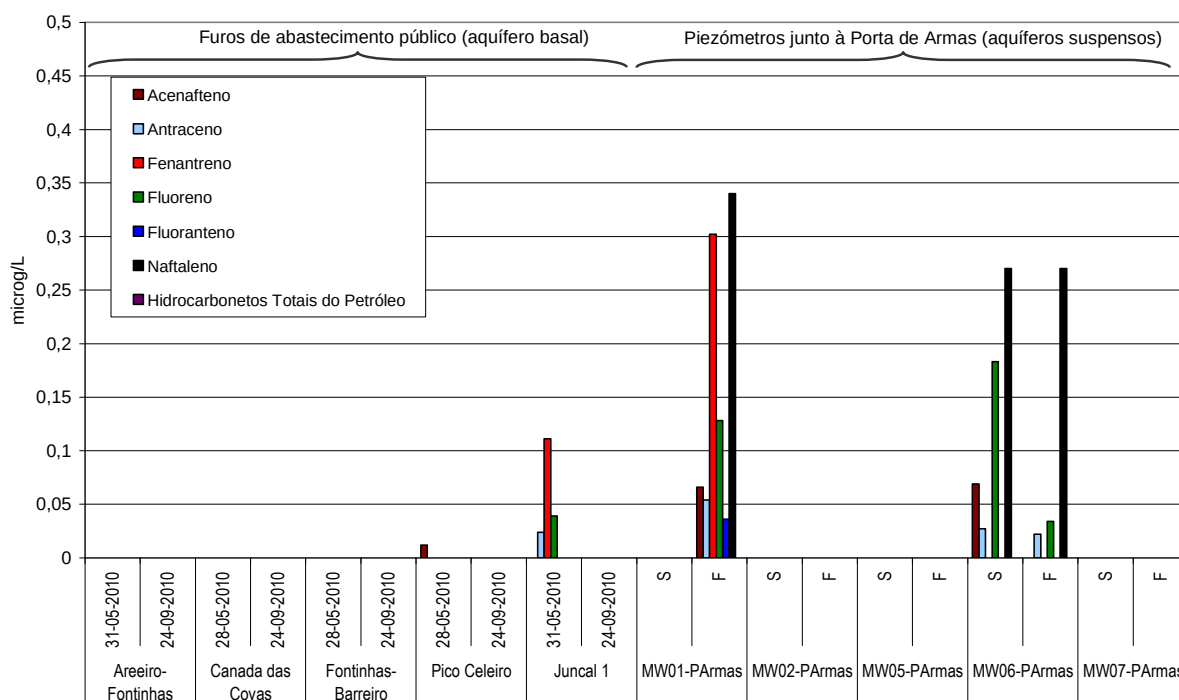


Fig. 106 – Concentração em PAHs e TPH nos furos de abastecimento e nos piezômetros da Porta de Armas

Cleary *et al.* (1997) referem ter efectuado, entre Agosto e Setembro de 1996, a amostragem dos furos de captação Juncal 1 e 2, bem como de nascentes, para análise de um conjunto de

hidrocarbonetos do petróleo, cujos detalhes não são explicitados. O relatório refere que em nenhum deles foram encontrados valores acima dos limites de detecção utilizados, cujo valor também se desconhece.

12.4.2 Furos de captação para abastecimento da Base das Lajes

A informação relativa aos furos de abastecimento da Base das Lajes não foi actualizada neste estudo por se tratar de uma área colateral de interesse relativamente aos objectivos do presente estudo. Os dados analisados referem-se à década de 1990. Registava-se uma elevada concentração em cloretos na água dos furos de abastecimento da base aérea americana das Lajes, verificando-se um aumento da concentração de cloretos como decorrer do tempo de bombagem.

Segundo informação de Allen e Hoshall (1990) todos os furos amostrados apresentavam cloretos acima dos limites da USEPA Secondary Drinking Water Quality, *i.e.* 250 mg/l. O Well #5 tinha 610 mg/l de concentração em cloretos após várias horas de bombagem e também excedeu o Total de Sólidos Dissolvidos, apresentando valores de 1165 mg/l. O teor de cloretos era superior quando, em paralelo com o Well #5, se punham em extracção os furos na sua vizinhança, em especial se estes fossem os Well #1 e Well #3. O total de sólidos dissolvidos tende a diminuir do Well #1 para o Well #3.

De acordo com Allen e Hoshall (1990), os dados disponíveis sugerem que o campo de furos estava a extrair água em quantidades excessivas e, especialmente os furos Well #1 e Well #5. Referem uma sobreexploração do aquífero e consequente deterioração da qualidade da água, provocando a salinização das zonas de captação dos furos. Uma indicação da qualidade e dos problemas de salinização nestes furos é apresentada no Quadro 25. É referido que quando o Well #5 deixa de estar em bombagem a qualidade da água melhora significativamente mas que no espaço de 2 a 3 horas de bombagem, quando em combinação com as bombagens de outros furos vizinhos, a qualidade da água se deteriora, o que indicia segundo os autores que os cloretos estão a ser transmitidos à zona de influência de rebaixamento do Well #5. O Well #4, quando é explorado com uma bomba de grande potência, regista igualmente uma degradação na qualidade das águas, mas não ao mesmo ponto do Well #5.

Quadro 25 – Valores das concentrações (em ppm) de cloretos nos furos da base das Lajes até 1990
(Allen e Hoshall, 1990)

	1982	1983	1984	1987	1990
Well #1	--	360	372	400	390
Well #2	--	--	--	≈ 250	300
Well #3	--	--	--	≈ 250	--
Well #4	--	440	356	--	--
Well #5	> 250	--	--	640	420
					610
Well #8	--	--	--	< 240	270

CH2M HILL (2004) realizou um estudo para analisar a qualidade das águas subterrâneas na área da base das Lajes que incluiu oito furos de abastecimento da Base e os cinco furos de

monitorização ainda existentes na *South Tank Farm/AOC-1*. O trabalho de monitorização decorreu nos dias 1 e 2 de Julho de 2004.

De acordo com CH2M HILL (2004) os furos de abastecimento encontram-se a captar o aquífero de base, com bombas de captação localizadas entre os 56 e 82 m de profundidade. Uma parte dos furos foi instalada nos anos 50 (Wells 1, 3, 4 e 5). O Well 8 foi instalado em 1963, e os Well 2 e 10 em 1997. O Well 6 foi abandonado antes de 1982, encontrando-se numa área reconhecida como contaminada. Finalmente, o Well 7 foi demolido aquando das obras de edificação em Junho de 2004. Os furos de abastecimento têm diâmetros de 12" e estão construídos em aço.

No sumário da análise efectuada, CH2M HILL (2004) refere que foram encontradas concentrações baixas em três de quatro trihalometanos no Well 1, não sendo proferidos outros comentários sobre os resultados. Com base nos dados em bruto que foi possível analisar, observam-se em diversos furos uma baixa concentração em oxigénio dissolvido, possivelmente resultante da criação de um ambiente anóxico por degradação de hidrocarbonetos, a presença de hidrocarbonetos (Well 1, 2, 3, 4 e 8, este último só com fenol), bem como de VOCs (PCE) e de metais pesados (Fe, Mn, Zn, Pb, Ba, Cr e Ni) no Well 1.

Bhate Associates (2008) também apresenta os resultados de qualidade para alguns furos de monitorização, embora os dados individuais e quais os furos não sejam discriminados sendo apenas feita uma descrição geral de que não se encontraram nem compostos voláteis nem semi-voláteis, mas sim metais pesados e compostos derivados de gasolina e de diesel. De entre os metais pesados é referida a presença de bário, crómio e chumbo em dois pontos. As concentrações de Ba, Cr e Pb num dos piezómetros referido foram 1485, 97,5 e 656 µg/l, respectivamente e num outro detectou-se 301 µg/l de Pb. É, ainda, referido que no final da operação de amostragem o nível da água se situava a 23,5 m de profundidade.

No estudo efectuado por CH2M HILL (2004) foram detectados os seguintes poluentes nos furos de abastecimento à Base das Lajes (cf. Quadro 26), cuja origem de alimentação subterrânea provém de SW, na área da Serra do Cume atravessando o *pipeline* do Cabrito, e não nas áreas poluídas analisadas neste Estudo (Fig. 76).

Quadro 26 – Concentrações hidroquímicas nos furos de captação para abastecimento da Base das Lajes (extraído de CH2M HILL, 2004)

Águas	Well 1	Well 2	Well 3	Well 4	Well 5	Well 8	Well 9	Well 10
Análise								
C12-C28 (mg/kg)	--	--	23,1	--	--	--	--	--
Alcalinidade em CaCO ₃ (µg/l)	70 400	111 000	91 100	102 000	99 300	101 000	142 000	146 000
Alumínio (µg/l)	61,1	9,69	83,6	7,18	6,76	7,03	7,36	9,46
Antimônio (µg/l)	0,599	--	--	--	--	--	--	--
Arsénico (µg/l)	3,86	2,32	2,87	1,93	2,36	1,66	1,83	2,31
Bário (µg/l)	112	9,79	9,97	5,68	9,4	11,3	6,48	4,46
Berílio (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
Cádmio (µg/l)	6,78	--	0,226	--	--	--	--	--
Crômio (µg/l)	89,8	12,6	7,19	5,69	8,11	4,57	10,8	10,3
Cobalto (µg/l)	30,6	--	0,399	--	--	--	--	--
Cobre (µg/l)	35,3	3,53	42,3	6,8	5,28	45,6	2,15	1,74
Chumbo (µg/l)	219	0,5	13,2	1	0,399	8,29	0,323	0,22
Ferro (µg/l)	151 000	135	7 230	146	121	181	162	135
Manganês (µg/l)	8 510	1,63	133	4,02	0,783	5,08	6,23	2,13
Mercúrio (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
Níquel (µg/l)	1 840	2,21	4,04	1,01	0,661	1,78	1,14	1,25
Prata (µg/l)	0,133	--	--	--	--	--	--	--
Selênio (µg/l)	2,94	4,18	3,27	3,66	4,25	4,35	4,04	4,57
Tálio (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
Vanádio (µg/l)	102	17,3	20,8	17,2	16,4	13,7	18,6	18,6
Zinco (µg/l)	25 600	52,7	147	20,6	11,8	43,6	14,9	24,5
C12-C28 (µg/l)	--	--	23,1	--	--	--	--	--
C12 (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
1,1-dicloroetano (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
1,2,4-trimetilbenzeno (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
2-metilnaftaleno (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
Acenafteno (µg/l)	--	0,0173	--	--	--	--	--	--
Acenaftileno (µg/l)	--	0,0151	0,029	--	--	--	--	--
Ácido benzóico (µg/l)	1,45	--	0,998	--	--	--	--	--
Antraceno (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
Benzeno (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
Benzo[a]antraceno (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--

Águas	Well 1	Well 2	Well 3	Well 4	Well 5	Well 8	Well 9	Well 10
Análise								
Bis(2-etilexil)ftalato (µg/l)	--	--	1,52	--	--	--	--	--
Bromodiclorometano (µg/l)	0,09	--	--	--	--	--	--	--
Bromofórmio (µg/l)	8,24	--	--	--	--	--	--	--
Clorofórmio (µg/l)	0,23	--	--	--	--	0,07	--	--
Cloreto de metileno (µg/l)	0,09	0,08	0,09	--	0,09	--	0,08	--
Criseno (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
Dibenzofurano (µg/l)	--	0,0444	--	--	--	--	--	--
Dibromoclorometano (µg/l)	0,47	--	--	--	--	--	--	--
Dietilftalato (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
Dimetilftalato (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
Di-n-octilftalato (µg/l)	0,222	--	0,125	--	--	--	--	--
Etilbenzeno (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
Fenantreno (µg/l)	--	0,026	--	--	--	--	--	--
Fenol (µg/l)	--	--	--	--	--	0,244	--	--
Fluoranteno (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
Fluoreno (µg/l)	--	0,044	--	--	--	--	--	--
Isopropilbenzeno (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
m,p-xileno	--	--	--	--	--	--	--	--
n-butilbenzeno (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
n-propilbenzeno (µg/l)	0,09	--	--	--	--	--	--	--
Naftaleno (µg/l) – método de análise SW8260B	0,16	--	--	--	--	--	--	--
Naftaleno (µg/l) – método de análise SW8270C	--	--	--	--	--	--	--	--
o-xileno	--	--	--	--	--	--	--	--
p-isopropitolueno	--	--	--	--	--	--	--	--
Pireno (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
sec-butilbenzeno	--	--	--	--	--	--	--	--
t-butilbenzeno (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
Tetracloroeteno (µg/l)	0,08	--	--	--	0,06	--	--	--
Tolueno (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
Cloretos (µg/l)	107 000	200 000	176 000	188 000	200 000	200 000	200 000	199 000
Azoto (em fase NO ₃) (µg/l)	8 590	3 480	4 180	3 990	3 770	7 180	5 450	3 450
Azoto (em fase NO ₂) (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--	--
Sulfatos (µg/l)	16 600	34 800	24 600	26 800	32 100	35 800	34 600	33 900

12.4.3 South Tank Farm/Site 5001/AOC-1

Importa começar por assinalar que Schaller (2009) considera que nem todos os piezómetros localizados dentro do perímetro estão totalmente ligados ao aquífero basal, nomeadamente referindo que os piezómetros MW17 e MW20 não captam o bedrock basáltico mas uma pequena secção dos sedimentos argilosos saturados que se localizam sobre o aquífero basal.

