



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

ASSESSORIA TÉCNICA AOS PROCESSOS DE REABILITAÇÃO AMBIENTAL RELACIONADOS COM A UTILIZAÇÃO DA BASE DAS LAJES PELOS EUA

**Prospecção geofísica e caracterização da qualidade dos solos
junto ao Site 5001**

Ministério da Defesa Nacional

Lisboa • setembro 2020

I&D CONSELHO DIRETIVO

RELATÓRIO 308/2020 – CD

Título

ASSESSORIA TÉCNICA AOS PROCESSOS DE REABILITAÇÃO AMBIENTAL RELACIONADOS COM A UTILIZAÇÃO DA BASE DAS LAJES PELOS EUA

Prospeção geofísica e caracterização da qualidade dos solos junto ao Site 5001

Autoria

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

Teresa E. Leitão

Investigadora Principal com Habilitação, Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

Rogério Mota

Investigador Auxiliar, Núcleo de Geologia de Engenharia e do Ambiente

CONSELHO DIRETIVO

Maria de Lurdes Antunes

Investigadora-Coordenadora, Vogal do Conselho Diretivo

Colaboração

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

António Roque

Investigador Principal, Núcleo de Geologia de Engenharia e de Ambiente

Daniel Filipe

Técnico Superior

Carlos Martins

Técnico Superior

António Gomes

Técnico Superior

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 308/2020

Proc. 0102/121/22465

ASSESSORIA TÉCNICA AOS PROCESSOS DE REABILITAÇÃO AMBIENTAL RELACIONADOS COM A UTILIZAÇÃO DA BASE DAS LAJES PELOS EUA

Prospecção geofísica e caracterização da qualidade dos solos junto ao Site 5001

Resumo

O LNEC encontra-se a apoiar o Ministério da Defesa Nacional (MDN) num conjunto de questões técnico-ambientais relacionadas com a presença, nos últimos 60 anos, do contingente da Força Aérea Americana (USAFE) na Base das Lajes, ilha Terceira.

Nesse contexto, o LNEC procedeu à caracterização adicional de um conjunto de locais. Neste relatório apresentam-se os trabalhos desenvolvidos e a análise dos resultados obtidos a SE do Site 5001, com base em prospecção geofísica, assim como na avaliação da qualidade ambiental dos solos recolhidos, terminando com um conjunto de conclusões e de recomendações para este local.

Palavras-chave: Base das Lajes / Geofísica / Qualidade dos solos

TECHNICAL ASSISTANCE TO THE PROCESS OF ENVIRONMENTAL REHABILITATION ASSOCIATED TO THE USE OF LAJES AIR BASE BY THE USA
Geophysical survey and characterization of soil quality at Site 5001

Abstract

LNEC is providing technical support to the Ministry of National Defense of Portugal (MDN) in the assessment of environmental issues arising from the presence of the United States Air Force (USAFE) at Lajes Air Base, in Terceira Island, Azores.

In this context, LNEC has further characterized a set of Sites. This report presents the work developed and the analysis of the results obtained SE of Site 5001, based on a geophysical survey and on soil environmental assessment, with a set of conclusions and recommendations for this Site.

Keywords: Lajes Base / Geophysics / Soil quality

Índice

1	Introdução	1
2	Breve descrição do local	2
3	Prospeção geofísica	4
	3.1 Objetivo e metodologias	4
	3.2 Trabalhos realizados.....	5
	3.3 Resultados obtidos	8
4	Solos.....	16
	4.1 Objetivo e metodologias	16
	4.2 Trabalhos realizados.....	17
	4.3 Resultados obtidos	18
5	Conclusões e recomendações	25
	Referências bibliográficas	28

Índice de figuras

Figura 2.1 – Vista da área a sul do Site 5001 (extraída do <i>Facebook</i> , Grupo "Base das Lajes antigamente").....	2
Figura 3.1 – Dispositivo de medição da resistividade elétrica de Schlumberger (se $n > 2$) ou de Wenner (se $n = 1$).....	4
Figura 3.2 – Esquema da sequência de injeções de corrente (A e B, ou C1 e C2) e de leitura de potenciais (M1, N1, ..., ou P1 e P2) do dispositivo dipolo-dipolo, e correspondentes posições teóricas em profundidade, utilizadas para a representação 2D dos dados (pseudo-secção), a partir da movimentação do dispositivo ao longo do alinhamento materializado no terreno por uma série de eléctrodos (esquema da direita).....	5
Figura 3.3 – Topo e esquerda - enquadramento do perfil PR1 (vista de SE para NO); topo e direita - enquadramento do perfil PR3 (fotografia captada cerca dos 160 m do perfil no sentido SE para NO); base - enquadramento do perfil PR7 (de NE para SO).....	6
Figura 3.4 – Localização dos trabalhos de prospecção geofísica executados (2020 - traços a cor vermelha; 2009 - traço a cor amarela).....	7
Figura 3.5 – Ilustração do posicionamento de um observador para análise dos modelos de resistividade elétrica obtidos em cada perfil.....	8
Figura 3.6 – Conjunto dos modelos obtidos, segundo a direção NO-SE, representados considerando que o observador se encontra junto ao perfil PR1, virado na direção SO-NE, apresentados à mesma escala entre si, e com o seu início na real posição relativa entre si.....	9
Figura 3.7 – Conjunto dos modelos obtidos segundo a direção SO-NE, representados considerando que o observador se encontra junto ao perfil PR7, virado na direção SE-NO, e apresentados à mesma escala entre si.....	10
Figura 3.8 – Implantação aproximada de todos os modelos de resistividade obtidos na planta de localização dos trabalhos realizados no Site 5001.....	11
Figura 3.9 – Topo e centro – Modelos de resistividade elétrica obtidos para os perfis PR34W (2009) e PR8, respetivamente; base – secção com a variação da resistividade elétrica entre os modelos.....	13
Figura 3.10 – Implantação aproximada da secção de diferenças entre os modelos obtidos para os perfis PR34W e PR8 na planta de localização dos trabalhos realizados no Site 5001.....	13
Figura 4.1 – Mapa com a localização dos perfis de resistividade elétrica e dos locais de recolha dos solos, a sul do Site 5001.....	16
Figura 4.2 – Aspeto geral do procedimento de recolha de solos pelo LREC.....	17
Figura 4.3 – Concentração em HTP nos solos a sul do Site 5001.....	21
Figura 4.4 – Mapa da concentração em HTP nos solos a sul do Site 5001.....	22
Figura 4.5 – Concentração em HAP nos solos a sul do Site 5001.....	22
Figura 4.6 – Mapa da concentração em HAP nos solos a sul do Site 5001.....	23
Figura 4.7 – Composição típica das cadeias de carbono para diferentes hidrocarbonetos (cf. https://clu-in.org/conf/itrc/TPHrisk/).....	24

Índice de quadros

Quadro 3.1 – Características geométricas dos perfis de prospecção geofísica.....	7
Quadro 3.2 – Precipitação anual (mm) em Angra do Heroísmo (Fonte: PORDATA).....	14
Quadro 4.1 – Coordenadas e profundidades de amostragem dos solos no Site 5001	18
Quadro 4.2 – Resultados das análises químicas de amostras de solos recolhidas a sul do Site 5001	19

Agradecimentos

Agradece-se todo o apoio do Comando Português da Zona Aérea dos Açores para a realização deste trabalho, na pessoa do Senhor Major César Fernandes.

Ao Dr. Paulo Amaral, do Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC), agradece-se todo o trabalho de amostragem e acondicionamento de amostras de solos que permitiram a realização deste estudo.

Lista de acrónimos

65 ABG - Forças Armadas dos Estados Unidos da América nas Lajes, 65th *Air Base Group* da USAFE

APA - Agência Portuguesa do Ambiente

BTEX - Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, Xileno

COV (ou VOC) - Compostos Orgânicos Voláteis

ERSARA - Entidade Reguladora de Águas e Resíduos dos Açores

FAP - Comando Português da Zona Aérea dos Açores ou Força Aérea Portuguesa

HAP (ou PAH) - Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

HTP (ou TPH) - Hidrocarbonetos Totais do Petróleo

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LREC - Laboratório Regional de Engenharia Civil dos Açores

MDN - Ministério da Defesa Nacional

USAFE ou Força Aérea Americana - 65th *Air Base Group* - Forças Armadas dos Estados Unidos da América nas Lajes

1 | Introdução

O LNEC encontra-se a apoiar o Ministério da Defesa Nacional (MDN) num conjunto de questões técnico-ambientais relacionadas com a presença, nos últimos 60 anos, do contingente da Força Aérea Americana (USAFE) na Base das Lajes, ilha Terceira. As principais preocupações ambientais que se têm deparado neste contexto relacionam-se com a contaminação de solos e de águas subterrâneas decorrentes do armazenamento e do manuseamento de reservas de combustíveis e de outras substâncias poluentes e de atividades inerentes à operação da USAFE, tendo em atenção as práticas adotadas no passado.

O Site 5001, designado por *South Tank Farm*, é uma das principais áreas contaminadas que tem sido alvo de diversos estudos na última década. O alargamento da área de estudo do Site 5001 para sul, em relação ao acompanhamento que o LNEC tem vindo a fazer para a Entidade Reguladora de Águas e Resíduos dos Açores (ERSARA) desde 2012, relativamente à qualidade das águas, mostrou que a área afetada é mais extensa do que inicialmente pensado, estando ultimamente em análise também as águas do Paul, dos poços particulares e de nascentes, além dos piezómetros e dos furos que têm vindo a ser monitorizados naquela área.

Em complemento à análise da qualidade das águas, entendeu-se que seria importante aprofundar o conhecimento das características geofísicas dos solos e analisar amostras de solos nessa zona, visando: 1) avaliar a qualidade dos solos para a deteção de contaminantes de solos eventualmente provenientes do Site 5001 e, ainda, avaliar possíveis interferências na rede de abastecimento de águas para consumo humano nessa zona e 2) reapreciar o modelo conceptual de escoamento de águas subterrâneas, incluindo a função da falha de Santiago.

