

# C&S SIG

***CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS  
TECTÓNICAS ACTIVAS DA REGIÃO SUL DE  
PORTUGAL COM RECURSO A FERRAMENTAS  
SIG:***

***O caso da falha de São Marcos-Quarteira***

João Guilherme Noiva Gonçalves

Trabalho de Projecto apresentado como requisito parcial  
para obtenção do grau de Mestre em Ciência e Sistemas  
de Informação Geográfica

Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação  
da Universidade Nova de Lisboa

**CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS TECTÓNICAS ACTIVAS  
DA REGIÃO SUL DE PORTUGAL COM RECURSO A  
FERRAMENTAS SIG:**

**O caso da falha de São Marcos-Quarteira**

Trabalho de projecto orientado por

Professor Doutor Pedro da Costa Brito Cabral

e Co-Orientado por

Professor Doutor Pedro António Gancedo Terrinha

Novembro de 2009

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Doutor Pedro Cabral (ISEGI/UNL) orientador deste projecto, por todo interesse, motivação, disponibilidade, apoio e paciência que mostrou e transmitiu, pela leitura atenta e pelas correcções oportunas e construtivas que permitiram melhorar o trabalho.

Agradeço ao Prof. Doutor Pedro Terrinha co-orientador deste projecto, no âmbito da Geologia, por todo interesse, motivação, disponibilidade e apoio. As suas críticas e sugestões, sempre muito pertinentes, contribuíram imenso para melhorar a qualidade deste documento. Por fim, quero ainda agradecer pelo constante incentivo e optimismo que me transmitiu e pelo seu exemplo.

Agradeço a todos os colegas que fizeram e fazem da Unidade de Geologia Marinha do LNEG, a instituição de acolhimento deste trabalho de projecto, um local tão propício para o trabalho de investigação.

Aos colegas dos grupos de recursos e geologia costeira, com quem tenho trabalhado mais directamente, quero agradecer particularmente:

Ao colega Henrique Duarte agradeço pelas muitas e longas conversas sobre ciência e em particular por tudo o que com ele aprendi sobre processamento e interpretação de dados de sísmica. O processamento e interpretação dos dados de sísmica do cruzeiro Ersta\_Sandex beneficiaram muito com a sua colaboração, pelas inúmeras dúvidas esclarecidas sobre Landmark.

Ao colega Pedro Brito agradeço pela ajuda na programação de macros em Excel, usadas para construir as tabelas de correcção de maré, numa altura crítica em que estava a terminar a sua tese de doutoramento, a qual foi preciosa para melhorar a qualidade dos dados do cruzeiro Ersta\_Sandex e pelo empenho na ajuda à formatação deste documento.

Ao colega Luís Batista agradeço pelo seu companheirismo numa caminhada conjunta na descoberta da geologia e pelo empenho na ajuda à formatação deste documento.

Ao colega João Moedas agradeço pelas muitas conversas sobre ciência e em particular pelo empenho na ajuda à formatação deste documento.

Ao colega Vasco Valadares agradeço pelas muitas conversas sobre ciência e tecnologia e em particular pelo empenho na ajuda da execução de algumas figuras deste trabalho.

Agradeço aos colegas Cristina Roque pelo que me ensinou sobre interpretação de sísmica, ao colega Rui Quartau pelo apoio no cruzeiro Ersta\_Sandex, à Gabriela Carrara pelas discussões sobre gestão de dados, ao Luís Rebelo pela cedência de alguns artigos importantes para projecto e à Sónia Silva pelo alento dado.

Agradeço aos projectos de investigação no âmbito dos quais usufrui de bolsas e/ou que contribuíram para a aquisição ou disponibilização de dados.

O Projecto “ERSTA – Estudo do Risco Sísmico e Tsunamigénico do Algarve” que decorreu na UGM-LNEG, liderado pelo Doutor Pedro Terrinha, no âmbito do qual eu iniciei a minha colaboração na UGM e os trabalhos conducentes a este mestrado.

O Projecto TOPOMED “ Plate re-organization in the western Mediterranean: Lithospheric causes and topographic consequences “ liderado pelo Doutor Pedro Terrinha e no âmbito do qual usufrui de uma bolsa de investigação.

A Landmark Graphics Corporation pelo apoio dado através da Landmark University Grant Program concedido à instituição de acolhimento deste projecto de doutoramento, que muito facilitou o processamento e interpretação dos dados de sísmica de reflexão utilizados.