A monitorização do Site 5001 foi efectuada através da recolha de amostras de água para análise química em cinco piezómetros da Base Americana (MW, *monitoring wells*), no dia 31 de Maio de 2010. Esta análise foi complementada com a recolha de amostras de água, entre Maio e Setembro de 2010, em três piezómetros (S5A, S5B, FP5) e num furo (FB5), instalados no decurso do presente Estudo, de forma a analisar a eventual migração de contaminantes (Fig. 107).

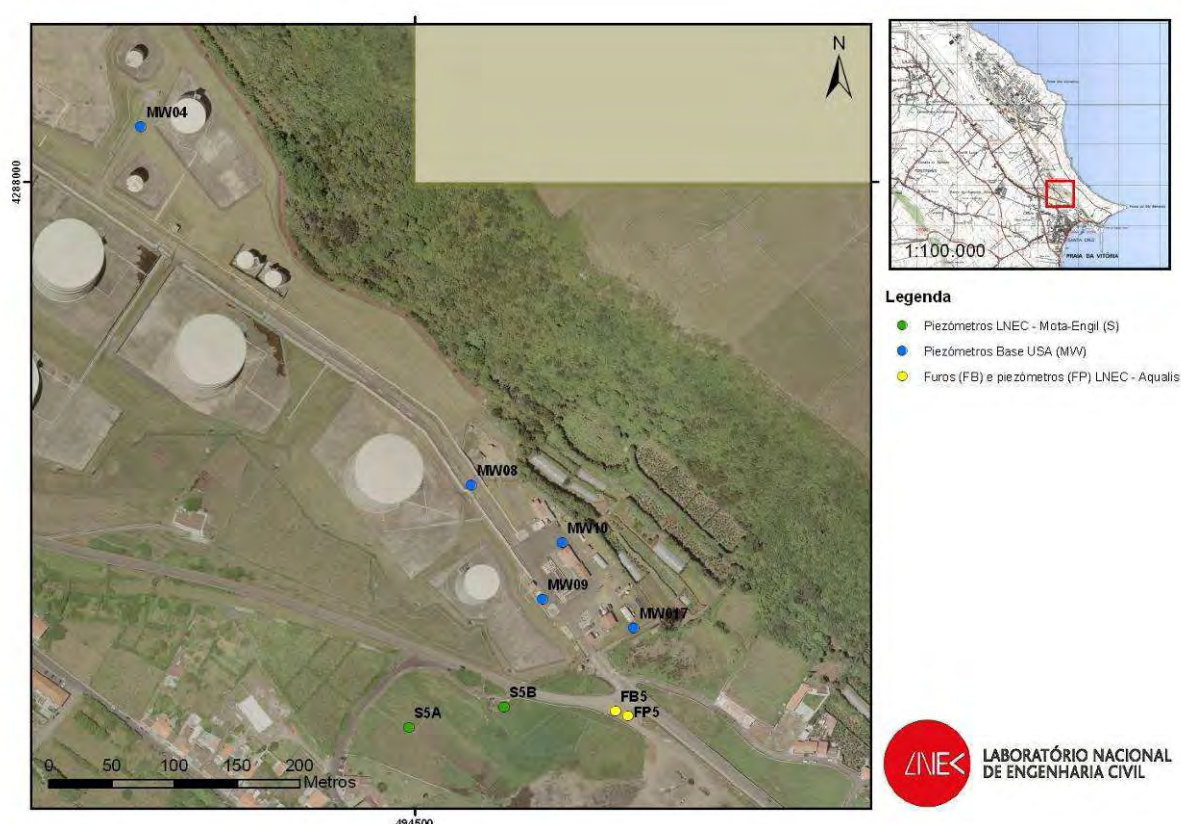


Fig. 107 – Localização dos pontos de monitorização na área junto à *South Tank Farm*

Apenas a recolha no FB5 foi realizada tendo em vista obter uma amostra representativa da água do furo. Nos restantes casos a amostragem foi realizada a meio da coluna de água, junto à superfície piezométrica ou no fundo do piezómetro, conforme o caso indicado no Quadro 27, com recurso a uma bomba peristáltica ou bailer (Fig. 108 e Fig. 109).



Fig. 108 – Recolha de amostra com recurso a uma bomba peristáltica de baixo caudal

Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 27.

Dos 105 hidrocarbonetos analisados, observou-se a ocorrência de 48, todos em piezómetros localizados dentro do perímetro da *South Tank Farm*, e com concentrações extremamente elevadas. Os pontos MW08 e MW09 são os mais contaminados, observando-se inclusive a presença de cerca de 24 cm de produto de petróleo sobrenadante no MW08 (Fig. 109).



Fig. 109 – Fotografia de LNAPL sobrenadante na água do ponto MW08

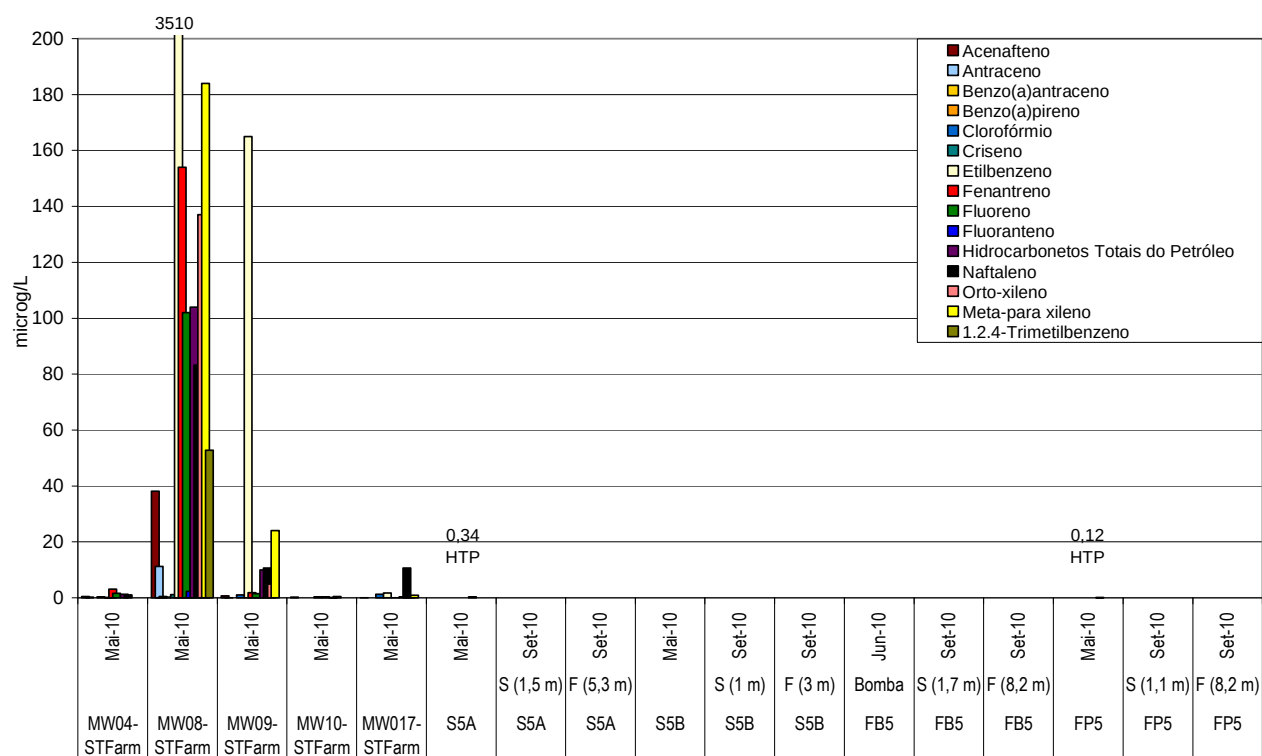


Fig. 110 - Concentração em PAHs, TPH e BTEX em 2010, em piezômetros na área junto à South Tank Farm

Contudo, conforme se pode observar no Quadro 29, o conjunto de hidrocarbonetos encontrado é mais vasto que o apresentado na Fig. 110. Esta figura apresenta os resultados obtidos para os mesmos parâmetros representados na Fig. 99, de forma a ter um ponto de comparação entre os dois locais.

Apesar da presença significativa e muito acima do permitido dentro do perímetro da *South Tank Farm*, assinala-se a quase ausência de hidrocarbonetos nos piezómetros e no furo localizados a jusante (Fig. 76) daquele local, em ambas as campanhas e às diferentes profundidade de recolha de amostras. Apenas foi detectada a presença de HTPs, e abaixo do valor standard, numa das amostras dos pontos FP5 e S5A.

Em termos de evolução histórica deste local, Cleary *et al.* (1997) apresentam os resultados dos trabalhos realizados na área de *South Tank Farm/AOC-1* em Agosto e Setembro de 1996. Estes consistiram na perfuração manual de 15 sondagens para recolha de solos, locais em que foram posteriormente instalados piezómetros (cinco dos quais ainda se encontravam operacionais em 2010), sempre que foi encontrado o nível piezométrico. Encontraram-se nessa situação nove dos 15 locais onde foram instalados piezómetros de 2", em PVC, para monitorização e amostragem de águas subterrâneas. A profundidade das perfurações variou entre 0,68 e 12,1 m, tendo sido instalados piezómetros apenas para as perfurações com profundidades superiores a 4,35 m, valor a partir do qual se encontrou o nível freático.

O objectivo deste trabalho foi determinar áreas potencialmente contaminadas por armazenamento de combustível e operações associadas para cada um dos locais, nos solos e nas águas subterrâneas.

Em seis dos nove piezómetros, a amostragem foi efectuada após a purga do equivalente a três volumes de água; nos outros três pontos de água, devido à pequena espessura saturada, foram efectuadas amostragens com recurso a um amostrador.

Os parâmetros analisados em laboratório foram: TPH-DRO (hidrocarbonetos totais do petróleo, componentes do diesel); TPH-GRO (hidrocarbonetos totais do petróleo, componentes da gasolina); tetracloreto (PCE); benzeno; etilbenzeno; xileno e 1,3,5 trimetilbenzeno. Foram igualmente analisados no local os valores de temperatura, condutividade eléctrica, pH e Eh.

Os resultados obtidos permitiram concluir haver hidrocarbonetos sobrenadantes no ponto MW08, tal como encontrado em 2010 pelo LNEC, cujo cromatograma identificou como sendo semelhante ao JP-8 jet fuel. Nesse mesmo ponto foi detectada a presença de TPH-DRO acima do nível considerado para actuação. As concentrações de TPH-GRO não excediam o VMA para o conjunto de pontos amostrados, embora a sua presença fosse detectada em seis dos nove pontos. De referir que os limites de detecção então utilizados variaram de 100 até 10 000 µg/l, sendo este último demasiado elevado. Em sete pontos foi detectada a presença de etilbenzeno, por duas vezes acima do nível de actuação. Também o benzeno foi encontrado em cinco amostras de água, duas das quais com valores acima do nível de actuação, pese embora a referência efectuada no relatório de que a sua presença se deve a erros em laboratório, aspecto também referido para uma das amostras de etilbenzeno. Finalmente, o xileno e o 1,3,5 trimetilbenzeno também foram detectados nas escassas amostras onde foram analisados, apresentando-se em baixas concentrações.