Neste relatório apresentam-se os resultados obtidos.

2 | Breve descrição do local

O Site 5001 é uma área de depósitos de combustíveis com capacidade para armazenar 242 milhões de litros o que, segundo CH2MHILL (2004), o tornaria no maior espaço de armazenamento de combustível da Força Aérea dos EUA. Segundo os mesmos autores, o local foi identificado como contaminado em 1996/97. Esta área terá sido usada para este fim desde a década de 50 do século passado, como atesta a Figura 2.1.



Figura 2.1 – Vista da área a sul do Site 5001 (extraída do Facebook, Grupo "Base das Lajes antigamente")

O Site 5001, com cerca de 20 hectares, está localizado a meio caminho entre as docas da Praia da Vitória, onde o combustível chega através de petroleiros, e a área principal da Base das Lajes. O Site localiza-se numa encosta e é cercado, a leste, pela íngreme Serra de Santiago (cf. Figura 2.1), numa área com a falha geológica de Santiago e densa vegetação natural. A sul localiza-se uma lagoa, o Paul da Praia, junto ao parque de campismo da cidade, alimentada pelo aquífero basal. Nas restantes direções, o Site é cercado por áreas residenciais, agrícolas ou de pastagem.

Neste local existiram 18 tanques de combustível diretamente colocados no solo e sem estruturas de contenção. Historicamente era prática comum enterrar a lama que era gerada durante a limpeza de tanques ao lado das portas de acesso dos tanques, sendo este um dos motivos da contaminação do Site, juntamente com inúmeros derrames identificados desde 1984. A estrutura dos reservatórios foi completamente mudada entre 1982 e 1986, tendo os solos removidos sido depositados no Site 5014 (*Former Running Track*). Admite-se que parte dos solos também possa ter sido colocada na área a sul, agora analisada. Atualmente existem 12 tanques de combustível, com dimensões variáveis, todos eles localizados sobre plataformas de betão e com um contentor secundário capaz de reter eventuais fugas de combustível.

Na Figura 2.1 é possível observar um *pipeline* precariamente colocado sobre as águas do Paul da Praia. A extensão do Paul era bastante superior à atual configuração, tendo havido muitas alterações da sua morfologia natural ao longo dos séculos. No século passado, uma parte desta área foi aterrada (com solos cuja origem se desconhece) e nas últimas décadas houve uma operação de restituição do Paul ao seu estado natural.

3 | Prospecção geofísica

3.1 Objetivo e metodologias

Os trabalhos realizados tiveram como objetivos a eventual deteção de zonas suscetíveis de conterem resíduos de hidrocarbonetos e obtenção de contributos para a melhoria do conhecimento sobre a localização da falha de Santiago, este último em complemento dos resultados já obtidos em 2009 neste local (Mota e Novo, 2010) e na *Main Gate*, também em 2009, em 2015 (Leitão e Mota, 2015) e em 2019 (Leitão, Mota e Antunes, 2019), pela sua possível contribuição para a dinâmica de circulação das águas no local do Site 5001.

Para desenvolver o trabalho foi utilizado o método geofísico da resistividade elétrica. Este método baseia-se na geração de um campo elétrico, através da injeção de corrente elétrica no terreno por meio de dois elétrodos metálicos nele cravados (dipolo de injeção), e na medição da diferença de potencial elétrico entre dois outros pontos, igualmente através de elétrodos metálicos cravados no terreno (dipolo de leitura).

A posição relativa entre os dipolos dá origem a diversos dispositivos, e à sua correspondente designação, e tem por fim procurar cumprir com os objetivos propostos com o programa de prospecção. Se o centro do dipolo de potencial coincide com o centro do dipolo de injeção temos uma investigação 1D na vertical desse ponto, adequada para estudo de estruturas do tipo aluvionar, e estamos perante as denominadas sondagens elétricas verticais (SEV) (de Schlumberger, se os dipolos têm diferentes dimensões, ou de Wenner, se os dipolos têm sempre a mesma dimensão – Figura 3.1); a conjugação de sucessivas SEV ao longo de um alinhamento permite realizar uma investigação 2D (perfil) na vertical do alinhamento formado pelos elétrodos. No caso em que a dimensão dos dipolos de injeção e de potencial é bastante inferior à distância entre eles, a investigação é igualmente 2D ao longo do alinhamento, mas a sensibilidade destes dispositivos à variação lateral (entre dipolos) da resistividade é muito mais elevada, pelo que são mais utilizados quando se pretendem estudar, por exemplo, zonas de fratura e intrusões (dispositivo dipolo-dipolo, por exemplo).

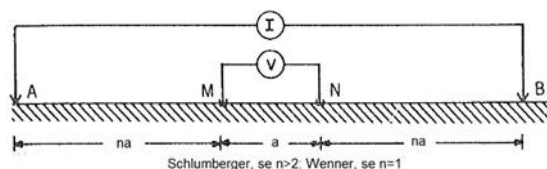


Figura 3.1 – Dispositivo de medição da resistividade elétrica de Schlumberger (se $n > 2$) ou de Wenner (se $n = 1$)

Para ilustrar o modo de representação dos valores da resistividade obtidos sob a forma de pseudo-seção bidimensional de resistividade elétrica, vamos tomar, como exemplo, o dispositivo de dipolo-dipolo o qual consiste na disposição no terreno de uma linha de elétrodos, igualmente espaçados, procedendo-se à injeção de corrente elétrica nos dois primeiros elétrodos (dipolo de injeção) e à

leitura sucessiva do potencial elétrico gerado no terreno nos 10 pares de elétrodos seguintes (dipolos de leitura), após o que o dipolo de injeção avança para a posição seguinte no alinhamento (perfil), repetindo-se o processo de leitura, assim sucessivamente, até se atingir o último par de elétrodos (ver Figura 3.2). O processamento dos dados assim obtidos, efetuado com recurso a programas informáticos, resulta na obtenção de tomografias de resistividade elétrica, que representam graficamente uma imagem bidimensional do terreno em profundidade, em termos de resistividade (modelo da resistividade elétrica do terreno). É de salientar que, no terreno, a disposição dos elétrodos é exatamente a mesma tanto para o dispositivo de Wenner como para o de dipolo-dipolo, pelo que é comum utilizarem-se ambos os dispositivos em cada alinhamento de elétrodos obtendo-se, assim mais do que um perfil de resistividade elétrica em cada local, em função da resposta do terreno ao tipo de dispositivo.

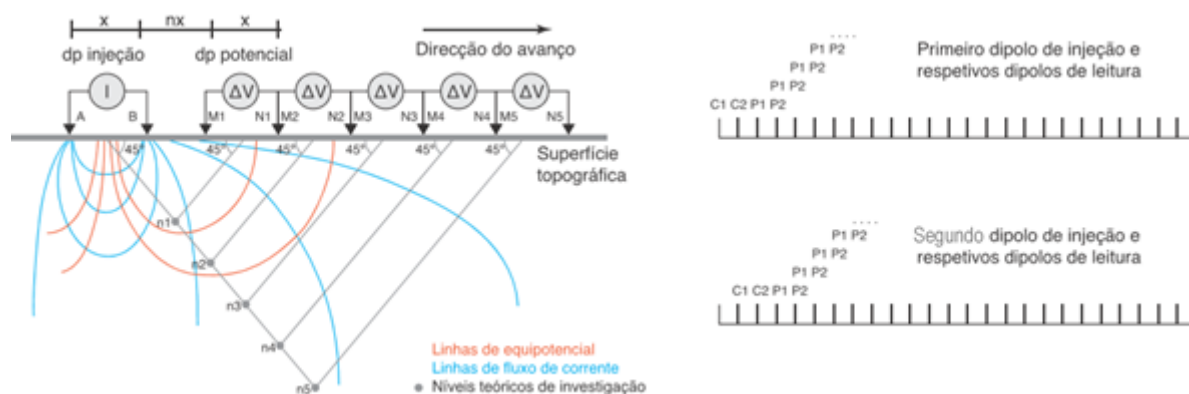


Figura 3.2 – Esquema da sequência de injeções de corrente (A e B, ou C1 e C2) e de leitura de potenciais (M1, N1, ..., ou P1 e P2) do dispositivo dipolo-dipolo, e correspondentes posições teóricas em profundidade, utilizadas para a representação 2D dos dados (pseudo-secção), a partir da movimentação do dispositivo ao longo do alinhamento materializado no terreno por uma série de elétrodos (esquema da direita)

As variações mais significativas do campo elétrico resultam, em geral, de heterogeneidades litológicas ou da presença de estruturas subsuperficiais com resistividades anómalas face ao meio envolvente. O grau de variação da distribuição do potencial elétrico depende do contraste entre a resistividade destas estruturas e o meio envolvente, bem como da sua orientação face ao dispositivo utilizado.

Tendo em conta que a corrente elétrica se propaga no terreno, principalmente, através do eletrólito constituído pela água existente nos seus vazios, pelos sais nela dissolvidos e pela maior ou menor presença de argila na matriz sólida, a resistividade elétrica depende não só da porosidade do terreno, como, também, do teor em água e da concentração iónica no meio aquoso, bem como da composição da matriz sólida do terreno.

3.2 Trabalhos realizados

Os trabalhos de prospecção geofísica tiveram lugar a sul do Site 5001, entre 21 e 25 de junho de 2020 (Figura 3.3).



**Figura 3.3 – Topo e esquerda - enquadramento do perfil PR1 (vista de SE para NO);
topo e direita - enquadramento do perfil PR3 (fotografia captada cerca dos 160 m
do perfil no sentido SE para NO); base - enquadramento do perfil PR7 (de NE para SO)**

Foram executados oito perfis (Figura 3.4) coincidindo um deles (PR8), parcialmente, com dois perfis executados em 2009 (PR34W - dispositivo de Wenner - e PR35DD - dispositivo de dipolo-dipolo), este último (PR8) com o objetivo de se proceder a uma avaliação da evolução da resistividade elétrica com o tempo.