Ao Instituto Geográfico do Exército, pela disponibilização altimetria da região da Quarteira (Folhas 606,610).

Agradeço à Ângela e aos meus sogros Cândida e Manuel que sempre me apoiaram nos meus sonhos.

# **CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS TECTÓNICAS ACTIVAS DA REGIÃO SUL DE PORTUGAL COM RECURSO A FERRAMENTAS SIG:**

## **O caso da falha de São Marcos-Quarteira**

### **RESUMO**

Com este trabalho pretende-se avaliar o desempenho dos métodos de interpolação presentes nos softwares de Sistemas de Informação Geográfica para a produção de modelos superfície. São efectuadas várias simulações com diversos interpoladores, com dados geográficos da região emersa e imersa do sudeste Algarvio onde se localiza uma estrutura tectónica regional importante, a falha São Marcos-Quarteira. A partir de dados provenientes de levantamentos de sísmica de reflexão multicanal e monocanal de média resolução é efectuada uma interpretação sismostratigráfica dos perfis adquiridos. Com o método de interpolação mais eficiente produzem-se modelos de superfície que conduzem à interpretação da actividade neotectónica da falha São Marcos-Quarteira.

# **CHARACTERIZATION OF THE ACTIVE TECTONIC STRUCTURES OF THE SOUTH PORTUGUESE REGION USING GIS TOOLS:**

## **The case study of the São Marcos-Quarteira fault**

### **ABSTRACT**

This work aims to evaluate the efficiency of several interpolation methods available in Geographic Information Systems software to produce surface models. Several simulations using different interpolation methods are tested based on onshore and offshore geographic data from the Southeast Algarve where an important regional tectonic structure, the São Marcos-Quarteira Fault, is located. A seismostratigraphic interpretation is presented using multichannel and singlechannel seismic reflection datasets. The neotectonic activity of the São Marcos Quarteira fault is inferred from the results that were obtained by the most efficient interpolation method.