Em 2004, CH2M HILL (2004), também referido por Schaller *et al.* (2005), realizou um estudo que incluiu a análise da qualidade das águas subterrâneas em 5 furos de monitorização ainda existentes na *South Tank Farm/AOC-1*, os mesmos posteriormente utilizados pelo LNEC para amostragem. Dos 164 parâmetros analisados foram detectados 62 no conjunto de análises efectuadas.

Os resultados obtidos confirmaram a presença de hidrocarbonetos de petróleo, provavelmente de diesel, sobrenadando 26 cm o nível de água saturado, no MW08, tal como já havia sido detectado em 1997, agora alastrada até ao piezómetro MW09, localizado a SE, com 5,1 cm de produto livre sobrenadante. As concentrações de produto livre sobrenadante são equivalentes nos dois pontos ($> 1\text{ kg/kg}$), embora a dissolução na água seja muito inferior no ponto MW09, o que os autores atribuem a um processo de contaminação mais recente. Também os pontos MW10 e MW17 apresentam concentrações assinaláveis de hidrocarbonetos do petróleo na água amostrada, confirmando uma provável migração da pluma para SE.

CH2M HILL (2004) revela, ainda, a presença de vários metais – Al, Sb (só no MW8), As, Ba, Co, Fe (em teores muito elevados), Pb, Mn, Se – nos piezómetros MW08 e MW09; um espectro similar de contaminação por hidrocarbonetos e metais ocorre também no piezómetro MW17. Cleary *et al.* (1997) refere que durante as campanhas de monitorização, com a excepção das águas do piezómetro MW02, extraídas antes da purga dos mesmos, todas apresentavam mais de 50 ppm de voláteis totais; segundo estes autores, os pontos mais críticos são em MW08, MW011, MW015, MW17-01 e que o único ponto sem detecção de hidrocarbonetos era em MW010.

No Quadro 28 indicam-se os valores dos diversos contaminantes nos furos de monitorização na *South Tank Farm*, detectados pelo estudo efectuado por CH2M HILL (2004).

Quadro 28 – Concentrações hidroquímicas nos furos de monitorização da *South Tank Farm* (extraído de CH2M HILL, 2004)

Águas	MW4	MW8	MW9	MW10	MW17	MW8 fase óleo livre	MW9 fase óleo livre
Análise							
C12-C28 (mg/kg)	47,3	--	--	--	--	1 180 000	1 200 000
Alcalinidade em CaCO ₃ (µg/l)	44 900	374 000	306 000	161 000	494 000	--	--
Alumínio (µg/l)	3 898*	993*	304*	233*	1 100*	--	--
Antimónio (µg/l)	--	0,435	--	--	0,251	--	--
Arsénico (µg/l)	1,36	1,98	2,56	1,4	3,77	--	--
Bário (µg/l)	22,4	31,5	132	26	175	--	--
Berílio (µg/l)	0,694	--	--	--	--	--	--
Cádmio (µg/l)	0,655	--	--	--	--	--	--
Crómio (µg/l)	4,67	--	--	1,35	--	--	--
Cobalto (µg/l)	0,76	1,16	7,96	0,399	6,03	--	--
Cobre (µg/l)	4,09*	--	--	0,918	--	--	--
Chumbo (µg/l)	5,09	34,1	10,3	0,531	15,9	--	--
Ferro (µg/l)	3 600*	3 450*	30 900	2 760*	26 200	--	--
Manganês (µg/l)	67,3	340	2 190	3 870	4 420	--	--
Mercurio (µg/l)	1,08	--	--	--	--	--	--
Níquel (µg/l)	4,32*	1,29*	0,954	0,73	1,78*	--	--
Prata (µg/l)	0,144	--	--	--	--	--	--
Selénio (µg/l)	3,3	1,68	1,63	4,52	5,09	--	--
Tálio (µg/l)	--	--	--	0,107	--	--	--
Vanádio (µg/l)	8,38	0,916	0,703	0,679	1,62	--	--
Zinco (µg/l)	26,4*	29,2*	12,7*	--	23,1*	--	--
C12-C28 (µg/l)	47,3	971 000	1 060	746	870	--	--
C12 (µg/l)	99,4	2 310	1 610	129	1 110	--	--
1,1-dicloroetano (µg/l)	--	--	--	0,06	--	--	--
1,2,4-trimetilbenzeno (µg/l)	--	0,09	--	--	0,12	--	--
2-metilnaftaleno (µg/l)	1,95	1 260	15,2	1,46	2,7	--	--
Acenafteno (µg/l)	0,13	42,3	0,936	0,0884	0,166	--	--
Acenaftileno (µg/l)	0,0612	45,6	0,339	0,0244	0,0241	--	--
Ácido benzóico (µg/l)	1,05	--	--	1,71	--	--	--
Antraceno (µg/l)	0,129	124	0,694	0,212	0,03	--	--
Benzeno (µg/l)	0,23	--	--	--	--	--	--
Benzo[a]antraceno (µg/l)	--	--	0,0139	--	--	--	--

Águas	MW4	MW8	MW9	MW10	MW17	MW8 fase óleo livre	MW9 fase óleo livre
Análise							
Bis(2-etilexil)ftalato (µg/l)	1,7	88,4	0,736	--	--	--	--
Bromodiclorometano (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--
Bromofórmio (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--
Clorofórmio (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--
Cloreto de metileno (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--
Criseno (µg/l)	--	1,8	0,0373	--	--	--	--
Dibenzofurano (µg/l)	0,325	187	1,32	0,209	0,143	--	--
Dibromoclorometano (µg/l)	--	--	--	--	--	--	--
Dietilftalato (µg/l)	--	--	--	--	0,467	--	--
Dimetilftalato (µg/l)	--	--	0,531	--	--	--	--
Di-n-octilftalato (µg/l)	0,0907	26,7	0,41	--	--	--	--
Etilbenzeno (µg/l)	--	52,5*	25,4*	--	14,2*	--	--
Fenantreno (µg/l)	0,393	274	1,99	0,538	0,0879	--	--
Fenol (µg/l)	--	--	0,0938	--	--	--	--
Fluoranteno (µg/l)	--	9,37	0,0711	--	--	--	--
Fluoreno (µg/l)	0,538	207	2,53	0,173	0,139	--	--
Isopropilbenzeno (µg/l)	--	308*	--	--	85,6*	--	--
m,p-xileno	--	--	--	--	0,58	--	--
n-butilbenzeno (µg/l)	0,07	3,5*	1,87*	--	2,79*	--	--
n-propilbenzeno (µg/l)	--	16,9*	8,29*	--	31,6*	--	--
Naftaleno (µg/l) – método de análise SW8260B	--	43,5*	19,2*	--	13,7*	--	--
Naftaleno (µg/l) – método de análise SW8270C	0,432	35	9,98	0,68	9,18	--	--
o-xileno	--	1,1	0,11	--	0,3	--	--
p-isopropitolueno	--	0,22	--	--	0,41	--	--
Pireno (µg/l)	--	6,05	0,0843	--	--	--	--
sec-butilbenzeno	--	6,85*	4,22*	--	5,16*	--	--
t-butilbenzeno (µg/l)	0,07	3,29*	0,57*	0,88*	1,74*	--	--
Tetracloroeteno (µg/l)	--	0,07	0,05	--	--	--	--
Tolueno (µg/l)	--	--	--	0,07	--	--	--
Cloretos (µg/l)	68 300*	40 800*	64 600*	81 000*	66 100*	--	--
Azoto (em fase NO ₃) (µg/l)	2 360	--	2,5	1,57	--	--	--
Azoto (em fase NO ₂) (µg/l)	--	--	0,303	--	0,303	--	--
Sulfatos (µg/l)	21 600	303	255	12 600	277	--	--

*potencial contaminação da amostra

Bhate Associates (2008) refere por seu lado que amostras de água em furos de monitorização (amostras 5001GW21ES01 e 5001GW22ES01) indicam a presença de metais pesados, e que as concentrações no caso do bário, crómio e chumbo excedem os limites da Dutch List Optimum. No caso da amostra 5001GW21ES01 de 1485 µg/l para o bário, 97,8 µg/l para o crómio e de 656 µg/l para o chumbo; para a amostra 5001GW22ES01 o chumbo surge em concentrações de 301 µg/l.

A Fig. 111 apresenta uma comparação entre os valores de concentração de alguns dos contaminantes obtidos em amostras de águas recolhidas nos trabalhos de Cleary *et al.* (1997), de AMEC (2009) e no presente Estudo do LNEC.

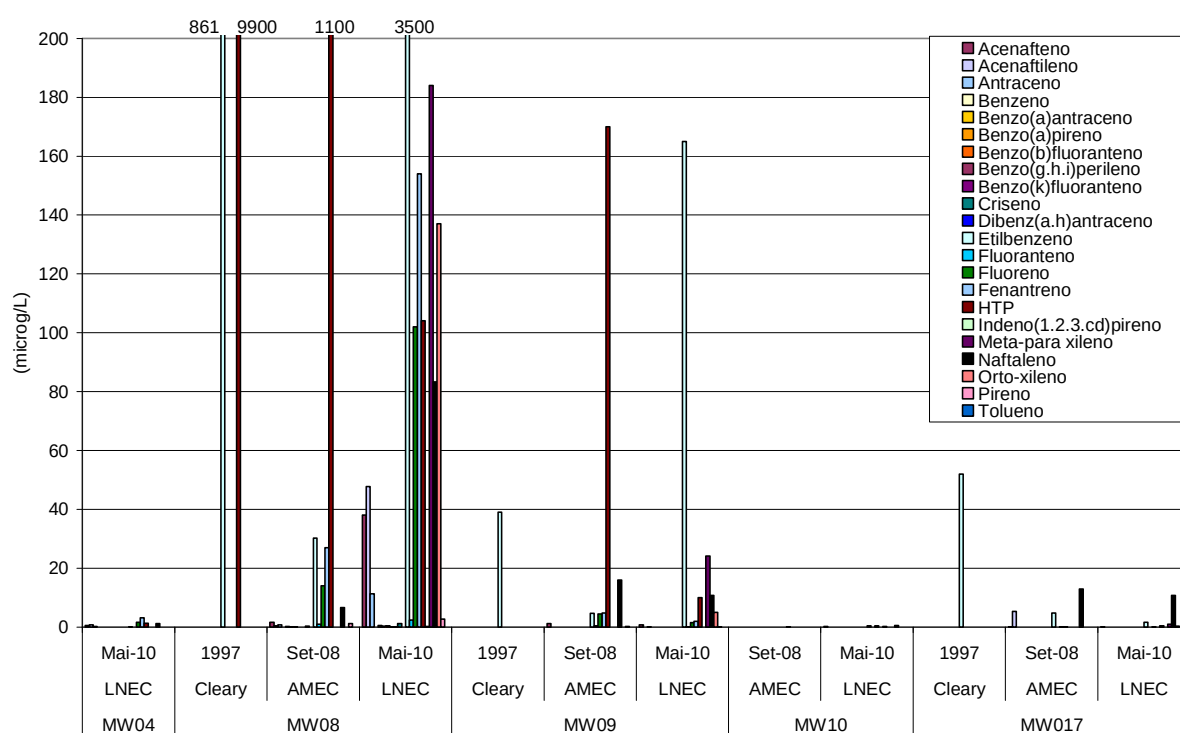


Fig. 111 – Concentração em PAHs, TPH e BTEX entre 1997 e 2010, em piezómetros na *South Tank Farm*

Em síntese, os resultados obtidos nos diferentes estudos permitiram detectar e confirmar a elevada presença de componentes do petróleo na área da *South Tank Farm*, declarada como uma área contaminada (AOC-1, Site5001). Os compostos encontrados incluem hidrocarbonetos aromáticos (BTEX), PAHs, compostos orgânicos voláteis e semi-voláteis, halogenados e não halogenados e diversos metais pesados.