A análise dos resultados que foram sendo obtidos, os condicionalismos espaciais, e a presença de mato denso e alto, levou à necessidade de se ir adaptando o programa de prospecção inicialmente previsto, em termos do posicionamento dos perfis, do seu número, da sua extensão e, principalmente, do tipo de dispositivo de leitura adotado (após a execução do perfil PR5 – o segundo a ser executado – passou-se a efetuar as medições apenas com o dispositivo de Wenner (nos dois primeiros também se utilizou o dispositivo de dipolo-dipolo)). No extremo NE do perfil PR8 ocorria mato denso e alto e foi reportada a existência de um poço raso encoberto pela vegetação, pelo que apenas foi possível repetir os primeiros 190 m da extremidade SO dos perfis PR34W e PR35DD.

No Quadro 3.1 constam as características geométricas dos perfis executados, que perfizeram uma extensão total de 1598 m, face aos 1492 m planeados para apenas seis perfis.

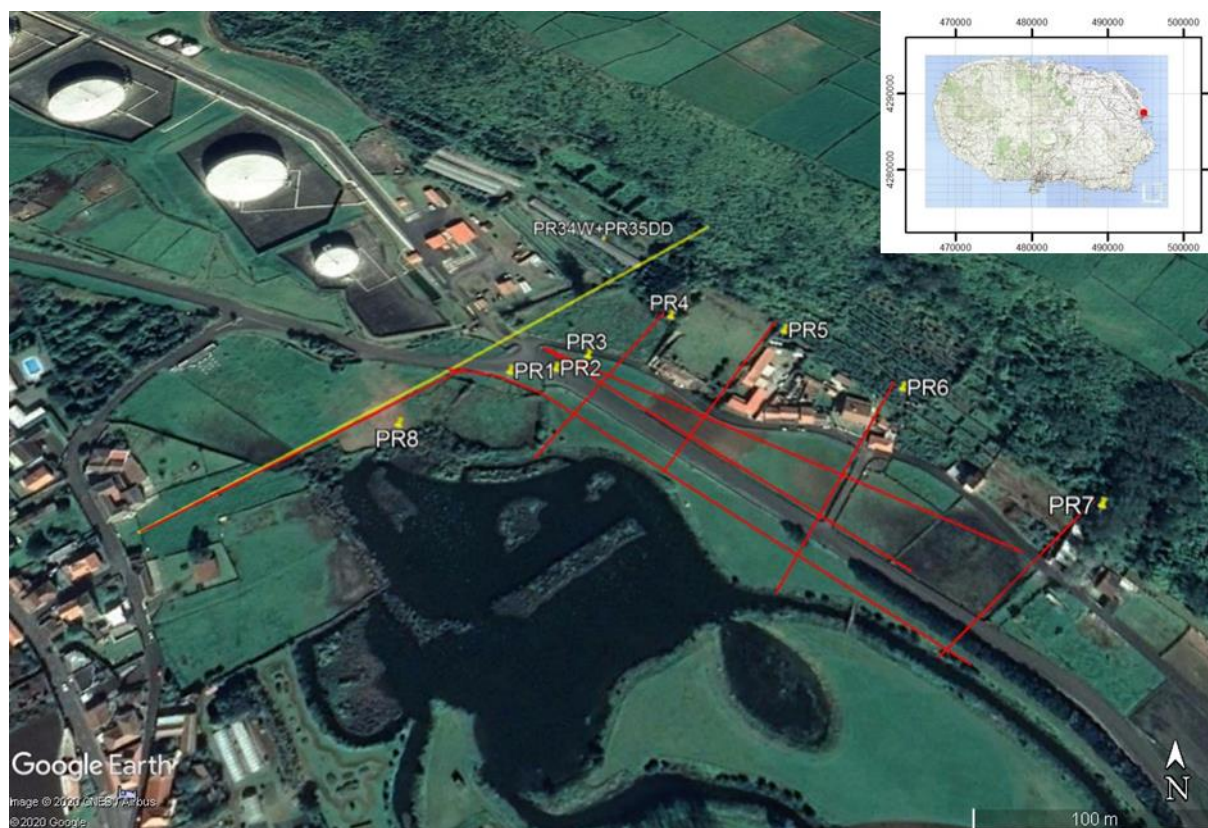


Figura 3.4 – Localização dos trabalhos de prospecção geofísica executados (2020 - traços a cor vermelha; 2009 - traço a cor amarela)

Os dados recolhidos (resistividades elétricas aparentes) foram processados com o programa Res2Dinv, resultando em tomografias bidimensionais de resistividade elétrica. A topografia do terreno foi incorporada nos modelos.

Quadro 3.1 – Características geométricas dos perfis de prospecção geofísica

Perfil	Comprimento (m)		Distância dipolar (m)	Profundidade máxima de investigação (m)
	Planeado	Executado		
PR1	400	320	4	26,2
PR2	0	240	4	26,2
PR3	0	280	4	26,2
PR4	210	132	4	26,2
PR5	138	144	4	26,2
PR6	160	160	4	26,2
PR7	200	132	4	26,2
PR8	384	190	5	32,8

3.3 Resultados obtidos

Os modelos de resistividade elétrica obtidos são apresentados com o observador virado para os perfis, tal como se ilustra na imagem de enquadramento constante na Figura 3.5, e que também consta em cada uma das figuras de conjunto, cf. Figura 3.6 e Figura 3.7, respetivamente para os perfis realizados segundo as direções NO-SE e SO-NE. Estes modelos são apresentados de forma integrada, com as mesmas escalas vertical, horizontal e cromática, e com a identificação de algumas das estruturas presentes no terreno.



Figura 3.5 – Ilustração do posicionamento de um observador para análise dos modelos de resistividade elétrica obtidos em cada perfil

Nos modelos, a escala vertical corresponde às cotas do terreno. Com base no espectro de valores obtidos, a escala logarítmica de representação da gama de resistividades elétricas obtida encontra-se compreendida entre 1 ohm.m (azuis) e 32 ohm.m (encarnados). Destaca-se que todos os valores de resistividade obtidos são muito baixos.

Na Figura 3.8 apresentam-se, num posicionamento e dimensões aproximados, todos os modelos sobrepostos sobre o mapa do Site 5001, com o posicionamento conhecido da falha de Santiago e o seu posicionamento interpretado com base dos modelos de resistividade elétrica.

Tal como foi mencionado na secção anterior, o perfil PR8 coincidiu parcialmente (190 m iniciais) com os perfis PR34W e PR35DD executados em junho de 2009. Dado que o perfil PR34W foi obtido com o mesmo dispositivo (Wenner) e a mesma distância dipolar que o perfil PR8, a análise comparativa da evolução da resistividade elétrica neste alinhamento foi efetuada apenas entre os perfis PR8 e PR34W. Assim, constam, na Figura 3.9, o modelo de resistividade elétrica obtido para o perfil PR34W, após reprocessamento com a restrição à dimensão do perfil PR84W, o modelo obtido para o perfil PR8 e a secção da evolução da resistividade elétrica entre ambos os modelos, obtida por diferença entre 2009 e 2020, onde os valores de percentagem de variação mais baixos (cor azul) representam uma redução nos valores da resistividade elétrica de 2009 para 2020.

Na Figura 3.10 apresentam-se, num posicionamento e dimensões aproximados, a secção da diferença da resistividade elétrica entre os modelos sobrepostos sobre o mapa do Site 5001.

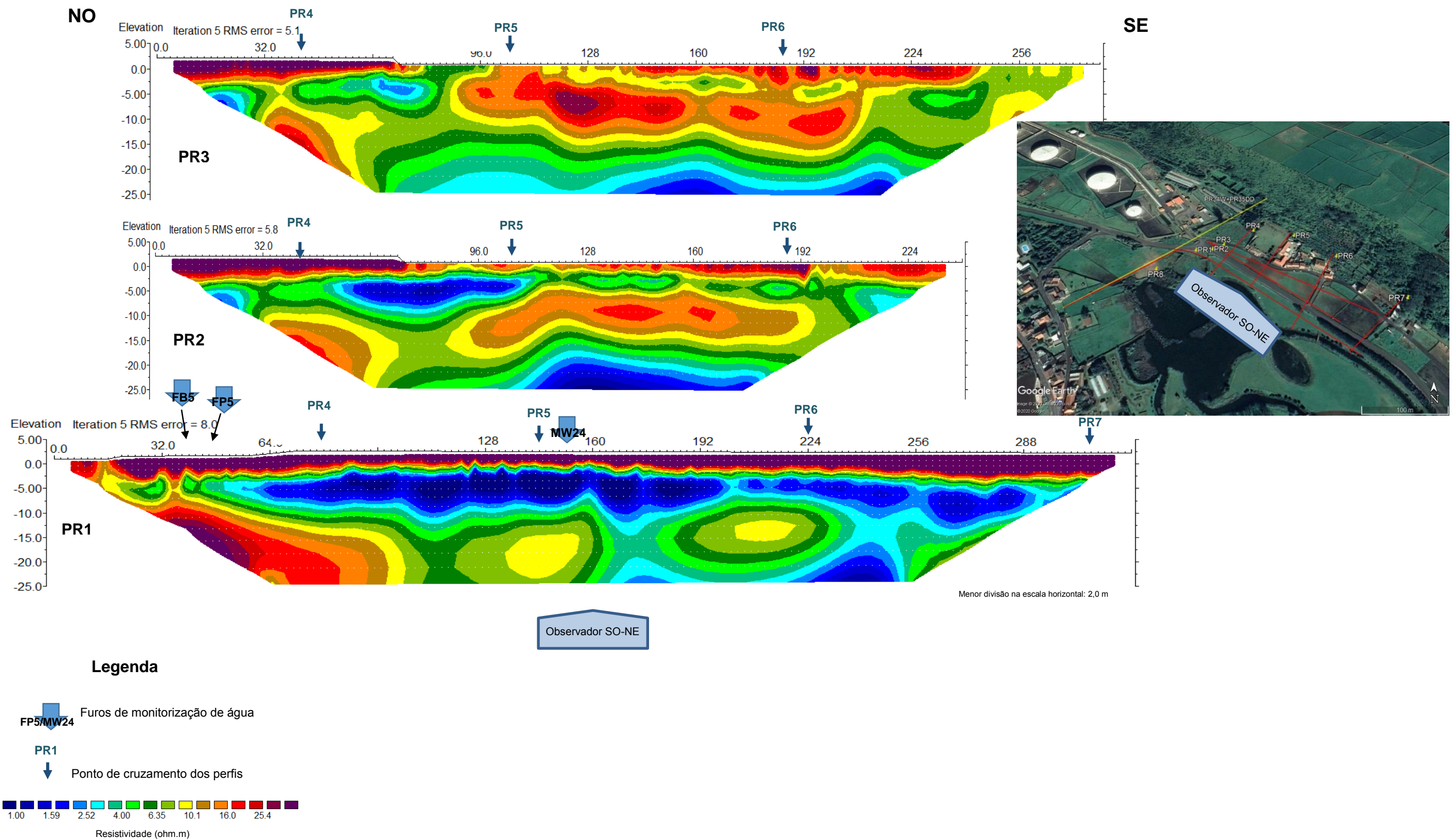


Figura 3.6 – Conjunto dos modelos obtidos, segundo a direção NO-SE, representados considerando que o observador se encontra junto ao perfil PR1, virado na direção SO-NE, apresentados à mesma escala entre si, e com o seu início na real posição relativa entre si