## PALAVRAS CHAVE

Batimetria

Falha São Marcos-Quarteira

Geofísica

Métodos de Interpolação

Natural Neighbors

Neotectónica

Sistemas de informação geográfica

## KEYWORDS

Bathymetry

São Marcos-Quarteira fault

Geophysics

Interpolation method

Natural Neighbors

Neotectonics

Geographic information systems

## ACRÓNIMOS

**AAPG** - American Association of Petroleum Geologists

**AC** – Antes de Cristo

**AS** – Anti-Spoofing

**CDP** – Common Depth Point

**CGIAR-CSI** - Consultative Group for International Agriculture Research Consortium for Spatial Information

**C&SIG** – Ciência e Sistemas de Informação Geográfica

**DGPS** – Differential Global Positioning System

**DP** - Desvio padrão

**ED50** – European Datum 1950

**EGNOS** - European Geostationary Navigation Overlay Service

**EMQ** - Erro Médio Quadrático

**ESRI** - Environmental Systems Research Institute

**GPS** – Global Positioning System

**IDW** - Inverse Distance Weight

**IFREMER** - Institut Français de Recherche pour L'exploitation de la Mer

**InSAR** – Interferometric Synthetic Aperture Radar

**IVS 3D** - Interactive Visualization Systems 3D

**LIDAR** - Light Detecting And Ranging

**LNEG** -Laboratório Nacional de Energia e Geologia

**MDE** - Modelo Digital de Elevação

**MDS** - Modelo Digital de Superfície

**MDT** - Modelo Digital do Terreno

**NASA**- National Aeronautics and Space Administration

**NaN** - Natural Neighbors

**NAVSTAR GPS** - Navigation Satellite with Time and Ranging Global Positioning System

**RGB** – Red, Green and Blue

**RTK** – Real Time Kinematic

**RTPI** - Royal Town Planning Institute

**SA** - Selective Availability

**SEGY** – Society of Exploration Geophysicists

**SI** - Sistema Internacional

**SIG** -Sistema de Informação Geográfica

**SMQ** - São Marcos Quarteira

**SRTM**- Shuttle Radar Topography Mission

**SVP** - Sound Velocity Profile

**SWOT** –Strength, Weakness, Opportunities, Threats

**TWT** - Two Way Traveltime

**UGM** – Unidade de Geologia Marinha

**UTM** – Universal Transverse Mercator

**WAAS** - Wide Area Augmentation System

**WGS84** – World Geodetic System 1984

## ÍNDICE de TEXTO

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	v
PALAVRAS CHAVE .....	vi
KEYWORDS.....	vi
ACRÓNIMOS.....	vii
ÍNDICE DE TABELAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objectivos.....	2
2. GESTÃO DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA NA UNIDADE DE GEOLOGIA MARINHA.....	3
2.1 Posicionamento da UGM na Estrutura Organizacional do LNEG.....	3
2.2 Avaliação das Necessidades para a Construção de um SIG na UGM.....	3
2.3 O Desenvolvimento da Infra-estrutura SIG da UGM .....	5
2.4 Organização da Informação no Projecto .....	7
2.5 Síntese Conclusiva .....	8
3. DADOS E MÉTODOS .....	9
3.1 Dados e Métodos de Aquisição da Informação Utilizados no Estudo da Área Emersa .....	9
3.2 Dados e Métodos de Aquisição da Informação Utilizados no Estudo da Área Imersa .....	11
3.2.1 Prospecção Geofísica: Aspectos Gerais .....	11
3.2.1.1 Resolução vs Penetração .....	14
3.2.2 Prospecção Geofísica: Dados e Métodos Utilizados .....	16
3.2.2.1 Batimetria com Sensores Multifeixe .....	16
3.2.2.2 Aquisição e Processamento dos Dados Batimétricos .....	17
3.2.3 Sísmica de Reflexão .....	20
3.2.3.1 Aquisição e Processamento dos Dados Sísmicos de Reflexão .....	23
3.2.3.1.1 Sísmica Multicanal.....	23
3.2.3.1.2 Sísmica Média de Resolução .....	25
3.2.4 Estratigrafia Sísmica.....	27
3.2.5 Posicionamento dos Dados.....	30
3.3 Metodologia Utilizada na Produção de Modelos de Superfície .....	33

3.3.1	Conceitos .....	33
3.3.1.1	Representação Digital do Terreno .....	33
3.3.1.2	Métodos de Interpolação.....	36
3.3.2	Fluxo de Trabalho Desenvolvido para o Estudo dos Métodos de Interpolação.....	37
3.3.2.1	Preparação dos Dados .....	37
3.3.2.2	Análise Espacial .....	38
3.3.3	Ferramentas de Trabalho.....	41
3.3.4	Discussão dos Resultados Obtidos pelos Métodos de Interpolação .....	41
3.3.5	Síntese Conclusiva do Estudo sobre Métodos de Interpolação .....	43
4.	CASO DE ESTUDO: O CASO DA FALHA DE SÃO MARCOS-QUARTEIRA .....	46
4.1	Enquadramento da Região do Algarve no Contexto da Margem Sudoeste Ibérica. ....	46
4.2	Actividade Sismotectónica e Tsunamigénica.....	47
4.3	Evolução Geodinâmica da Margem SW Ibérica.....	47
4.3.1	Rifting Inicial Triásico-Jurássico Inferior.....	48
4.3.2	Rifting Jurássico-Cretácico .....	48
4.3.3	Evolução do Cenozóico ao Presente .....	49
4.4	Enquadramento Estratigráfico .....	51
4.4.1	Estratigrafia da Área Emersa .....	51
4.4.1.1	Mesozóico.....	51
4.4.1.2	Cenozóico.....	52
4.4.2	Estratigrafia da Área Imersa .....	53
4.5	Principais Estruturas Tectónicas da Bacia do Algarve .....	55
4.5.1	A Falha São Marcos-Quarteira .....	56
4.5.2	Falha do Carcavai.....	59
4.6	Interpretação dos Dados das Campanhas CHEVRON74 e ESSO81 .....	60
4.6.1	Análise Morfológica do Fundo Marinho .....	60
4.6.2	Análise Morfo-Tectónica.....	63
4.7	Interpretação dos Dados da Campanha ERSTA_SANDEX .....	65
4.7.1	Análise Morfológica do Fundo Marinho .....	66
4.7.2	Sismostratigrafia dos Dados da Campanha ERSTA_SANDEX .....	67
4.7.2.1	Caracterização dos Horizontes Sísmicos.....	67
4.7.2.2	Caracterização das Unidades Sísmicas.....	68
4.7.2.3	Coluna Sismostratigráfica .....	69
4.8	Mapas de Isócronas.....	70
4.8.1	Mapas de Isócronas dos Horizontes .....	70
4.8.1.1	Horizonte S1.....	70