Pode-se concluir pela Fig. 111 que há claras variações na concentração dos poluentes entre as amostragens, embora sem diminuição global da poluição, e que os locais mais afectados se mantêm os mesmos na última década, mostrando a aparente estagnação da pluma de hidrocarbonetos.

A quase ausência de contaminantes fora do perímetro da *South Tank Farm* confirma que a pluma de LNAPL se encontra relativamente imóvel.

Além dos locais amostrados, os vários autores admitem a possibilidade de poderem existir fugas significativas (passadas e/ou presentes) localizadas noutras áreas desta estrutura.

Não se exclui totalmente a possibilidade de poder ocorrer contaminação do aquífero de base por migração directa dos contaminantes ou a partir da drenância de pequenos níveis superficiais de águas subterrâneas. Contudo, os dados históricos apontam para uma contenção física do problema. Por outro lado, a distância a furos de captação para abastecimento (Juncal) é superior a 1 km e o sentido preferencial do escoamento dá-se para SE, conforme o modelo apresentado no Capítulo 10, impedindo a chegada natural de poluentes a locais situados a montante.

12.4.4 Furos e piezómetros LNEC_Aqualis e restante conjunto de furos no aquífero basal

O trabalho desenvolvido previu a instalação de um conjunto de furos e de piezómetros que permitissem analisar, de forma mais detalhada, as características hidrogeológicas (através de ensaios de caudal) e a qualidade química das águas subterrâneas (através de análises químicas) do aquífero profundo, onde são captadas todas as águas para abastecimento público.

As infra-estruturas instaladas compreendem seis furos no aquífero basal e dez piezómetros, sete dos quais no aquífero basal e os restantes em aquíferos suspensos localizados durante as perfurações.

O processo de instalação dos piezómetros permitiu caracterizar pormenorizadamente as formações geológicas atravessadas (cf. Anexo 1, Novo, 2010) e serviu ainda para medir os rebaixamentos provocados pelos ensaios de caudal e para efectuar recolhas de amostras a profundidades diferentes das dos furos.

O objectivo principal da construção destas novas infra-estruturas foi caracterizar o estado de qualidade das águas subterrâneas através de informação recolhida entre as duas principais áreas contaminadas, e.g. junto à porta de Armas, e os furos de captação da CMPV.

A recolha de amostras de água para análise química foi realizada em diversos períodos entre Maio e Dezembro de 2010 (Quadro 19). As recolhas efectuadas nos furos (FB) visaram obter uma amostra representativa da água do furo, pelo que foram sempre efectuadas no final dos ensaios de caudal. Nos furos FB3 e FB5 foi ainda realizada uma segunda análise a profundidades específicas (no princípio e no fim da coluna de água), de forma a avaliar eventuais diferenças. Nos piezómetros também houve, em diversos casos, mais do que uma recolha, conforme se pode observar no Quadro 19.

Os resultados das análises químicas são apresentados no Quadro 29.

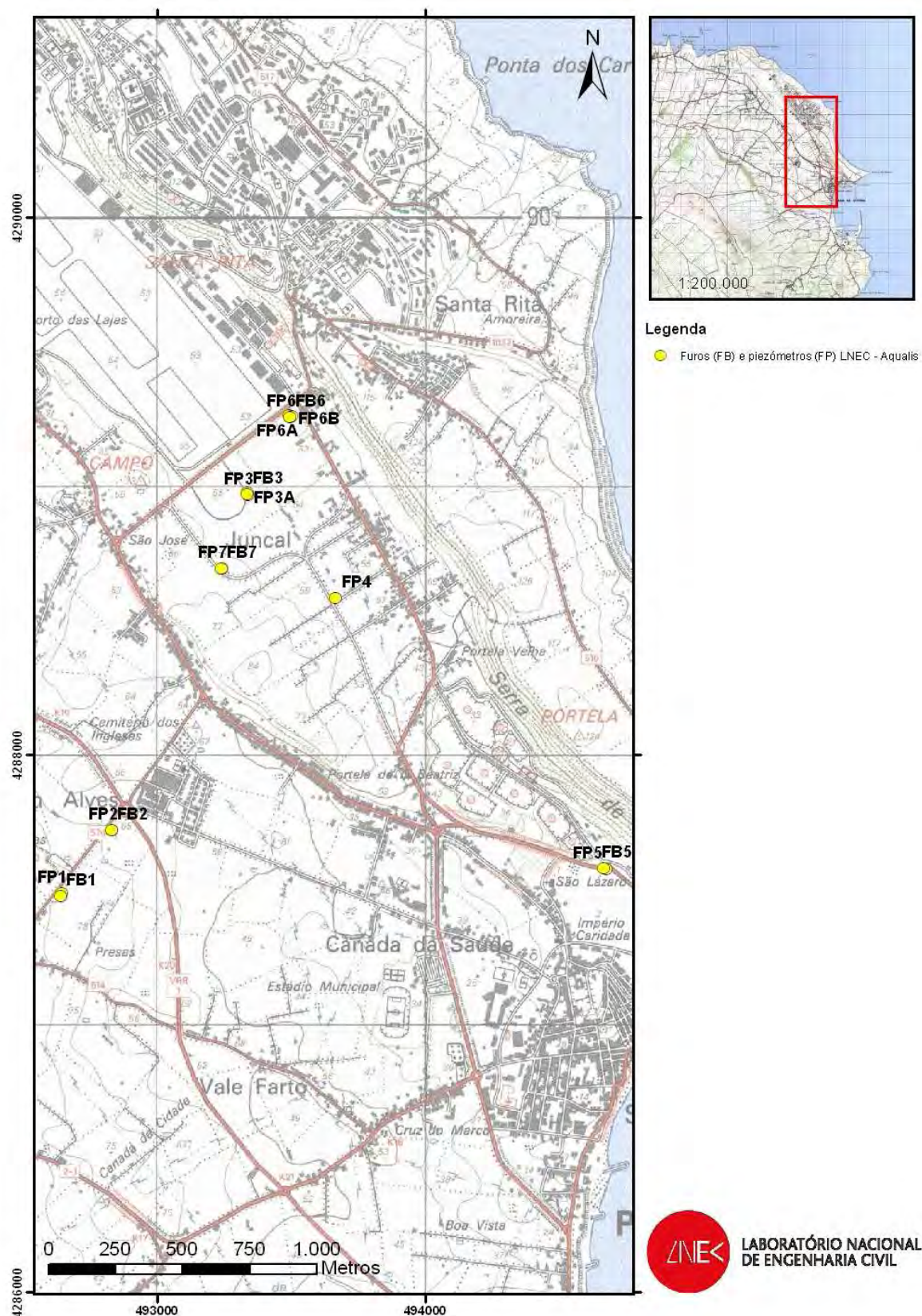


Fig. 112 – Localização dos seis furos e dez piezômetros instalados na área de estudo

NT - Normas de Qualidade, Anexo I de DAS, DL 208/2008 LQ - Limiar de Qualidade, Anexo I e VI de DAS, DL 208/2008 (definido em INAG, 2009) VP - Valor Paramétrico, DL 306/2007 Qualidade da Água destinada ao consumo humano Canadá - Standards in a <i>Publicly Groundwater Condition</i> (Table 2)	A vermelho estão as concentrações acima do valor definido A castanho estão os valores de hidrocarbonetos acima do limite de deteção
---	---

Os resultados obtidos permitem confirmar que se tratam de águas com a fácies hidroquímica do aquífero basal (Fig. 113), de características cloretada-sódica. Os dados recolhidos após ensaio de caudal (furos LNEC_Aqualis) são representativos, enquanto que as amostras pontuais recolhidas nos piezómetros apresentam ligeiras variações da sua fácies. Regista-se, ainda, que o ponto FB6 apresenta valores de cloretos muito inferiores aos restantes furos do basal, eventualmente por infiltração directa da água das chuvas pela falha de Santiago, onde se pensa localizarem os ralos.

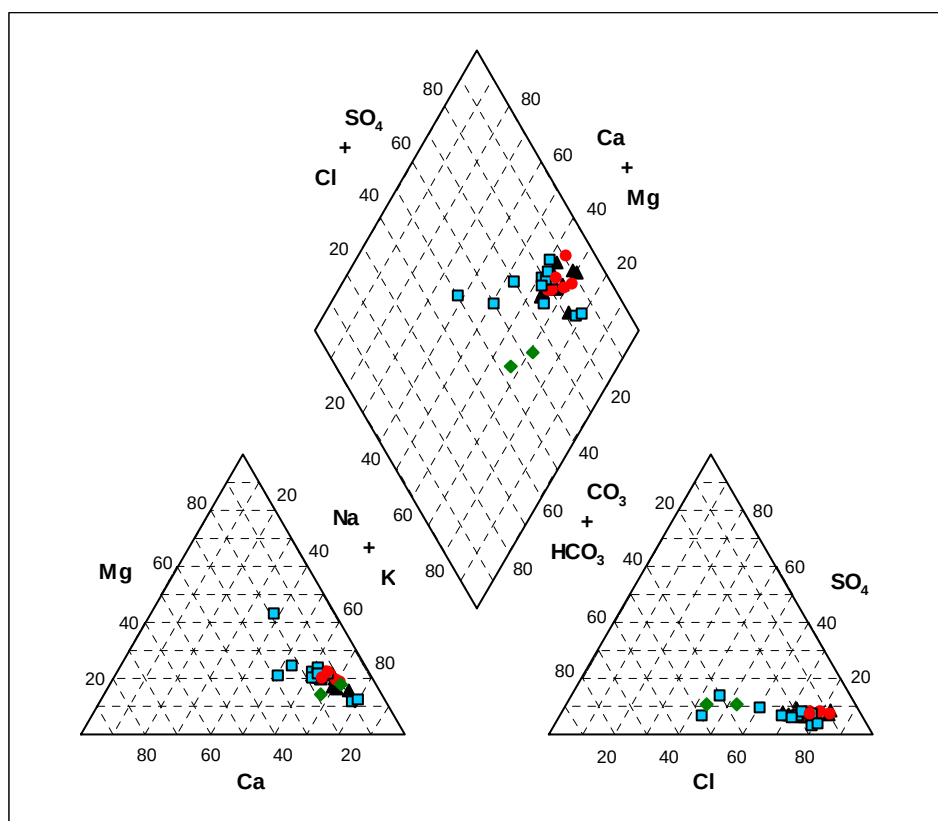


Fig. 113 – Diagrama de Piper das águas do aquífero basal: furos da CMPV (triângulo preto); furos LNEC_Aqualis (bola vermelha); piezómetros LNEC_Aqualis (quadrado preto e azul) e FB6 e FP6 (losango verde)

Relativamente à análise efectuada para TPH, observa-se a sua presença em todos os piezómetros em, pelo menos, uma ocasião (Fig. 114), embora em concentrações muito abaixo do limite standard de 0,75 microg/L. É provável que a presença de TPH nos piezómetros se deva às massas utilizadas para as uniões das varas ou óleos lubrificantes, pois embora todo o processo de instalação de piezómetros se tenha procurando minimizar a introdução de quaisquer substâncias desta natureza, tendo sido usadas espumas biodegradáveis, tal nunca é totalmente evitável. Também no sentido dessa interpretação estão os resultados das recolhas efectuadas em Setembro nos pontos FB3 e FB5, a profundidades determinadas e não no final dos ensaios de bombagem (cujas turbulência poderia ser a causa da ausência de TPH), que não mostram a presença de hidrocarbonetos. Os resultados das análises químicas dos furos deveriam ser idênticos aos dos piezómetros FP3 e FP5, cujos ralos estão posicionados em cotas idênticas, pelo que o facto de não o serem mostra uma contaminação muito residual, de

pequena extensão e pontual no tempo de TPH nos piezómetros. De qualquer forma serão necessárias outras análises para confirmar a qualidade das águas.