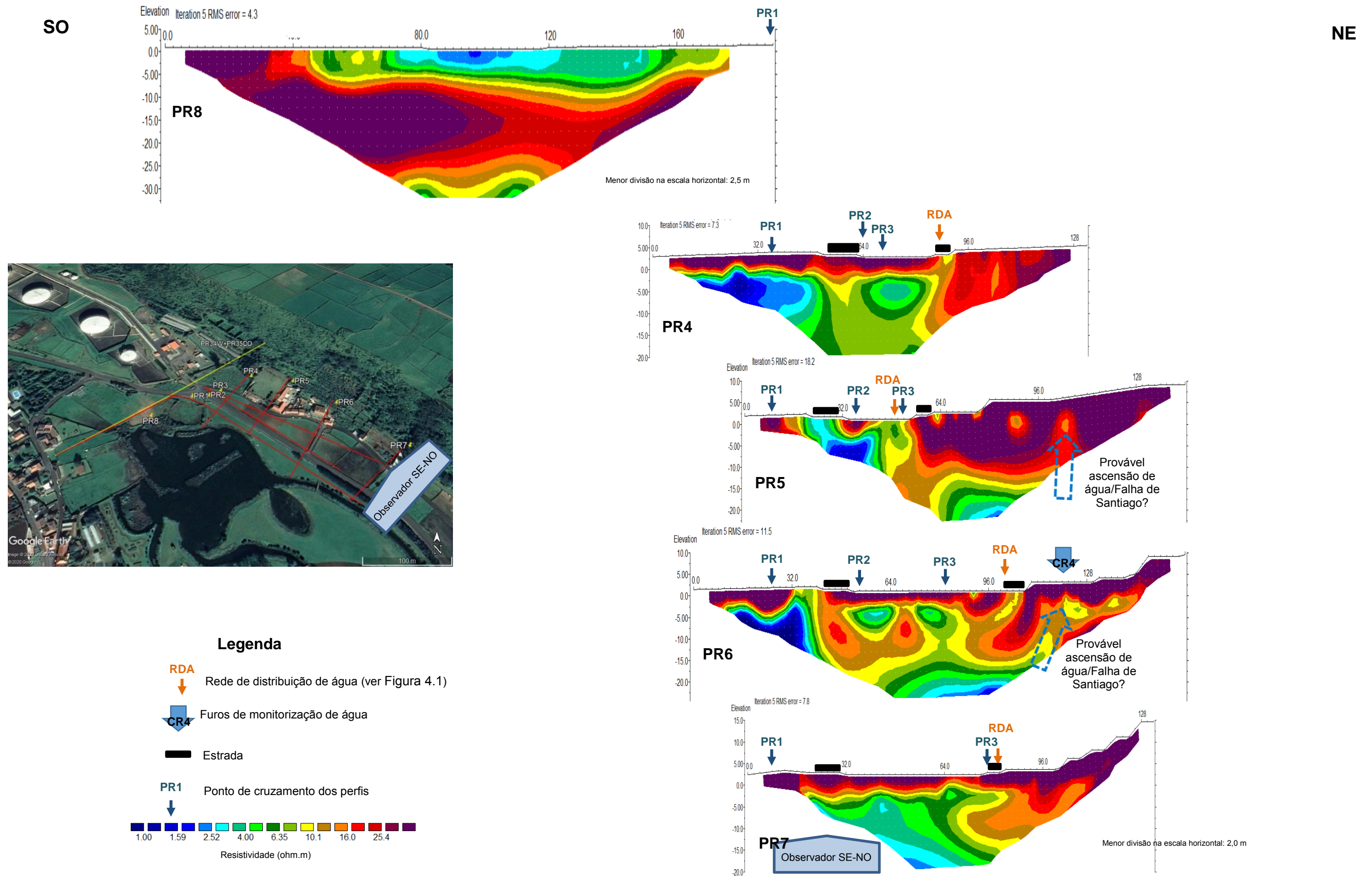


Figura 3.7 – Conjunto dos modelos obtidos segundo a direção SO-NE, representados considerando que o observador se encontra junto ao perfil PR7, virado na direção SE-NO, e apresentados à mesma escala entre si

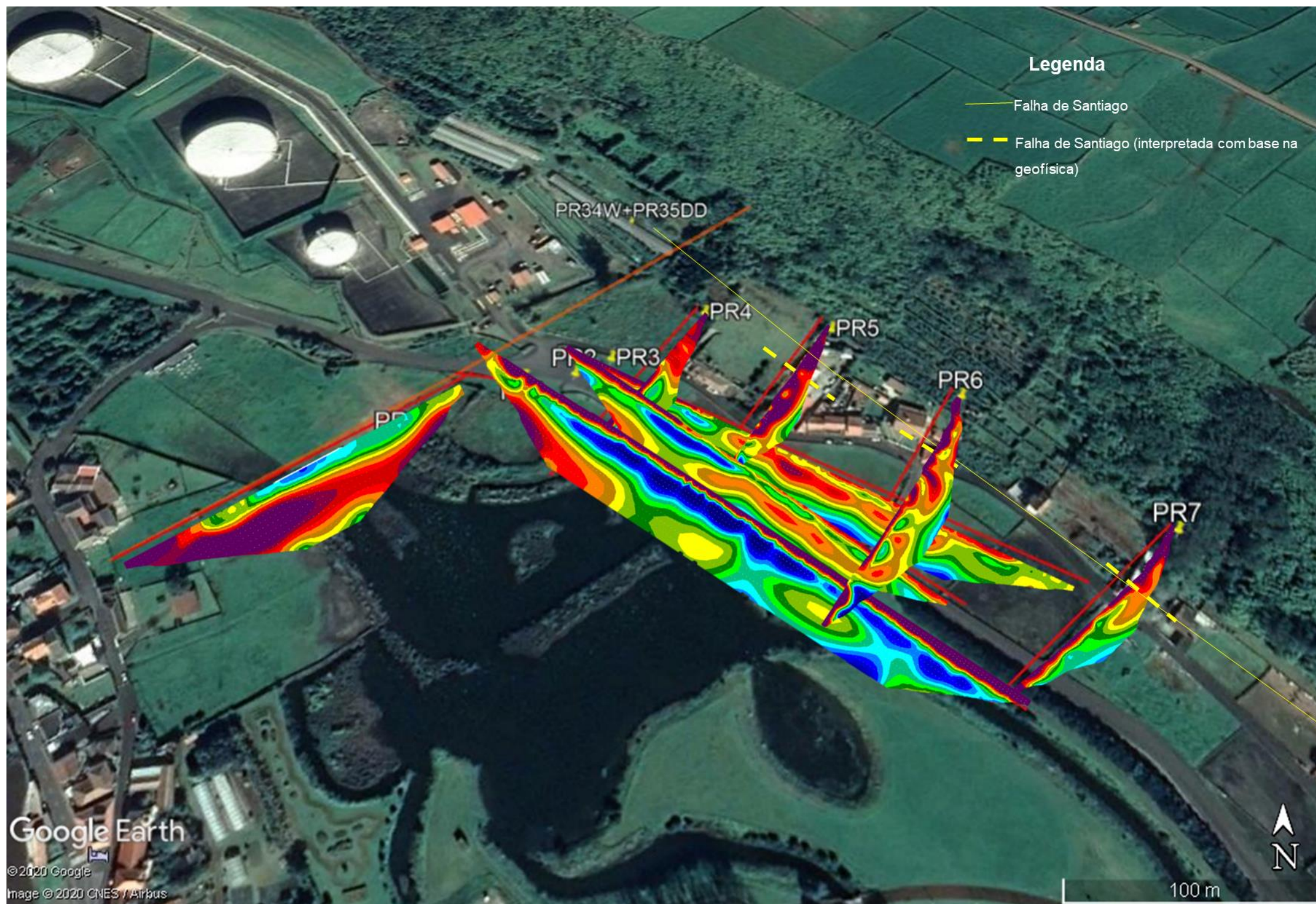


Figura 3.8 – Implantação aproximada de todos os modelos de resistividade obtidos na planta de localização dos trabalhos realizados no Site 5001