4.8.1.2	Horizonte S1A .....	71
4.8.1.3	Horizonte S2.....	72
4.8.1.4	Horizonte S3.....	73
4.9	Mapas de Isócronas das Unidades .....	74
4.9.1	Unidade U1 .....	74
4.9.2	Unidade U1A.....	75
4.9.3	Unidade U2 .....	76
4.9.4	Unidade 3 .....	77
4.10	Síntese da Interpretação Efectuada com os Dados da Campanha ERSTA_SANDEX .....	78
4.10.1	Coluna Cronostratigráfica .....	79
4.10.2	Evolução do Litoral .....	80
4.10.3	Estruturas Tectónicas Activas .....	81
4.10.3.1	Falha do Carcavai .....	83
4.10.3.2	Falha São Marcos-Quarteira .....	83
5.	CONCLUSÃO .....	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	85
	ANEXOS	
	ANEXO 1 .....	92

## ÍNDICE de TABELAS

Tabela 1. Caracterização das bandas do sensor TM+ do satélite Landsat 7. ....	10
Tabela 2. Resumo dos métodos de posicionamento utilizados nas campanhas e respectiva precisão média. ....	32
Tabela 3. Definições de MDE, MDT e MDS. ....	35
Tabela 4. Resumo de exemplos de usos e das aplicações de MDE. ....	35
Tabela 5. Escalas e resoluções típicas de MDE., adaptada de Hutchinson & Gallant, 2000 .....	36
Tabela 6. Descrição dos métodos de interpolação usados neste trabalho. Para um análise mais detalhada consultar Li & Heap, 2008 e Johnston et al., 2001. ....	37
Tabela 7. Parâmetros usados no cálculo do estatístico do erro. ....	40
Tabela 8. Erros de estimação obtidos para os métodos seleccionados. Valores em metros. ....	43

## ÍNDICE de FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo. Representação sem escala .....	2
Figura 2. Etapas de desenvolvimento da implementação de uma infra-estrutura SIG. ....	5
Figura 3. Resumo do levantamento de necessidades software e hardware. ....	6
Figura 4. Imagem utilizada no estudo da area emersa obtida pelo satélite Landsat TM7 (GLFC, 2001). .....	10
Figura 5. Célula 35_05 da cobertura SRTM. Representação sem escala. ....	11
Figura 6. Propagação de uma onda no espaço; $\lambda$ é o seu comprimento e $\gamma$ a sua amplitude.....	12
Figura 7. Fenómeno de interferência, positiva (à esquerda) e negativa à (direita). As ondas mais carregadas resultam da interferência (sobreposição) das ondas mais finas representadas em baixo.14	
Figura 8. Resolução vertical. Repare-se na unidade V2. Quando esta é mais espessa (a) distinguem-se dois pulsos unitários (c). À medida que a espessura diminui, começa a ocorrer interferência, deixando de se distinguir as interfaces (Jones, 1999). ....	15
Figura 9. Representação gráfica do método de prospecção geofísica para aquisição de batimetria com sistema multifeixe.....	17
Figura 10. Área abrangida pela compilação de dados batimétricos SWIM 2005, (Diez et al., 2005, Zitellini et. al., 2009). ....	18
Figura 11. Fluxograma das principais etapas de tratamento e processamento da informação levantada com sensores multifeixe através do pacote de software Caraibes.....	19
Figura 12. Ilustração esquemática dos meios envolvidos na aquisição de linhas sísmicas. À direita estão representados vários tipos de fontes sísmicas. ....	20
Figura 13. Exemplo de perfis adquiridos com diferentes frequências e resoluções verticais: (a) perfil multicanal de baixa frequência (~500 Hz); (b) perfil multicanal de média frequência (~1500 Hz); (c) perfil monocanal, boomer, de alta frequência (~2500 Hz) e (d) perfil monocanal, chirp, de muito alta frequência (~7000 Hz).....	21
Figura 14. Aquisição de perfis sísmicos monocanal: (a) percurso das ondas em 5 posições de disparo/recepção; (b) sismogramas que mostram a chegada das reflexões (adaptado de Jones, 1999). .....	21
Figura 15. Representação esquemática da aquisição de perfis sísmicos multicanal; (adaptado de Musset et al. 2000) .....	22
Figura 16. Diagrama genérico de um fluxo de processamento de dados sísmicos .....	23
Figura 17. Campanhas realizadas por companhias petrolíferas, na Bacia Algarvia, nas décadas de 1970 e 1980, utilizadas neste trabalho, respectivamente CHEVRON74 (lilás) e ESSO81 (azul)......	24