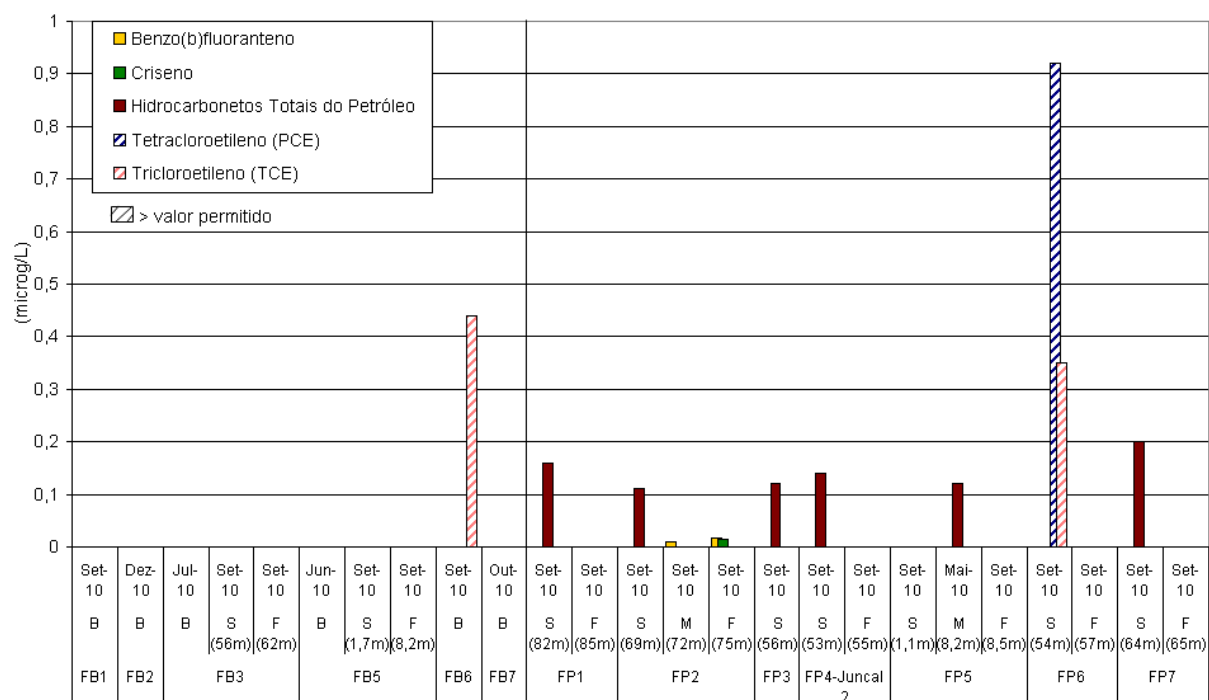


Fig. 114 – Concentração em hidrocarbonetos nos furos e nos piezómetros LNEC_Aqualis

Outro aspecto a salientar da análise da Fig. 114 é a diferença observada entre as amostras recolhidas nos furos (FBs) após os ensaios de caudal (referidas na figura como B, de amostragem por bombagem) e as obtidas através de recolha com amostrador nos piezómetros. Como seria de esperar, as primeiras, com excepção do furo FB6, não apresentam valores acima dos limites de detecção dado que o processo de amostragem causará a volatilização dos eventuais hidrocarbonetos presentes. Para identificar a presença de eventuais poluentes foi, igualmente, efectuada uma recolha sem perturbação e a uma profundidade pré-determinada nos piezómetros. Assim, a recolha dos elementos mais densos do que a água (DNAPL) foi efectuada em amostras recolhidas junto ao fundo do piezómetro (fundo - F) e a dos menos densos do que a água (LNAPL) ao nível piezométrico e coluna de água imediatamente subjacente (superfície - S). Observa-se na figura uma clara diferença entre os resultados dessas duas amostras (S e F). Efectivamente, em muitos piezómetros (FP1, FP3, FP4, FP6 e FP6) apenas se observa a presença de hidrocarbonetos do petróleo nas amostras recolhidas à superfície da água, o que revela a presença de hidrocarbonetos LNAPL. Contudo, no FP5 e FP2 também foram encontrados outros hidrocarbonetos nas amostras de fundo.

Do conjunto de resultados obtidos é a zona 6, FB6 e FP6, a que apresenta valores acima do standard definido, para os elementos tetracloroetileno (PCE) e tricloroetileno (TCE). É possível que esta qualidade deficiente provenha de contaminação da superfície (facilitada pela presença da falha de Santiago) uma vez que se observa a presença de diversos hidrocarbonetos nos piezómetros construídos nos aquíferos suspensos daquela região (S6A e S6B), como se refere em detalhe na secção 12.3.1.

12.4.5 Síntese da informação do aquífero basal

Na Fig. 115 apresentam-se os diversos hidrocarbonetos encontrados em todos os pontos a captar no aquífero basal, de forma a ter uma análise de conjunto da qualidade da água.

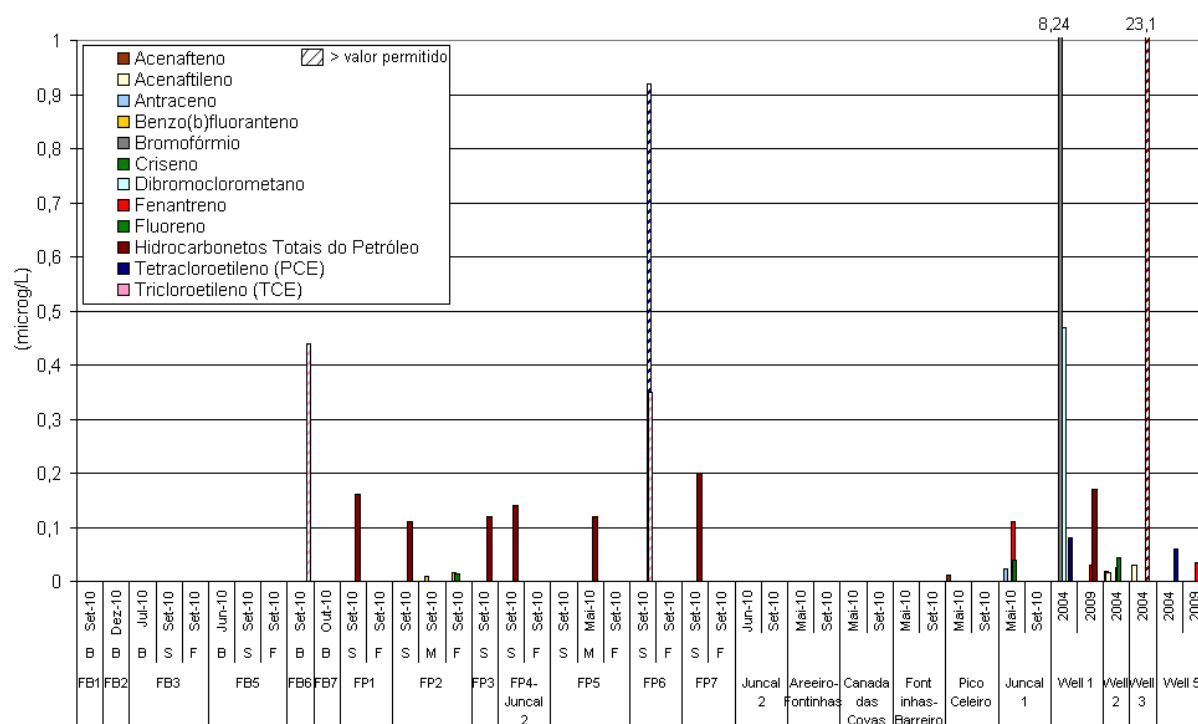


Fig. 115 – Concentração em hidrocarbonetos nos furos e nos piezómetros do aquífero basal

É possível observar a presença de diversos hidrocarbonetos em vários pontos de análise, embora a sua presença não seja constante nos diferentes períodos de monitorização. São, ainda, muito raros os casos em que as concentrações excedem os limiares utilizados, o que não deixa de confirmar o fenómeno de migração de poluentes da superfície para pontos de água captando o aquífero basal que importa também continuar a monitorizar no futuro.

Em relação aos restantes elementos químicos sobre o estado geral de qualidade das águas do aquífero basal, observa-se que a questão da concentração elevada em cloreto de sódio é um dos aspectos mais generalizados. É clara a influência da maré em todos os furos profundos da ilha (Secção 8.4.4), o que não implica a existência de intrusão marinha. Esta pode, sim, ser potenciada no caso de furos cujos ralos captem a água salobra existente sob a lenticula de água doce ou no caso de rebaixamento por captação excessiva de água.

Um outro elemento que ocorre em concentrações por vezes elevadas, embora não excedendo a norma de qualidade, é o ião nitrato. A sua presença no aquífero profundo revela também a influência da ocupação do solo, bem como a utilização indevida dos poços tradicionais como fossas sépticas que se regista na Ilha.

Além dos elementos maiores acima referidos há um conjunto de metais pesados que foram analisados e que apresentam por vezes concentrações acima do valor standard. Refere-se o caso do alumínio, crómio, cobalto, ferro, chumbo, manganés, molibdénio, níquel, prata e vanádio. A presença de quase todos estes elementos pode dever-se ao próprio meio geológico por onde circulam e não a processos de poluição. Efectivamente, apesar de a maioria destes

mesmos elementos se encontrar acima dos valores standard nas águas de áreas poluídas (p.e. *South Tank Farm*), podendo por isso ser uma potencial origem de poluição, a realidade é que boa parte dos seus valores são da mesma ordem de grandeza que os das áreas não afectadas (cf. Quadro 30). Constitui excepção a presença de alumínio, ferro, chumbo e manganês, cujas concentrações maiores se encontram nas áreas poluídas (cf. Quadro 27 e Quadro 30).

Quadro 30 – Valores médios, medianos, máximos e acima da norma (em mg/L) para metais pesados em águas do aquífero basal

Metal pesado	Norma		Média		Mediana		Máximo		N.º ocorrências acima da norma	
	Origem	Valor	AB	STF	AB	STF	AB	STF	AB (em 37 análises)	STF (em 17 análises)
Alumínio - Al	VP	0,2	0,29	1,25	0,12	0,64	0,72	4,35	6	7
Crómio - Cr	VP	0,05	0,100	0,144	0,0032	<0,001	0,798	0,798	4	2
Cobalto - Co	Canadá	0,0038	0,007	0,005	<0,002	0,003	0,012	0,012	2	3
Ferro - Fe	VP	0,2	0,798	9,095	0,07175	2,250	6,62	46,60	9	10
Chumbo - Pb	LQ	0,01	<0,005	0,029	<0,005	0,009	<0,005	0,112	0	6
Manganês - Mn	VP	0,05	0,210	1,9	0,0060	1,4200	2,1	5,53	7	11
Molibdeno - Mo	Canadá	0,07	0,013	0,020	0,0030	0,0036	0,126	0,126	1	1
Níquel - Ni	VP	0,02	0,116	0,120	0,0102	0,0024	0,616	0,616	8	3
Prata - Ag	Canadá	0,0015	0,004	< l.d.	<0,001	<0,001	0,0038	<0,001	1	0
Vanádio - V	Canadá	0,0062	0,010	0,007	0,0106	0,0030	0,0166	0,017	25	5

Legenda:

STF – *South Tank Farm*

AB – Outras análises no aquífero basal

LQ - Limiar de Qualidade, Anexo II e VII da DAS, DL 208/2008 (definido em INAG, 2009)

VP - Valor Paramétrico, DL 306/2007 Qualidade da água destinada ao consumo humano

Canadá - *Standards in a Potable Groundwater Condition (Table 2)*

Importa, pois, que durante a elaboração do Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos Açores esta temática seja aprofundada no sentido de se definir a Concentração de Fundo Geoquímico destas águas, *i.e.* a *concentração de uma substância ou o valor de um indicador numa massa de água subterrânea correspondente à ausência de modificações antropogénicas*, de forma a que os "limiares de qualidade" que possam vir a ser definidos tendo em consideração a realidade hidrogeoquímica da Ilha. Do conjunto metais pesados referidos no Quadro 30 apenas o Pb tem limiar de qualidade definido em INAG (2009) podendo ser necessário prever uma situação de excepção para este e outros elementos, para algumas massas de água da Ilha.

O potássio e o magnésio apresentam uma clara influência da água do mar, como se pode verificar nas Fig. 118 e Fig. 119.