Página intencionalmente deixada em branco

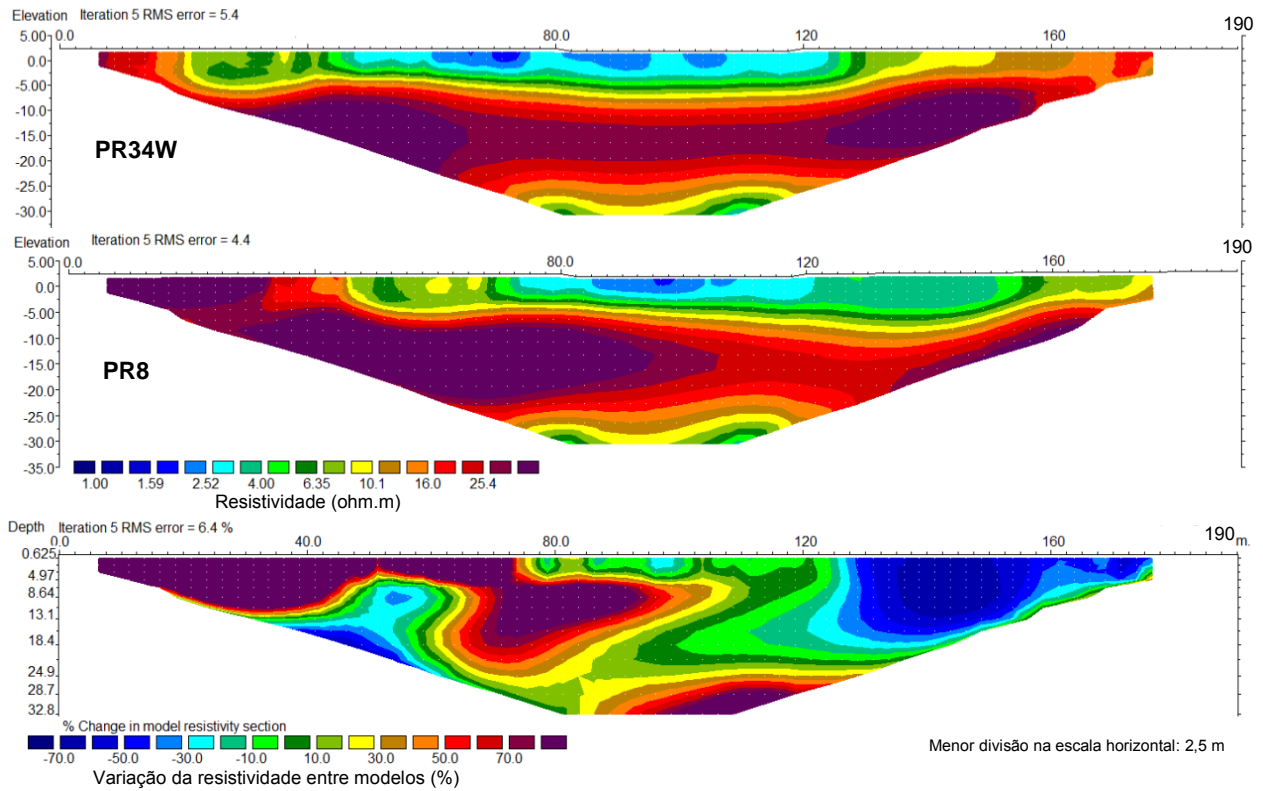


Figura 3.9 – Topo e centro – Modelos de resistividade elétrica obtidos para os perfis PR34W (2009) e PR8, respetivamente; base – secção com a variação da resistividade elétrica entre os modelos

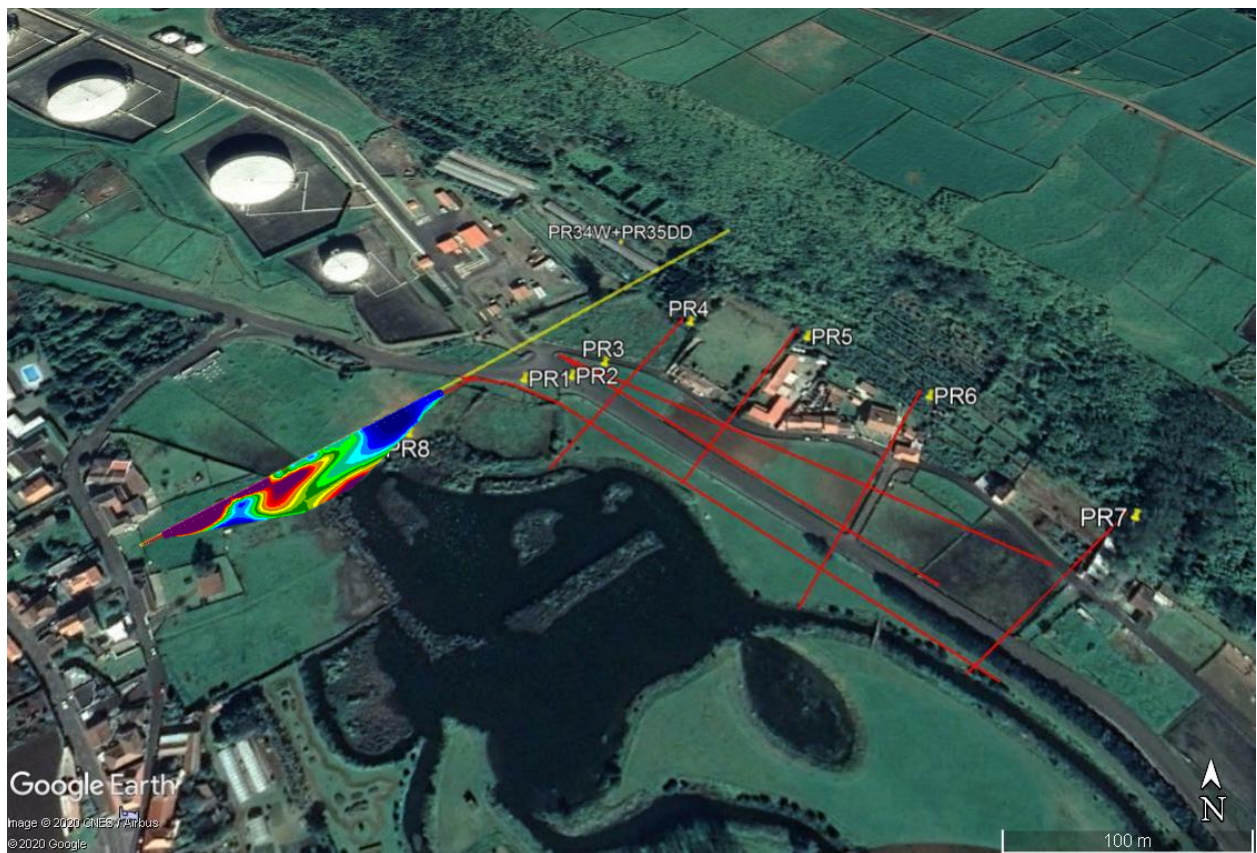


Figura 3.10 – Implantação aproximada da secção de diferenças entre os modelos obtidos para os perfis PR34W e PR8 na planta de localização dos trabalhos realizados no Site 5001

Pela importância da possível diluição de sais e contaminantes com a água da chuva, e o consequente aumento dos valores da resistividade elétrica, apresentam-se no Quadro 3.2 os valores anuais da precipitação em Angra do Heroísmo, observando-se a diminuição da precipitação na última década.

Quadro 3.2 – Precipitação anual (mm) em Angra do Heroísmo (Fonte: PORDATA)

2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
931,4	1337,9	1154,8	1088,5	1046,4	1325,3	1161,5	1026,3	889,8	1135,5
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
1388,9	713,3	1089,3	895,1	-	1251,6	762,3	906,8	816	984,1

Da análise aos modelos obtidos destaca-se o seguinte:

- Local caracterizado, na generalidade, por valores baixos da resistividade elétrica, tanto à superfície, como em profundidade, atribuível à presença de sais resultantes da influência subterrânea da maré e também através da água do Paul, que, em períodos de maior pluviosidade, aflora numa importante parte da área prospectada. Esta área foi aterrada (cf. Figura 2.1 – onde o pipeline se encontra aproximadamente na atual localização da estrada proveniente do porto de Praia da Vitória), estando os terrenos muito húmidos e com o nível piezométrico a cerca de 1 a 2 m abaixo da superfície;
- Presença nos perfis PR2 e PR3 de uma camada de mais elevada resistividade, com topo aproximadamente à cota -5 m; acima da qual os materiais deverão corresponder ao aterro do Paul;
- Redução da expressão da influência do Paul ou do aquífero basal, à medida que nos aproximamos da serra de Santiago (PR1 a PR3 - Figura 3.6);
- Concordância da zona de menor resistividade situada mais à superfície e ocorrente na extremidade SE do perfil PR3, bem como das zonas situadas aproximadamente entre os 76 m e os 100 m dos perfis PR2 e PR3, com as manchas mais escuras do terreno observáveis na imagem obtida por satélite (indiciadoras de terreno enlameado) - no decurso do trabalho de campo, os elétrodos saíam mais húmidos do terreno no extremo SE do perfil PR3 e espetavam-se mais facilmente no extremo SE do perfil PR3 e na zona com vegetação mais verdejante e densa observável na fotografia da Figura 3.3, respeitante aos perfis PR2 e PR3;
- Identificação de um provável movimento ascendente de água aos 104 m do perfil PR5 e aos 120 m do perfil PR6, neste último caso aproximadamente coincidente com a nascente existente no pátio interior de uma casa (CR4); esta circulação ascendente neste local pode estar relacionada com os valores de contaminação detetados nesta mina em Leitão, Mota e Antunes (2019, cf. Quadro 4.10) e Leitão e Antunes (2019, cf. Figura 3.15);
- Interpretação do posicionamento da falha de Santiago aproximadamente coincidente com o que é conhecido e da sua função de barreira ao escoamento subterrâneo (valores de resistividade mais altos após a zona da falha);

- Redução da resistividade elétrica (aumento da condutividade elétrica) entre junho de 2009 e junho de 2020 nos últimos 70 m do perfil PR8, num alinhamento entre o parque de combustíveis e o Paul; esta redução poderá traduzir o aumento da concentração da salinidade e/ou da contaminação, originado pelo efeito das marés ou pela diminuição da pluviosidade. Com efeito, no período 2000-2009 a precipitação média anual foi de 1100 mm (Quadro 4.2), enquanto no período 2010-2019 foi de 980 mm – redução de 12% (considerando o valor de 1000 mm para 2014), com os últimos quatro anos a apresentarem uma média ainda mais baixa - 867 mm, correspondendo a uma redução de 22%.