Figura 18. Fluxo de trabalho para conversão dos dados em formato analógico para formato digital (Duarte, Brito, Vicente, 2004) e para a sua utilização no software de interpretação em ambiente Landmark .....	25
Figura 19. Mapa de posicionamento dos perfis de sísmica de média resolução adquiridos durante a campanha Ersta –Sandex.....	25
Figura 20. Fluxo de trabalho realizado em gabinete com uma primeira fase de correcção do posicionamento e uma segunda fase de processamento do sinal. ....	26
Figura 21. Geometria da aquisição com esquematização das diferentes distâncias entre GPS, fonte e receptores, utilizados na campanha ERSTA-SANDEX.....	27
Figura 22. Síntese das diferentes características utilizadas na interpretação sismostratigráfica para análise de fácies sísmicas.....	29
Figura 23. Representações do terreno em formato digital. Figura adaptada de Li et al. (2005). ....	34
Figura 24. Fluxograma dos processos usados na preparação da informação para análise espacial. .	38
Figura 25. Fluxograma para avaliação do desempenho dos métodos de interpolação espacial.....	39
Figura 26. Mapa dos valores usados no controlo de erro. ....	40
Figura 27. Excerto do modelo criado no Model Builder do ArcGis 9.3 para efectuar álgebra de mapas. ....	41
Figura 28. Resultado das interpolações efectuadas com os dados da indústria dos petróleos CHEVRON74 e ESSO81: A) interpolador IDW; B) interpolador Spline; C) interpolador Polinomial Local; D) interpolador NaN .....	42
Figura 29. Erro absoluto da interpolação NaN, com os dados da indústria dos petróleos CHEVRON74 e ESSO81.....	43
Figura 30. Domínios morfo-tectónicos da Margem Sudoeste Ibérica. ....	46
Figura 31. Reconstituição da evolução tectónica do Mediterrâneo Ocidental desde o Oligocénico superior até ao Pliocénico superior (Rosenbaum et al., 2002).....	50
Figura 32. Cartografia simplificada dos depósitos neogénicos da Bacia do Algarve (Pais e tal.,2000).53	
Figura 33. Modelo de correlação entre a litostratigrafia das áreas emersa e a sismostratigrafia da área imersa. ....	55
Figura 34. Principais estruturas tectónicas da região do Algarve. ....	56
Figura 35. Imagem de satélite (composição RGB745) onde se evidencia o traçado da falha SMQ....	57
Figura 36. Traçado da falha do Carcavai. Adaptado de Ressureição (2009). ....	59
Figura 37. Modelo batimétrico efectuado com os dados da indústria petrolífera, onde são indicadas as características morfológicas significativas. ....	62
Figura 38. Perfis (x20), da Fossa Diogo Cão. O posicionamento está indicado na Figura 37.....	63
Figura 39. Mapa morfo-tectónico efectuado com os dados da indústria petrolífera.....	64
Figura 40. Enquadramento da área de levantamento da campanha ERSTA_SANDEX. ....	65

Figura 41. Modelo batimétrico da área de estudo ERSTA_SANDEX onde são indicadas a características morfológicas significativas. ....	66
Figura 42. Perfil X-Z (x20), onde estão identificadas as quebras de declive. ....	67
Figura 43. Coluna sismostratigráfica das unidades interpretadas. ....	69
Figura 44. Mapa de isócronas do horizonte S1. ....	71
Figura 45. Mapa de isócronas do horizonte S1A. ....	72
Figura 46. Mapa de isócronas do horizonte S2. ....	73
Figura 47. Mapa de isócronas do horizonte S3, onde está implantada a análise estrutural. ....	74
Figura 48. Mapa de isócronas da unidade U1. ....	75
Figura 49. Mapa de isócronas da unidade U1A. ....	76
Figura 50. Mapa de isócronas da unidade U2. ....	77
Figura 51. Mapa de isócronas da unidade U3. ....	78
Figura 52. Coluna cronostratigráfica proposta para as unidades sismostratigráficas da Fig. 4.14. ....	80
Figura 53. Mapa de isócronas dos horizontes S1 e S1A. ....	81
Figura 54. O bloco diagrama (x40), que simula a morfologia do sistema costeiro holocénico. ....	82
Figura A1. Perfil Sísmico SANDEX-01. Sobrelevação 10X. ....	93
Figura A2. Perfil Sísmico SANDEX-09. Sobrelevação 15X. ....	94
Figura A3. Perfil Sísmico ERSTA-01. Sobrelevação 12X. ....	95
Figura A4. Perfil Sísmico ERSTA-03. Sobrelevação 12X. ....	96
Figura A5. Perfil Sísmico ERSTA-05. Sobrelevação 12X. ....	97
Figura A6. Perfil Sísmico SANDEX-07. Sobrelevação 12X. ....	98