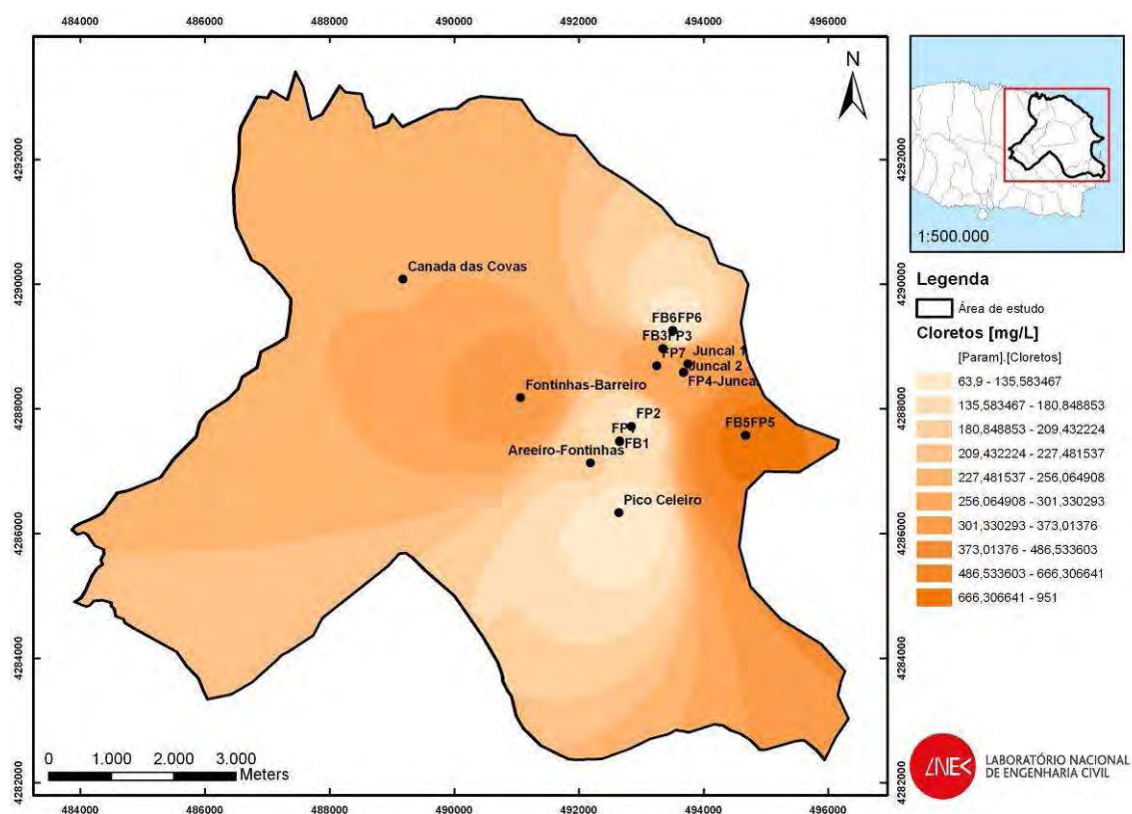


Fig. 116 – Distribuição de cloretos nas águas subterrâneas do aquífero basal

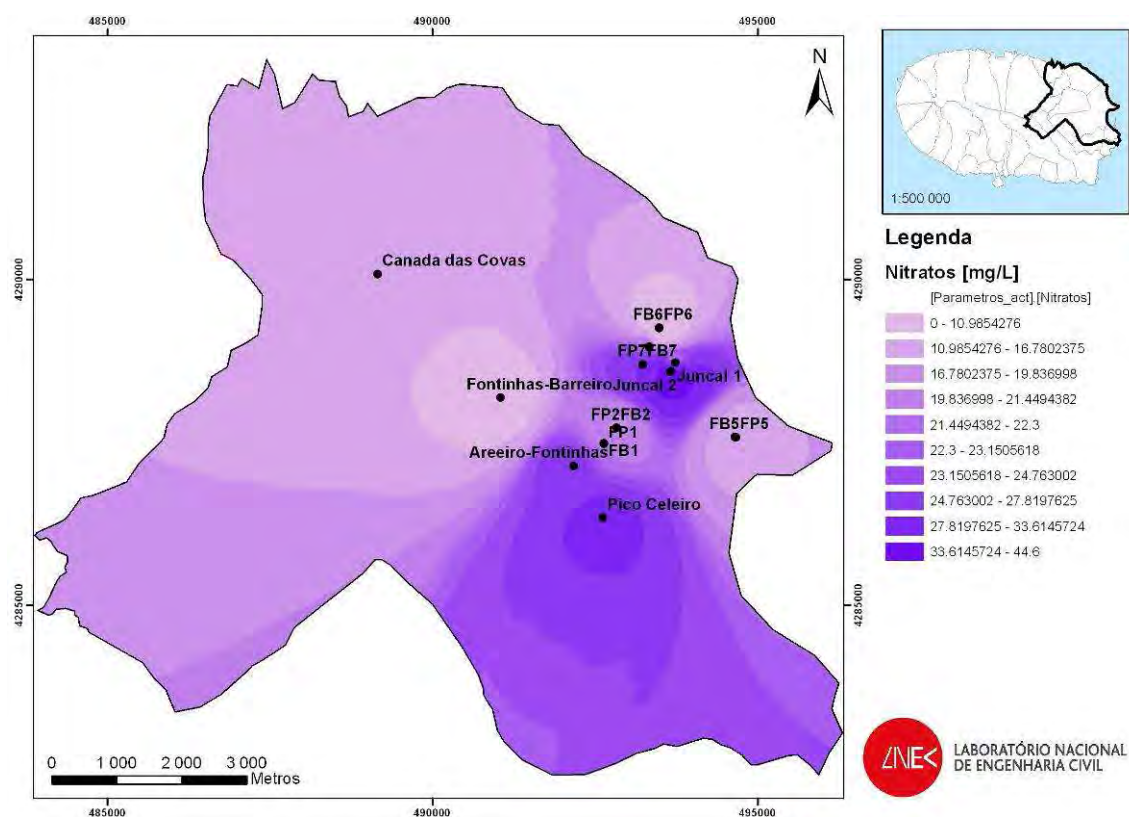


Fig. 117 – Distribuição de nitratos nas águas subterrâneas do aquífero basal

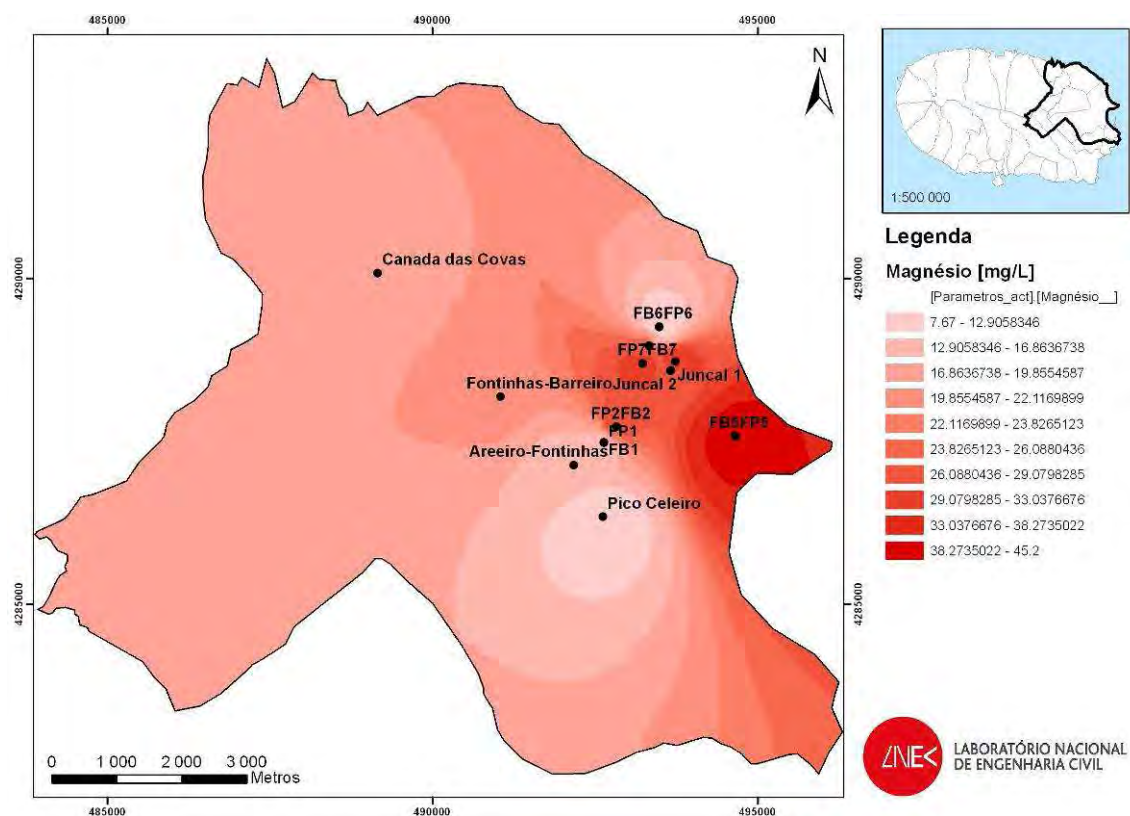


Fig. 118 – Distribuição de magnésio nas águas subterrâneas do aquífero basal

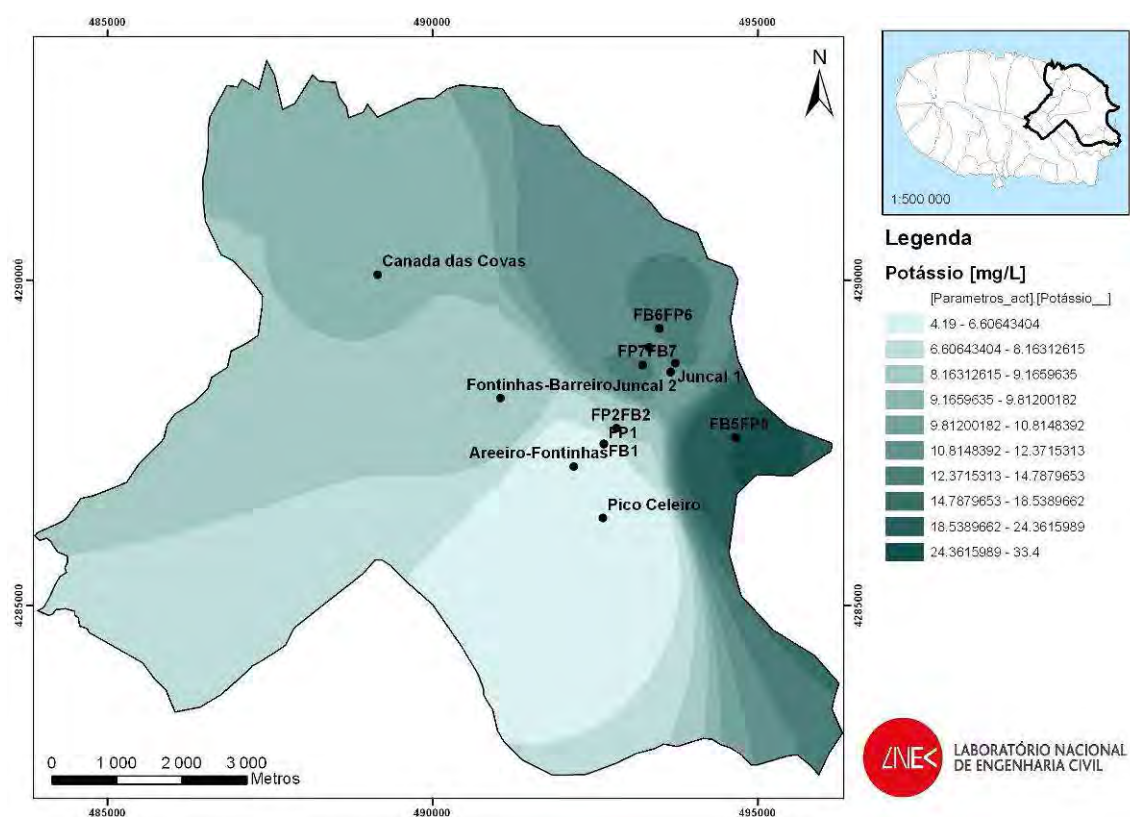


Fig. 119 – Distribuição de potássio nas águas subterrâneas do aquífero basal

13. Síntese, Conclusões e Recomendações

Neste Relatório Final apresentam-se os trabalhos desenvolvidos e as conclusões obtidas relativamente ao estado actual da qualidade e da quantidade das águas subterrâneas e perspectivas de evolução futura, face ao objectivo principal do Estudo, *i.e.* a "avaliação ambiental da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos ao longo de toda a área do concelho de Praia da Vitória onde existam captações que estejam a ser ou possam vir a estar afectadas por situações de poluição associadas às infra-estruturas da Base das Lajes".