Com base nos resultados provisórios obtidos logo após a execução dos perfis, nomeadamente nos pontos de cruzamento entre os perfis PR2 e PR3 com os perfis PR5 e PR6 e no local do perfil PR7 próximo do extremo SE do Perfil PR3, tendo em conta os menores valores de resistividade elétrica aí obtidos mais próximo da superfície, procedeu-se à realocação de algumas das valas de prospeção previstas para este local, e executadas posteriormente, com o objetivo de recolher solos, a serem sujeitos a análise para deteção da eventual presença de hidrocarbonetos, e cujos resultados são apresentados na secção 4.3.

4 | Solos

4.1 Objetivo e metodologias

A recolha de amostras de solos para posterior análise química foi efetuada na área a sul do Site 5001 e teve como objetivo caracterizar a sua qualidade e avaliar potenciais contaminações relacionadas com o Site. Para esse efeito foi selecionada uma malha de amostragem abrangendo a área em análise, ajustada para incluir os locais onde foram encontradas maiores anomalias geofísicas (cf. secção 3.3 e Figura 4.1).

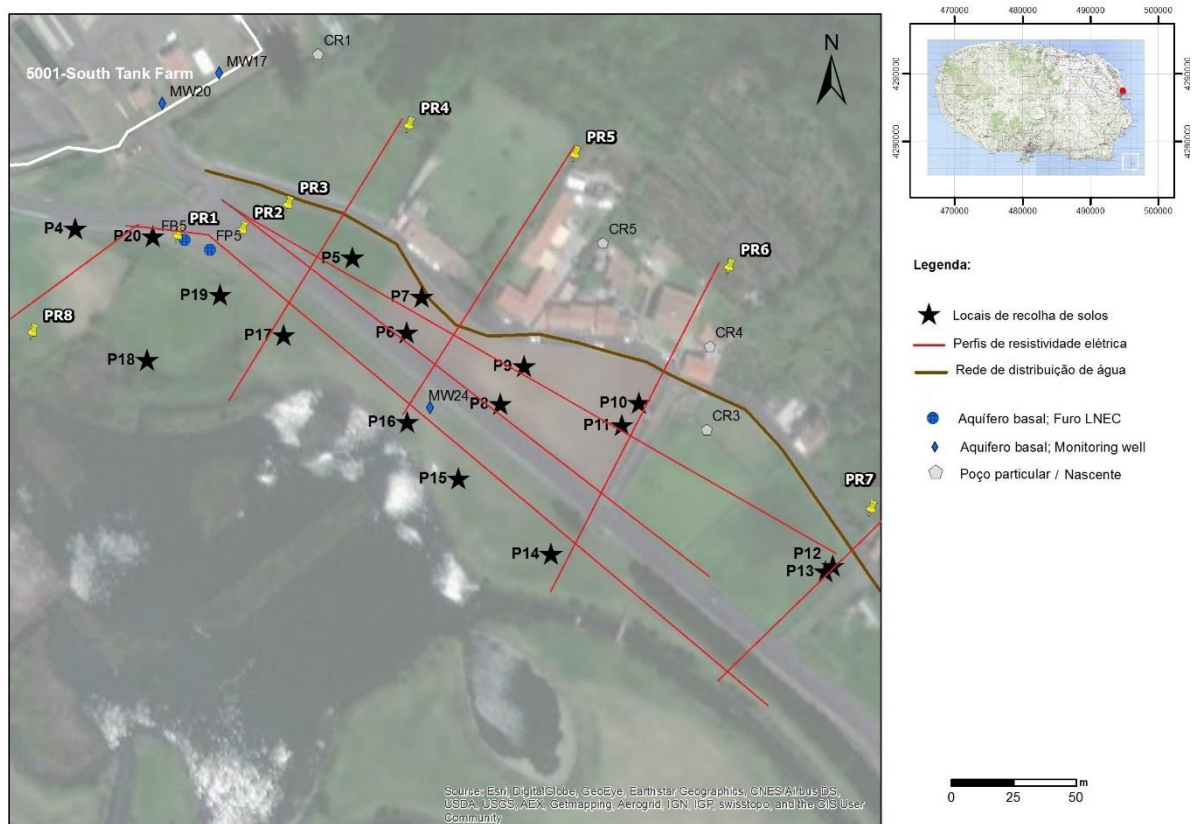


Figura 4.1 – Mapa com a localização dos perfis de resistividade elétrica e dos locais de recolha dos solos, a sul do Site 5001

Os resultados da qualidade dos solos foram comparados com os valores de referência internacionalmente mais utilizados: a legislação do Canadá, adotada pela APA em 2019, (também conhecida por normas do Ontário, cf. ME, 2011; APA, 2019) e a legislação da Holanda (VROM, 2010). A legislação do Canadá tem os valores padrão (*standard*) definidos em função do uso do solo (agricultura, industrial e residencial) e do uso das águas subterrâneas no local. Neste estudo foi utilizada a *Table 2: Full Depth Generic Site Condition Standards in a Potable Ground Water Condition*. A legislação da Holanda define um valor máximo a partir do qual considera que deve haver

intervenção (*Intervention Value*). Os valores da legislação da Holanda foram utilizados não só como comparação com as normas do Canadá, mas também para incluir parâmetros não legislados pela Holanda. Estes valores de referência são apresentados mais à frente neste relatório, no Quadro 4.2, onde se apresentam os resultados da qualidade dos solos.

4.2 Trabalhos realizados

A campanha para a recolha de solos para análise química foi realizada pelo LREC entre os dias 30 de junho e 1 de julho de 2020. A recolha foi feita em 17 locais (P4 a P20, cf. Figura 4.1), tendo sido colhidas amostras a duas profundidades. As amostras dos solos foram extraídas nas paredes dos taludes de prospecção, previamente abertos com retroescavadora, através da cravação manual dos frascos utilizados na recolha, de forma a evitar a perda de compostos voláteis (cf. Figura 4.2). O relatório do LREC apresentará os detalhes dos procedimentos adotados e das amostras recolhidas.



Figura 4.2 – Aspeto geral do procedimento de recolha de solos pelo LREC

O Quadro 4.1 apresenta as principais características dos locais de recolha dos solos. As amostras mais profundas não ultrapassam os 2 m de profundidade e correspondem sensivelmente à profundidade do nível piezométrico.

Quadro 4.1 – Coordenadas e profundidades de amostragem dos solos no Site 5001

Ponto	M	P	Cota	Profundidade de recolha dos solos (m)	
P4	494 616,155	4 287 583,582	1,572	P4 - 0,9-1,0	P4 - 1,4-1,5
P5	494 726,754	4 287 571,847	1,944	P5 - 0,9-1,0	P5 - 1,7-1,8
P6	494 748,499	4 287 542,077	1,242	P6 - 0,4-0,5	P6 - 1,1-1,2
P7	494 754,421	4 287 556,253	0,987	P7 - 0,3-0,4	P7 - 0,9-1,0
P8	494 785,954	4 287 513,503	1,561	P8 - 0,9-1,0	P8 - 1,5-1,6
P9	494 795,378	4 287 528,625	1,451	P9 - 0,7-0,8	P9 - 1,3-1,4
P10	494 841,289	4 287 513,983	1,370	P10 - 0,4-0,5	P10 - 1,1-1,2
P11	494 834,487	4 287 505,118	1,242	P11 - 0,5-0,6	P11 - 1,1-1,2
P12	494 918,675	4 287 448,864	1,008	P12 - 0,9-1,0	P12 - 1,9-2,0
P13	494 915,698	4 287 446,575	0,919	P13 - 0,4-0,5	P13 - 1,1-1,2
P14	494 806,054	4 287 453,608	2,314	P14 - 0,9-1,0	P14 - 1,7-1,8
P15	494 769,176	4 287 483,743	2,255	P15 - 0,9-1,0	P15 - 1,9-2,0
P16	494 748,687	4 287 506,319	2,379	P16 - 0,9-1,0	P16 - 1,7-1,8
P17	494 699,461	4 287 540,970	2,671	P17 - 0,9-1,0	P17 - 1,8-1,9
P18	494 644,796	4 287 531,134	1,050	P18 - 0,5-0,6	P18 - 1,1-1,2
P19	494 673,912	4 287 556,980	1,041	P19 - 0,4-0,5	P19 - 1-1,1
P20	494 647,085	4 287 580,402	1,839	P20 - 0,9-1	P20 - 1,4-1,5

As análises químicas realizadas aos solos incluem o mesmo conjunto de parâmetros que tem vindo a ser analisado nos diversos estudos em curso nos últimos anos para acompanhar a evolução da situação ambiental relacionada com a utilização da Base das Lajes pelos EUA (e.g. Leitão, Mota e Antunes, 2019). Estas análises incluem um conjunto de metais pesados e diversos compostos orgânicos agrupados em HTP (Hidrocarbonetos Totais do Petróleo), BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno), COV (Compostos Orgânicos Voláteis) e HAP (Hidrocarbonetos Aromáticos Polinucleares). No Quadro 4.2, apresentado na secção seguinte, listam-se estes compostos orgânicos.

4.3 Resultados obtidos

O Quadro 4.2 apresenta os resultados das análises químicas de amostras dos solos recolhidas a sul do Site 5001 (cf. Figura 4.1).

Página intencionalmente deixada em branco

A análise do Quadro 4.2 permite observar que as concentrações em BTEX e em COV se encontram abaixo dos respetivos limites de quantificação. O mesmo não se pode dizer para as concentrações em HTP ou HAP.