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

A Unidade de Geologia Marinha (UGM), onde foi desenvolvido este projecto, é uma das unidades técnicas do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) que tem como objectivo cumprir a missão de “conhecimento e investigação da infra-estrutura geológica e hidrogeológica do território e da área submersa sob jurisdição nacional”. Para tal existem quatro áreas principais de actuação: Paleoceanografia e Ambiente, Geologia e Recursos da Área Submersa sob Jurisdição Nacional, Informação/Tecnologia e Riscos Naturais. No âmbito destas temáticas enquadra-se a investigação de avaliação do risco e perigosidade associada à ocorrência de sismos e tsunamis.

A região do Algarve tem sido afectada por sismicidade histórica e instrumental, com sismos históricos fortes que causaram danos importantes, dos quais se destacam sismos distantes de tipo interplacas, gerados no Golfo de Cádiz, entre o banco submarino de Gorringe e o arco orogénico de Gibraltar (Zitellini et al., 2001, Gutscher et al., 2002). Também ocorreram sismos históricos importantes, provavelmente intraplaca, com epicentros localizados em terra (Dias, 2001). Na avaliação da perigosidade sísmica, particularmente em áreas sujeitas a taxas de deformação tectónica baixas, como as regiões intraplaca ou zonas de fronteira de placas que interagem lentamente, é muito importante conhecer as fontes sismogénicas, isto é, localizar e caracterizar as falhas activas (localização), quantificar a dimensão dos sismos que cada falha pode gerar (quantificação) e caracterizar a distribuição dos sismos no tempo (recorrência) (Cabral, 2003).

A UGM usufrui de um manancial imenso de informação, proveniente dos diversos projectos em que está ou esteve envolvido, originando também um grande volume de dados a partir das investigações efectuadas. Este trabalho enquadra-se por um lado, na perspectiva da avaliação do estado de arte da gestão informação geográfica utilizada na UGM e por outro na apresentação de um caso de estudo assente nos proveitos inerentes às vantagens das tecnologias disponibilizadas pelos SIG (Sistemas de Informação Geográfica).

Para as Ciências da Terra onde se enquadra a Geologia e em particular para a Geologia Marinha, a análise da morfologia do fundo oceânico (equivalente submerso da superfície terrestre) com recurso a modelos tridimensionais constitui-se como uma oportunidade e uma mais-valia na procura e interpretação de características do terreno que de outra forma seriam dificilmente reconhecidas, quer devido à sua dimensão, quer devido à impossibilidade de contacto visual directo com a morfologia do fundo oceânico. Actualmente existem diversos softwares SIG que disponibilizam ferramentas de análise espacial, nomeadamente no âmbito da interpolação espacial. Por outro lado são variados os métodos de interpolação à disposição do analista para que este possa efectuar a sua

análise da forma mais eficiente e precisa possível. Neste trabalho averigua-se o desempenho de vários métodos de interpolação espacial, recorrendo à análise visual e da estatística de erro para os resultados originados por cada uma das simulações, com o objectivo de seleccionar o mais eficaz para as características dos dados em estudo.

O projecto efectua-se com dados recolhidos em diversas campanhas oceanográficas realizadas na região imersa do Algarve, tendo sido seleccionada como área de estudo a zona, mostrada na Figura 1, onde se posiciona uma das estruturas tectónicas activas mais importantes do Algarve, a falha São Marcos-Quarteira (SMQ).



Figura 1. Localização da área de estudo. Representação sem escala.