Com vista a se atingir este objectivo, os trabalhos foram abrangentes, incluindo componentes de âmbito diverso que auxiliaram a enquadrar a avaliação ambiental da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos da área em estudo, nomeadamente através da análise do clima, da orografia, da hidrogeologia, dos focos de poluição na área de estudo, da vulnerabilidade dos aquíferos à poluição, da qualidade dos solos, da caracterização geofísica e, finalmente, da qualidade das águas subterrâneas e da modelação do escoamento.

Os **trabalhos desenvolvidos** tiveram por base uma aprofundada análise da área de estudo, efectuada nomeadamente através de:

- Prospeccção geofísica (pelo método da resistividade eléctrica) com a realização de 40 perfis em 32 alinhamentos, cujo objectivo foi auxiliar à localização das zonas poluídas associadas às estruturas de apoio à actividade da Base das Lajes, identificar eventuais zonas impermeáveis em falhas e melhor orientar a selecção dos locais a perfurar.
- Instalação de novas infra-estruturas: seis furos e sete piezómetros no aquífero basal; oito piezómetros em formações hidrogeológicas suspensas, localizadas durante as perfurações ou sondagens. O objectivo foi caracterizar a litologia/geologia/hidrogeologia regional, permitir efectuar os ensaios de caudal e facultar a monitorização quantitativa e qualitativa das águas subterrâneas.
- Realização de sete ensaios de caudal no aquífero profundo, visando determinar as propriedades hidráulicas do aquífero basal.
- Medição de níveis piezométricos em cerca de 60 pontos de água, manualmente e com sondas de registo contínuo, com o objectivo de caracterizar os sentidos do escoamento subterrâneo e analisar os efeitos de maré no aquífero basal.
- Análises *on site* e laboratoriais em 14 sondagens para recolha de amostras de solos a diferentes profundidades.
- Monitorização *in situ* e recolha de cerca de 90 amostras de água em 54 pontos de água, em diversos períodos e a diferentes profundidades, para realização de 11 610 análises químicas.

A análise do conjunto de informação acima referido, bem como o seu processamento e integração no modelo numérico de escoamento, permitiu retirar as seguintes **conclusões**:

- O **modelo hidrogeológico conceptual** simplificado da região em estudo pode ser definido por (Fig. 38 e Fig. 39) (1) um nível superior (designado por formações

hidrogeológicas suspensas) composto por (a) formações hidrogeológicas superficiais e (b) formações hidrogeológicas intermédias e (2) um sistema aquífero de base.

- o As duas primeiras formações resultam da ocorrência de níveis sub-horizontais de baixa permeabilidade, intercalados nas formações vulcânicas, que funcionam basicamente como aquíferos, tendo extensão suficiente para permitir a retenção de águas no corpo hidrogeológico. Origina-se deste modo um conjunto de várias unidades hidrogeológicas descontínuas, a diferentes profundidades cujo padrão de escoamento geral pode ser visto na Fig. 67.
- o O sistema aquífero de base é livre na área de Estudo monitorizada pelo LNEC. Na zona costeira alimenta um conjunto de nascentes litorais (e exurgências submarinas). É um aquífero fracturado, de produtividades médias a elevadas, com alguma variabilidade espacial dependente das características hidrogeológicas, cujo padrão de escoamento geral pode ser visto na Fig. 76.
- Estes dois níveis estão em contacto hidráulico através de drenância, tendo sido considerado um valor de recarga do aquífero basal que se situa entre os 15 % e os 20 % da recarga dos aquíferos superficiais (cf. Fig. 44 e Fig. 45). A maior ou menor interligação entre estes dois sistemas depende, também, do grau de fracturação e de alteração local.
- Confirma-se a presença de **áreas restritas declaradas como poluídas** destacando-se as dos perímetros de *South Tank Farm* (DISCO Site 5001) e junto à Porta de Armas (DISCO Site 3001) (Fig. 55).
 - o Os compostos encontrados em ambas as áreas incluem hidrocarbonetos aromáticos (BTEX), PAHs, compostos orgânicos voláteis e semi-voláteis, halogenados e não halogenados e metais pesados.
 - o Na *South Tank Farm* os locais mais afectados mantêm-se os mesmos na última década, mostrando uma aparente estagnação da pluma de hidrocarbonetos, apesar de haver variações na concentração dos poluentes entre as amostragens.
 - o Fora, e a jusante, do perímetro da *South Tank Farm* regista-se uma quase ausência de contaminantes, o que confirma que a pluma de hidrocarbonetos se encontra relativamente imóvel.
 - o Nesta área não se exclui totalmente a possibilidade de poder ocorrer contaminação do aquífero de base por migração directa dos contaminantes. Contudo, os dados históricos apontam para uma contenção física do problema. Por outro lado, a distância a furos de captação para abastecimento (Juncal) é superior a 1 km e o sentido preferencial do escoamento dá-se para SE, conforme o modelo apresentado no Capítulo 11 (Fig. 76), impedindo a chegada natural de poluentes a locais situados a montante.

- o Nos piezómetros junto à Porta de Armas há bastante heterogeneidade de concentrações entre as amostras realizadas em diferentes períodos e, também, a diferentes profundidades.
- o Neste DISCO Site 3001 referem-se, pelo menos, duas plumas separadas de hidrocarbonetos cujas concentrações estão acima dos valores permitidos.
- o Nas formações suspensas fora desse perímetro (o sentido do escoamento subterrâneo processa-se, essencialmente, para SSE) observam-se concentrações de hidrocarbonetos, e.g. piezómetro FP3A, embora não excedam os limites standard definidos.
- No aquífero de base, **a água de abastecimento público apresenta boa qualidade**, sendo o cloreto e, raramente, o sódio os dois parâmetros a apresentar concentrações acima dos valores standard utilizados. Não se observa a presença de hidrocarbonetos acima dos valores de água potável, estando a maioria das análises abaixo os limites de detecção utilizados.
- Noutros pontos do aquífero de base com amostragem a níveis constantes:
 - o Foi possível observar a presença de hidrocarbonetos em vários pontos de análise, embora a sua presença não tenha sido confirmada para diferentes períodos de monitorização.
 - o Foram muito raros os casos em que as concentrações medidas excederam os limiares utilizados (apenas o caso do FP6 e FB6, cf. Fig. 42 – note-se que furo FB6 não traduz o comportamento do aquífero basal), o que não deixa de corroborar a hipótese de um fenómeno de migração de poluentes da superfície para pontos de água captando o aquífero basal.
- Em relação aos restantes elementos químicos sobre o estado geral de qualidade das águas do aquífero basal, observa-se uma influência da maré em todos os furos profundos da ilha (Secção 8.4.4), o que não implica a existência de intrusão marinha. Esta pode, sim, ser potenciada no caso de furos cujos ralos captem a água salobra existente sob a lenticula de água doce ou no caso de rebaixamento por captação excessiva de água.
- Um outro elemento que ocorre em concentrações por vezes elevadas, embora não excedendo a norma de qualidade, é o ião nitrato. A sua presença no aquífero profundo revela também a influência da ocupação do solo, bem como a utilização indevida dos poços tradicionais como fossas sépticas que se regista na Ilha.
- Além dos elementos maiores acima referidos há um conjunto de metais pesados que foram analisados e que apresentam por vezes concentrações acima do valor standard. Refere-se o caso do alumínio, crómio, cobalto, ferro, chumbo, manganés, molibdénio, níquel, prata e vanádio. A presença de quase todos estes elementos pode dever-se ao próprio meio geológico por onde circulam. Constitui excepção a presença de chumbo e manganés, cujas maiores concentrações se encontram nas áreas poluídas. Importa,

pois, que durante a elaboração do Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos Açores esta temática seja aprofundada no sentido de se definir a Concentração de Fundo Geoquímico destas águas, *i.e.* a *concentração de uma substância ou o valor de um indicador numa massa de água subterrânea correspondente à ausência de modificações antropogénicas*, de forma a que os "limiares de qualidade" que possam vir a ser definidos tendo em consideração a realidade hidrogeoquímica da Ilha, podendo ser necessário prever uma situação de excepção para alguns elementos.

- O estudo realizado para análise da **qualidade dos solos** (Jorge, 2010) permite concluir:
 - o Numa primeira aproximação, que não existe uma situação de contaminação de solos por compostos orgânicos, nos locais interessados, apesar de se ter encontrado na sondagem S5A/S5B um aspecto oleoso na água superficial do local (solo alagado) e de se terem medido *on site* valores de VOCs de 10,5 ppm. Quanto ao índice fenol, várias amostras apresentaram valores acima do limite de 0,5 mg.kg⁻¹.
 - o Quanto aos metais, verificou-se um conjunto de elementos que apareceram em grande parte das amostras de solos analisadas em laboratório, essencialmente acima dos critérios da USEPA, como sejam: As, Co, Fe, Mn e V. Nenhum destes elementos ultrapassaram os valores limites da Legislação da Holanda e só para o Co e V há valores superiores aos limites impostos pela Legislação de Ontário (Jorge, 2010).
- **Os estudos geofísicos** realizados para a análise dos modelos de resistividade eléctrica (Mota e Novo, 2010) permitiram identificar:
 - o Descontinuidades geofísicas que possuem correspondência espacial com descontinuidades geológicas anteriormente assinaladas (Carta Vulcanológica da Ilha Terceira (1/200 000), Lloyd e Collis (1981), Rodrigues (1993, 2002)), nomeadamente a falha de Santiago e a falha do Areeiro. Foi ainda possível identificar locais potencialmente contaminados por hidrocarbonetos. Estes locais presumivelmente contaminados são:
 - Local dos tanques enterrados no Pico Celeiro;
 - Área de implantação do Cinder Pit pipeline e no antigo local de armazenamento de combustível no Bairro da Joaquina;
 - Zona do Posto 1 (Main Gate);
 - Local do antigo Pier 7;
 - Saída da descarga de águas pluviais a norte da Base Aérea (North Storm Sewer).
 - o A partir dos modelos de resistividade eléctrica apenas foi possível identificar eventuais níveis impermeáveis discretos que impeçam a difusão vertical de

água e, conseqüentemente, eventuais contaminações provenientes da superfície.

Atendendo às conclusões apresentadas propõe-se um conjunto de **recomendações** tendo em vista a protecção dos recursos hídricos subterrâneos da área de estudo, em especial do aquífero basal de vulnerabilidade intermédia (cf. Fig. 94) que serve para abastecimento doméstico:

- A definição de medidas de reforço das infra-estruturas de armazenamento e/ou transporte de produtos perigosos, nomeadamente de combustíveis, na Base das Lajes de forma a evitar novos derrames, atendendo também à questão da sua estabilidade face à sismicidade da Ilha.
- A articulação de um programa de acções com a Base Americana no sentido de serem tomadas medidas de contenção e de reabilitação das áreas reconhecidas como poluídas, programa esse que deverá ser acompanhado por técnicos portugueses.
- A manutenção de um programa de controlo da qualidade da água através da monitorização semestral nos novos furos e piezómetros instalados, bem como para os furos da CMPV, para o conjunto de parâmetros cujas concentrações se encontram acima dos limites de detecção, tendo em vista acompanhar a evolução da situação. Este programa deverá:
 - o ser reajustado face aos resultados, designadamente na componente relativa aos metais pesados e hidrocarbonetos;
 - o ser complementar e estar em estreita articulação com os trabalhos desenvolvidos e as análises efectuadas pela Base Americana dentro dos perímetros militares poluídos, para os piezómetros nas formações hidrogeológicas suspensas.
- O uso de isótopos para datação de águas e análise da idade de recarga.
- O aprofundamento do estudo da recarga, por análise da variação do nível piezométrico designadamente através do uso de sondas instaladas a diferentes níveis hidrogeológicos, por períodos mais longos e noutras áreas da Ilha.
- A análise da espessura da lentícula de água doce sobrenadante à água salgada no interior da ilha, nos furos da CMPV, em situação de não bombagem.
- A realização de estudos complementares em áreas ainda não contempladas que se localizem a jusante de potenciais focos de poluição, nomeadamente da Cova das Cinzas; neste Estudo essa análise foi parcialmente efectuada mas não incluiu as áreas a montante dos furos de captação da Base Aérea Americana.