A Figura 4.3 e a Figura 4.4 ilustram os resultados obtidos para os HTP, observando-se que há diversas concentrações acima dos limites de quantificação, embora não ultrapassem as normas do Canadá utilizadas (que consideram a qualidade dos solos em locais com condições para águas subterrâneas potáveis, Quadro 4.2). Os valores mais elevados não se observam à saída do Site 5001 mas sim mais a sul. Apesar da pouca diferença entre as profundidades amostradas, observa-se que tanto as camadas mais superficiais como as mais profundas dos solos apresentam valores acima do limite de quantificação, com o valor mais elevado observado na camada do P6 recolhida entre 1,1 e 1,2 m de profundidade. Com exceção desta amostra, estes valores são da mesma ordem de grandeza dos reportados para amostras recolhidas junto ao Paul em 2019 (Leitão, Mota e Antunes, 2019).

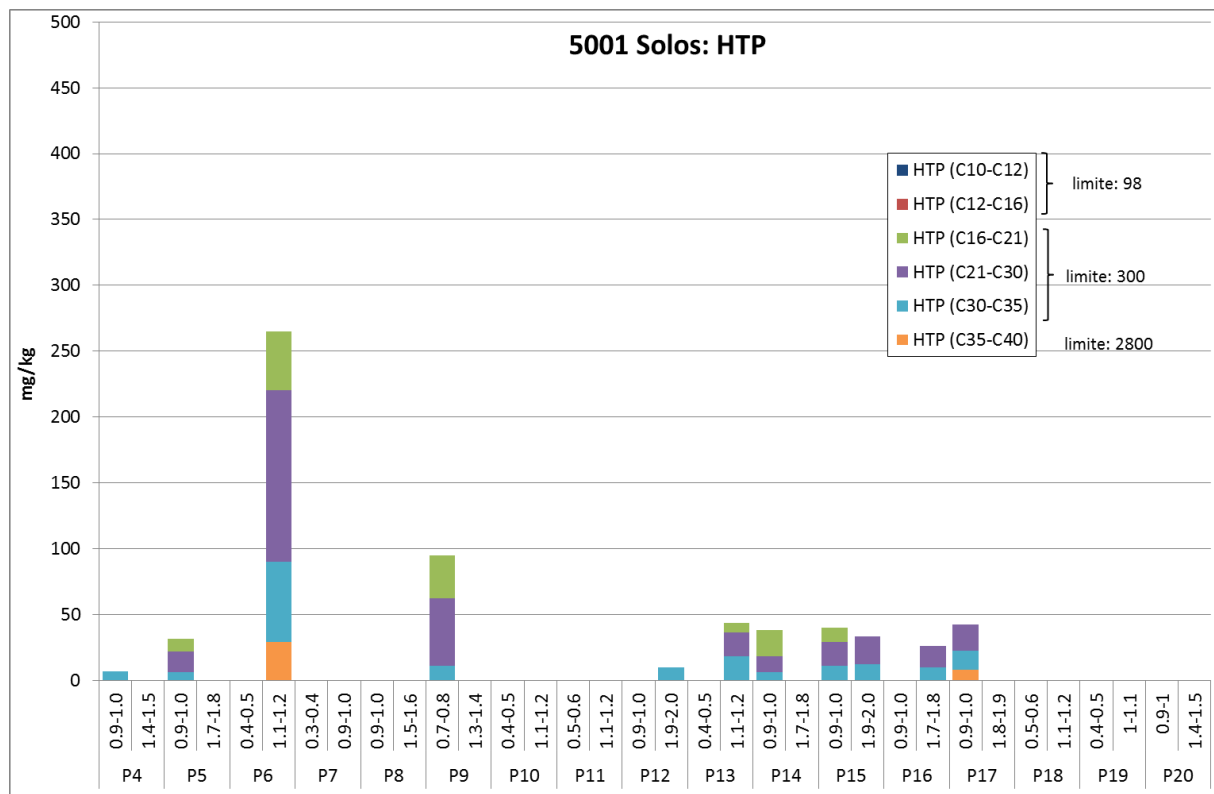


Figura 4.3 – Concentração em HTP nos solos a sul do Site 5001

A Figura 4.5 e a Figura 4.6 apresentam as concentrações em HAP para os mesmos solos.



Figura 4.4 – Mapa da concentração em HTP nos solos a sul do Site 5001

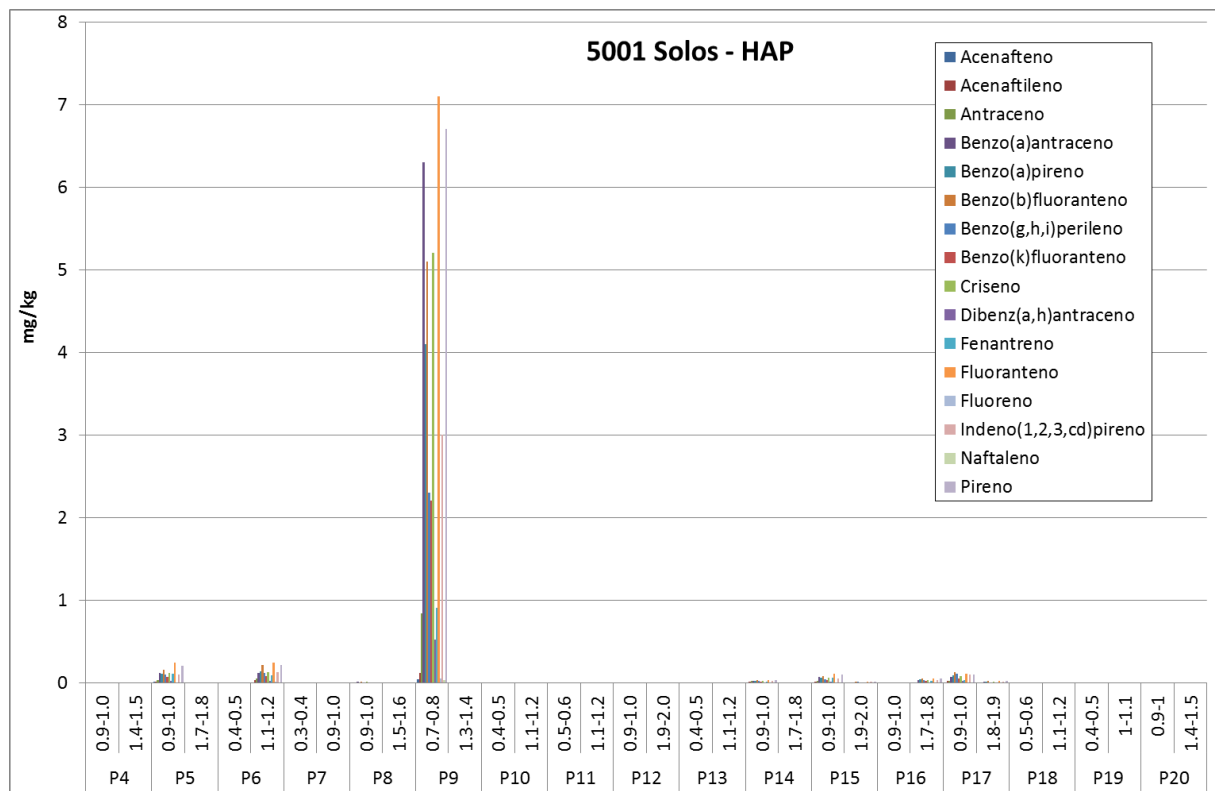


Figura 4.5 – Concentração em HAP nos solos a sul do Site 5001



Figura 4.6 – Mapa da concentração em HAP nos solos a sul do Site 5001

As amostras com valores acima dos limites de quantificação para HAP também apresentaram concentrações positivas em HTP. À semelhança do verificado para os HTP, também os HAP apresentam valores abaixo dos limites de quantificação à saída do Site 5001 e os valores mais altos no centro da área estudada. Embora a profundidade dos perfis geofísicos seja muito superior à da recolha de solos, observa-se nos modelos geofísicos obtido para os perfis PR1 a PR3 (Figura 3.6) que esta área é a mais influenciada pela oscilação da água do Paul podendo haver transporte subterrâneo de contaminantes presentes nos solos.

Do conjunto das amostras, apenas a P9 (profundidade 0,7-0,8 m) apresenta concentrações em diversos HAP acima das normas do Canadá (Quadro 4.2). A concentração de 16 HAP apresentada num resumo de estudos realizados em 11 cidades mostra valores entre o limite de deteção (l.d.) e 5,6 mg/kg, com média calculada de 4,42 mg/kg e mediana de 1,10 mg/kg (Wilcke, 2000). Com exceção da amostra do solo P9 superficial, os intervalos de concentração encontrados são inferiores aos valores relatados em estudos conduzidos em cidades europeias, por ex. 0,281-4,49 mg/kg em Ljubljana, 0,148-3,41 mg/kg em Torino, 1,49-51,8 mg/kg em Glasgow (Morillo *et al.*, 2007) e l.d.-1,07 mg/kg em Lisboa (Leitão *et al.*, 2008).

Considera-se haver três razões principais que podem justificar a presença de hidrocarbonetos nos solos analisados, cujos valores às profundidades amostradas (i.e. acima do nível saturado) são baixos (com uma exceção): 1) deposição atmosférica, possivelmente relacionada com o tráfego aéreo (os valores encontrados nos solos, sendo inferiores aos de diversas cidades europeias, não deixam

de apresentar contaminação atmosférica em HAP, como atesta o branco de campo¹ recolhido na área durante o processo de amostragem de águas em junho de 2020); 2) fugas de diesel ou lubrificantes de máquinas agrícolas, atendendo a que as concentrações mais elevadas se encontram numa área agrícola onde, por vezes, serão usadas máquinas e 3) transporte e deposição de solos do Site 5001 há alguns anos. Observa-se que as cadeias de HTP correspondem essencialmente ao espectro encontrado para diesel e lubrificantes (Figura 4.7).

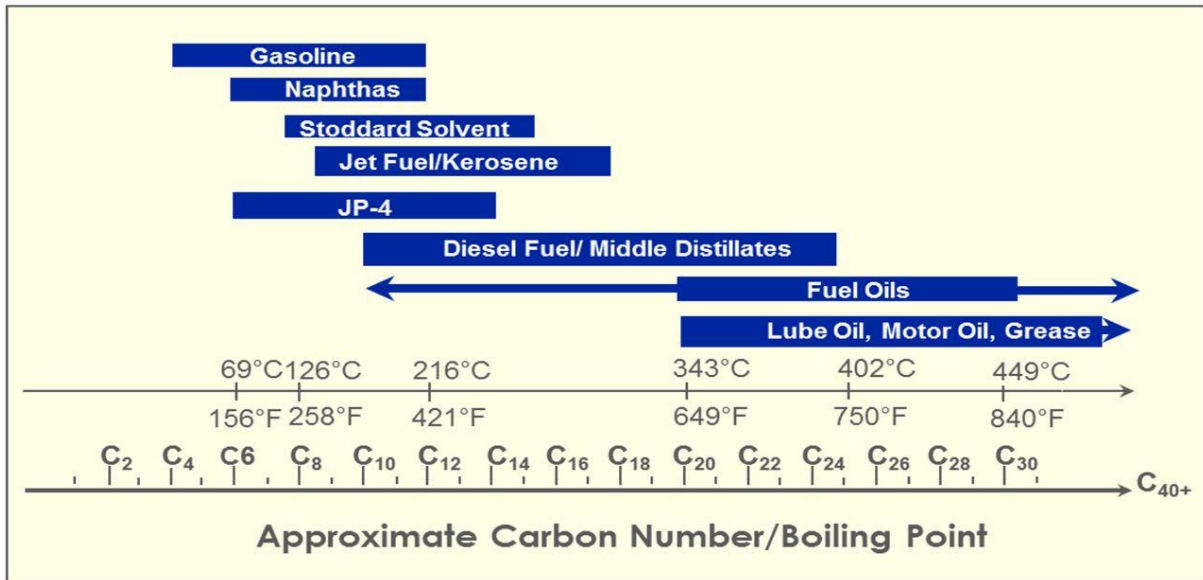


Figura 4.7 – Composição típica das cadeias de carbono para diferentes hidrocarbonetos (cf. <https://clu-in.org/conf/itrc/TPHrisk/>)

As concentrações de metais pesados estão dentro da mesma ordem de grandeza entre locais, mantendo-se os valores de vanádio, berílio e arsénio encontrados anteriormente em solos recolhidos naquele local (Leitão, Mota e Antunes, 2019 e Leitão e Antunes, 2019). Como referido em diversos relatórios anteriores (Leitão e Henriques, 2019), crê-se que a origem destes elementos se deve à natureza vulcânica dos solos da ilha Terceira.

¹ "branco de campo" é uma amostra de água destilada colocada em frascos cujas tampas são abertas durante o processo de amostragem, visando detetar alguma possível contaminação por contacto atmosférico

5 | Conclusões e recomendações

Neste relatório apresentam-se os resultados de uma campanha de prospeção geofísica e de análise de qualidade química de um conjunto de amostras de solos, tendo por objetivo aprofundar o conhecimento relativamente à eventual existência de contaminantes nos solos a jusante do Site 5001 (*South Tank Farm*) e avaliar possíveis interferências na rede de abastecimento de águas para consumo humano nessa zona. A prospeção geofísica efetuada permitiu ainda reapreciar o modelo conceptual de escoamento de águas subterrâneas, incluindo a provável função de barreira ao escoamento subterrâneo da falha de Santiago.

Dados os elevados valores de salinidade das águas neste local, não foi possível identificar nos modelos finais de resistividade elétrica nenhum sinal evidente que correspondesse à presença de hidrocarbonetos. Observou-se, no extremo NE do perfil PR8, uma evolução da resistividade com o tempo, por comparação com resultados de uma campanha anterior, que pode corresponder a um aumento de contaminação, mas também pode ser atribuída à maior presença de sais resultantes de oscilações da maré ou da redução da pluviosidade.

Identificou-se a provável localização do substrato do antigo Paul no local onde foram realizados os perfis PR2 e PR3, correspondente à região de maior resistividade relativa, a uma profundidade intermédia (topo à cota -5 m), e também presente nas secções NE dos perfis transversais.

Os perfis transversais sugerem um posicionamento da falha de Santiago aproximadamente coincidente com o que é conhecido e que coincide com o local onde ocorre uma nascente (CR4) e onde se identificam, nos perfis PR5 e PR6, prováveis movimentos ascensionais de água.

Em relação à qualidade dos solos, as amostras recolhidas até profundidades de 2 m apresentavam, nalguns casos, concentrações de HTP e HAP acima dos limites de quantificação, mas abaixo dos valores máximos estabelecidos pela legislação do Canadá (adotada pela APA em 2019) para a qualidade dos solos em locais com condições para águas subterrâneas potáveis, com exceção de um local que apresentou concentrações de HAP superiores a estes, mas inferiores aos valores de intervenção da Holanda. Considera-se haver três razões principais que podem justificar a presença de hidrocarbonetos nos solos analisados, cujos valores às profundidades amostradas (i.e. acima do nível saturado) são baixos (com uma exceção): 1) deposição atmosférica, possivelmente relacionada com o tráfego aéreo (os valores encontrados nos solos, sendo inferiores aos de diversas cidades europeias, apresentam contaminação atmosférica em HAP); 2) fugas de diesel ou lubrificantes de máquinas agrícolas, atendendo a que as concentrações mais elevadas se encontram numa área agrícola onde, por vezes, serão usadas máquinas e 3) transporte e deposição de solos do Site 5001 há alguns anos. Os dados obtidos até ao presente não indiciam que tenha havido deposição de solos contaminados nesta zona.

As concentrações de metais pesados estão dentro da mesma ordem de grandeza entre locais, mantendo-se os valores de vanádio, berílio e arsénio encontrados anteriormente em solos recolhidos

naquele e noutros locais da ilha, cuja origem se atribui à natureza vulcânica dos solos da ilha Terceira.

Apesar de os elementos apresentados neste relatório não suscitarem preocupação relativamente à contaminação dos solos e à consequente migração de hidrocarbonetos para a rede de distribuição de água para consumo humano, os resultados apresentados em relatórios anteriores para as águas subterrâneas justificam que se mantenha o acompanhamento semestral das análises à água do Paul, dos poços/nascente e dos piezómetros neste local, bem como a monitorização da qualidade da água na rede de distribuição de água para consumo humano nesta zona.

Lisboa, LNEC, setembro de 2020

VISTO

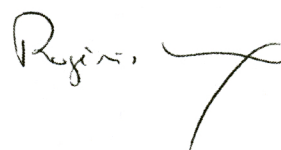
AUTORIA

O Conselho Diretivo



Teresa E. Leitão

Investigadora Principal com Habilitação



Rogério Mota

Investigador Auxiliar



Maria de Lurdes Antunes

Investigadora-Coordenadora

Referências bibliográficas

- APA, 2019 – **Solos Contaminados – Guia Técnico. Valores de Referência para o Solo.** Agência Portuguesa do Ambiente. [https://apambiente.pt/zdata/Políticas/Solos/Guia%20Tecnico Valores%20de%20Referencia 2019_01.pdf](https://apambiente.pt/zdata/Políticas/Solos/Guia%20Tecnico%20Valores%20de%20Referencia%202019_01.pdf).
- CH2MHILL, 2004 – **Discovery of Suspected and Contaminated Sites Study (DISCO-Study), Lajes Field, Azores, Portugal.** Março de 2004.
- LEITÃO, T.E.; CAMEIRA, M.R.; COSTA, H.D.; PACHECO, J.M.; HENRIQUES, M.J.; MARTINS, M.L.L.; MOURATO, M., 2018 – **Environmental Quality in Urban Allotment Gardens. Atmospheric Deposition, Soil, Water and Vegetable Assessment at Lisbon City.** Water, Air, & Soil Pollution (2018) 229: 31. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3681-1>.
- LEITÃO T.E.; MOTA, R., 2015 – **Análise e acompanhamento dos Trabalhos de Reabilitação Ambiental para Melhoria da Situação Ambiental Envolve aos Furos de Abastecimento de Água do Concelho de Praia da Vitória, Açores.** LNEC - Proc. 0605/121/18422. Relatório 287/2015 – DHA/NRE.
- LEITÃO T.E.; MOTA, R.; ANTUNES, M.L., 2019 – **Estudos Complementares no Âmbito dos Processos de Reabilitação Ambiental Relacionados com a Utilização da Base das Lajes pelos EUA. Relatório Final, 2019.** LNEC - Proc. 0102/121/21350. Relatório 145/2019 – CD.
- LEITÃO T.E.; HENRIQUES, M.J., 2019 – **Análise e Acompanhamento dos Trabalhos de Reabilitação para Melhoria da Situação Ambiental Envolve aos Furos de Abastecimento de Água do Concelho de Praia da Vitória, Açores. Relatório do ano 2019.** LNEC - Proc. 0605/121/22161. Relatório 462/2019 – DHA/NRE.
- LEITÃO T.E.; ANTUNES, M.L., 2019 – **Estudos Complementares no Âmbito dos Processos de Reabilitação Ambiental Relacionados com a Utilização da Base das Lajes pelos EUA. Análise dos Resultados da Monitorização de Águas Subterrâneas Realizada em 2019.** LNEC - Proc. 0102/121/22166. Relatório 452/2019 – CD.
- ME, 2011 – **Groundwater and Sediment Standards for Use Under Part XV.1 of the Environmental Protection Act.** Ministry of the Environment April 15, 2011.
- MOTA R., NOVO, M.E., 2010 – **Prospecção Geofísica, pelo Método da Resistividade Elétrica, no Concelho de Praia da Vitória, Açores.** LNEC - Proc. 607/1/17171. Relatório 236/2010 – NGE/NAS.
- MORILLO, E.; ROMERO, A. S.; MAQUEDA, C.; MADRID, L.; AJMONE-MARSAN, F.; GRICMAN, H., 2007 – **Soil Pollution by PAHs in Urban Soils: a Comparison of Three European cities.** Journal of Environmental Monitoring, 9(9), 1001-1008.
- VROM, 2000 – **Dutch Target and Intervention Values.** Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2000.
- WILCKE, W. (2000). **Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soil - a Review.** Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 163(3), 229-248.