Importa, por fim, referir que o conhecimento agora adquirido não esgota a caracterização de todas as áreas potencialmente afectadas por poluição. Com base nos recursos financeiros disponíveis, procurou-se centrar e aprofundar o conhecimento nas áreas a montante dos furos de abastecimento e a jusante dos principais focos de poluição relacionados com a actividade

da Base das Lajes identificados. Os resultados da prospecção geofísica apontam outras áreas, possivelmente de menor importância e expressão, que deverão ser alvo de novos estudos.

Como **conclusão global** refere-se que, pese embora a caracterização do estado ambiental das áreas analisadas ter confirmado a presença de áreas poluídas na região estudada, apenas se mediu uma situação de concentração de poluentes acima dos valores permitidos em furos e/ou piezómetros que captam no aquífero basal. Tal já havia sido identificado nalguns furos de abastecimento da Base Americana. Note-se, contudo, que a simples presença em diversos pontos de água de concentrações acima dos limites de detecção é um indício de uma potencial situação de risco que importa continuar a monitorizar no futuro. Nesse processo, as origens de poluição devem ser controladas e o processo de reabilitação, natural e/ou induzido, das áreas restritas afectadas deve ser posto em marcha pela Força Aérea Americana, sob supervisão do Estado Português, predispondo-se o LNEC a colaborar num futuro estudo para a proposta de medidas de mitigação e de recuperação apropriadas.

Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Dezembro de 2010

VISTOS



J.P. Cárcamo Lobo Ferreira
Chefe do Núcleo de Águas Subterrâneas



Rafaela de Saldanha Matos
Directora do Departamento de Hidráulica e Ambiente

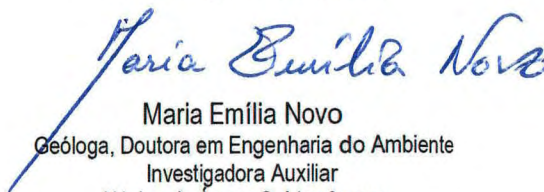
AUTORIAS



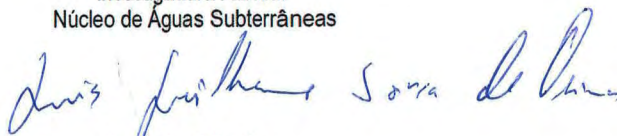
J.P. Cárcamo Lobo Ferreira
Dr.-Ing. Habil. em Engenharia Civil
Investigador-Coordenador
Núcleo de Águas Subterrâneas



Teresa E. Leitão
Doutora em Hidrogeologia
Investigadora Principal com Habilitação
Núcleo de Águas Subterrâneas



Maria Emília Novo
Geóloga, Doutora em Engenharia do Ambiente
Investigadora Auxiliar
Núcleo de Águas Subterrâneas



Luís S. Oliveira
Eng. do Ambiente e Mestre pelo IST
Bolseiro
Núcleo de Águas Subterrâneas



Manuel Mendes Oliveira
Doutor em Hidrogeologia
Investigador Auxiliar
Núcleo de Águas Subterrâneas



Maria José Henriques
Geóloga
Técnica Superior
Núcleo de Águas Subterrâneas



Tiago Martins
Geólogo
Bolseiro
Núcleo de Águas Subterrâneas

Referências bibliográficas

- AGOSTINHO, J., 1942 – O Clima nos Açores no Quadro dos Climas Mundiais. Açoriana, Voo. 3, Fase 1, pp. 49-73.
- ALLEN & HOSHALL, 1990 – Report on the Delivery Order F61040-89-D0002, Project MQNA 88-1012. Allen & Hoshall, Engineers, Architects, Consultants. Memphis, Tennessee.
- ALLER, L., BENETT, T., LEHER, J.H., HACKETT, G., 1987 – DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeological Settings. U.S. Environmental Protection Agency, pp. 622.
- ALLOWAY, B., 1990 - Heavy Metals in Soils. Londres, Blackie e John Wiley & Sons, 1990, 339 p.
- AMEC, 2009 - Site Characterization Selected Sites at Lajes Field Project N.º 775290045: LAJES FIELD. *Diversos documentos soltos recebidos por email.*
- ANDERSEN, E., 1982 – Geothermal Prospection – Ilha Terceira, Açores. Geophysics Survey Report. Ponta Delgada, Secretaria Regional do Comércio e Indústria.
- AQUALIS, 2010 – Instalação de Furos e Piezómetros no Concelho de Praia da Vitória, Ilha Terceira – Açores. Aqualis L^{da}.
- AZEVEDO, E.B., 1996 – Modelação do Clima Insular à Escala Local (Modelo CIELO). Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, Tese de Doutoramento, pp. 246.
- BATHE ASSOCIATES, 2006 – Risk Assessment of Priority Sites, Lajes Field, Azores, Portugal. May, 2006
- BETTENCOURT, M.L., 1977 – O Clima dos Açores como Recurso Natural, Especialmente em Agricultura e Indústria do Turismo. In “O Clima de Portugal”, Fasc. XVIII, INMG.
- BHATE ASSOCIATES, 2008 – Risk Assessment Summary of Findings for Sites 5001 (*South Tank Farm*), 3001 (Main Gate Area) and Data Gap Sampling at Lajes Field, Azores, Portugal. 2008.
- CH2M HILL, 2004 – Data Summary Report on Groundwater Sampling at Lajes Field, Azores, Portugal – October 2004.
- CH2M HILL, 2004 a) – Discovery of Suspected and Contaminated Sites Study (DISCO-Study), Lajes Field, Azores, Portugal.
- CH2M HILL, 2005 – Data Summary Report. Limited Soil Investigation at the Fire Training Pit and Main Gate/5 Hydrants Area at Lajes Field, Azores, Portugal. October 2005.
- CLEARY, C., KACHEK, D., LIEFER, T. e ZRUBA, R., 1997 – Environmental Survey for 3 sites. Lajes Field, Azores, Portugal, Final Report. April 2007, 76 pp.
- CUSTÓDIO, E., 1978 – Hidrogeología de las Rocas Volcánicas. III Congreso Internacional de Águas Subterrâneas. Palermo. UNESCO – EAS-A.I.H., pp. 33 – 69.
- DRAOTRH, 2001 – Plano Regional da Água. Relatório Técnico. Versão para Consulta Pública. Região Autónoma dos Açores, Ponta Delgada, pp. 414.
- IT Corporation, 1995 – Site Investigation Report, Main Gate Area, October, 1995.
- JORGE, C., 2010 - "Avaliação da Caracterização da Contaminação de Solos Junto a Potenciais

Focos de Poluição". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 386/2010 – NGEA, 71 pp.

LEITÃO, T.L., JORGE, C., NOVO, M.E., LOBO FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M., 2009 - Especificações para a Instalação de Furos de Ensaio, de Piezómetros, de Sondagens de Amostragem e de Análises Químicas de Solos e Águas na Região do Graben das Lajes - Concelho de Praia da Vitória, Ilha Terceira, Açores. Relatório 225/2009-NAS, 46 pp.

LLOYD, E.F., COLLIS, S.K., 1981 – Geothermal Prospection – Ilha Terceira, Açores. Geological Report. Ponta Delgada, Secretaria Regional do Comércio e Indústria, pp. 96.

MACHADO, F., 1969 – Sobre a Tectónica do Atlântico Norte a Oeste de Portugal. Lisboa, Ciências Naturais, revista da Faculdade de Ciências de Lisboa.

MENDONÇA, J.L., 1993 – Condições Hidrogeológicas e Recursos Hídricos Subterrâneos do Arquipélago dos Açores. Angra do Heroísmo, Seminário "Recursos Hídricos e o Ambiente na Região Autónoma dos Açores".

MENEZES, J.G., 1993 – Hidrologia e Hidrogeologia da Ilha Terceira: Grandes Condicionantes. Angra do Heroísmo, Seminário "Recursos Hídricos e o Ambiente na Região Autónoma dos Açores", pp. 56.

MORAIS, J., 2010a - "Relatório de Ensaios – Amostragem e Análise de Águas Subterrâneas". AmbiPar Control, Lda., 254 p.

MORAIS, J., 2010b - "Relatório de Ensaios – Amostragem e Análise de Solos". AmbiPar Control, Lda., 88 p.

MORTON, B., BRITTON, J.C., FRIAS MARTINS, A. M., 1998 – "Ecologia Costeira dos Açores. Sociedade Afonso Chaves, São Miguel, Açores, Portugal". ISBN: 972-97774-1-1.

MOTA, R. e NOVO, M.E., 2010 - "Prospecção geofísica, pelo método da resistividade eléctrica, no Concelho de Praia da Vitória, Açores". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 236/2010 – NGEA/NAS, 86 pp.

NOVO, M.E., 2010 - "Descrição Geológica Detalhada das Colunas Litológicas obtidas nas Carotes dos Novos Piezómetros", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, NAS/DHA, 113 p.

NOVO, M.E., RODRIGUES, F.C., LOBO FERREIRA, J.P., AZEVEDO, E.B., 2001 – Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas dos Açores – Relatório Final – 3.º Ano, Fase 3. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório LNEC 239/01 - GIAS, pp. 640.

OLIVEIRA, L., LOBO FERREIRA, J.P., NOVO, M.E., 2010 – Análise e Parecer Sobre a Situação Ambiental nas Áreas de Captação dos Furos de Abastecimento do Concelho de Praia da Vitória – Açores: Relatório Preliminar de Modelação. Relatório LNEC, 63/2010-NAS, pp. 42, Lisboa, LNEC, Março, 2010.

OLIVEIRA, N.P., 2010 - "Realização de Sondagens para Recolha de Amostras de Solos e Posterior Instalação de Piezómetros no Aquífero Superficial da Região do Graben das Lajes - Concelho de Praia da Vitória, Ilha Terceira – Açores". Direcção de Fundações e Geotecnia da Mota-Engil, 91 p.

RODRIGUES, F.C., 1993 – Hidrogeologia da Ilha Terceira: Contributo para o seu Conhecimento. Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, Tese de Mestrado, pp. 139.

RODRIGUES, R., 1995 – Hidrogeologia de Ilha Vulcânicas. Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, Tese para a obtenção do grau de Especialista, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

RODRIGUES, R., 2002 – Hidrogeologia da Ilha Terceira (Açores-Portugal). Angra do Heroísmo, Universidade dos Açores, Departamento de Ciências Agrárias, Tese de Doutoramento.

SCHALLER, J., HANSEN, J., MOWEREY, H.A., NINGLEGEN, W., GÖLLINGER, F, 2005 – Hydrogeological Report Lajes Field, Azores, Portugal – Final. CH2M HILL, US AIR Forces in Europe. Fevereiro 2005.

SEARLE, R., 1974 – Tectonic Pattern of the Azores Spreading Centre and Triple Junction. Earth Planetary Science Letters, s.n., 51, pp. 415-434.

SELF, F., 1974 – Recent Volcanism of Terceira, Azores. Ph.D. Thesis, London, Imperial College of London.

SELF, F., GUNN, B., 1976 – Petrology, Volume and Age Relations of Alkaline and Saturated Peralkaline Volcanics from Terceira, Azores. Contributions on Mineralogy and Petrology, s.n., Vol. 54, Fasc. 4, pp. 293-313.

SELF, F., 1986 – The Recent Volcanology of Terceira, Azores. London, J. Geology, Vol. 32, pp. 645-666.

ZBYSZEWSKI, G., CÂNDIDO de MEDEIROS A., Ferreira, O. V., Assunção, T., 1971 – Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, Escala 1:50 000, Ilha Terceira (Açores). Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, pp. 43.