## 1.2 Objectivos

Neste trabalho de projecto pretende-se avaliar o estado de arte da implementação da infraestrutura SIG da UGM, debater o modelo de gestão de informação por projecto e apresentar um caso prático de aplicação de ferramentas SIG, centrado na avaliação do desempenho de métodos de interpolação espacial na construção de modelos de superfície para o estudo de estruturas geológicas. Com base nesse trabalho é finalmente efectuada a caracterização, geométrica, cinemática e dinâmica de uma das mais relevantes estruturas geológicas presentes no sul do território português, a falha de São Marcos-Quarteira (SMQ) averiguando-se sua actividade neotectónica e seu provável prolongamento para *offshore*.

## **2. GESTÃO DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA NA UNIDADE DE GEOLOGIA MARINHA**

No presente capítulo enquadra-se a Unidade de Geologia Marinha (UGM) na estrutura organizacional do Laboratório Nacional de Geologia e Energia (LNEG), avalia-se o estado de arte dos processos de gestão dos dados geográficos na UGM e descrevem-se, sucintamente, as etapas de desenvolvimento da implementação da infra-estrutura SIG (Sistema de Informação Geográfica). Finalmente, enunciam-se os fundamentos subjacentes à organização da informação geográfica utilizada neste projecto, à luz dos quais os dados trabalhados foram geridos.

### **2.1 Posicionamento da UGM na Estrutura Organizacional do LNEG**

O LNEG apresenta uma organização em estrutura triangular onde, no topo, se posiciona o Conselho Directivo, que define as orientações estratégicas e profere decisões finais, ao nível intermédio pelos Centros Técnico-Científicos, a quem compete a gestão, coordenação e difusão da informação produzida pelos diversos departamentos do LNEG e, ao nível operacional, as diversas Unidades Técnicas, onde se desenvolve a investigação e se adquirem e produzem os dados.

A UGM é uma das Unidades Técnicas do LNEG que tem por missão: “ o conhecimento e investigação da infra-estrutura geológica e hidrogeológica do território e da área submersa sob jurisdição nacional”, e compreende quatro áreas principais de actuação:

- Paleoceanografia e Ambiente;
- Geologia e Recursos da Área Submersa sob Jurisdição Nacional;
- Informação e Tecnologia;
- Riscos Naturais.

Desta vasta área de trabalho resulta a aquisição de grande volume de dados e, simultaneamente, a necessidade da sua gestão e estruturação, de forma a ser possível produzir resultados de qualidade e de modo eficaz.

### **2.2 Avaliação das Necessidades para a Construção de um SIG na UGM**

A UGM emprega e origina uma grande quantidade de dados digitais correspondendo tanto a dados georreferenciados como a outros contendo apenas informação alfanumérica. Neste enquadramento, muitos dos dados usados correspondem a levantamentos de campo e a cartografia que se encontram em formato analógico ou a campanhas efectuadas em cruzeiros de mar, em formato digital, entre muitos outros. Tanto a informação referente aos dados geográficos como a relativa aos

dados alfanuméricos não se encontra organizada, estruturada ou padronizada em formatos standard, estando dispersa e não informatizada, o que dificulta, enormemente, a sua consulta.

Para se obter um benefício de eficácia do trabalho efectuado pelos colaboradores do UGM, visando melhorar a produtividade dos recursos existentes e permitindo maior desenvolvimento da capacidade de análise dos dados, dever-se-á proceder à reorganização de toda a informação existente numa base de dados digitais que possa ser partilhada pelos vários colaboradores departamentais, permitindo deste modo ultrapassar as dificuldades de acesso aos dados. De forma objectiva, a construção de uma base de dados digitais convenientemente estruturada irá permitir alcançar níveis de produção mais elevados, daí resultando directamente uma diminuição do tempo gasto nas tarefas, aumentando deste modo a eficácia. A criação de uma base de dados digitais irá exigir aos colaboradores directamente envolvidos conhecimentos técnicos adequados, a fim se possibilitar uma utilização mais eficiente dos recursos disponibilizados.

Enquadrando esta problemática em termos de pensamento estratégico e usando uma das ferramentas designada por análise *SWOT* (forças, fraquezas, oportunidades, ameaças), pode-se ter uma ideia do estado de arte do departamento (“where are we now?”) e quais as considerações a ter em conta numa estratégia de desenvolvimento.

No caso presente, a UGM beneficia do facto de possuir um grande volume de dados, de produzir bastante informação para a comunidade científica e de estar envolvido em muitos projectos científicos. Esta realidade oferece à UGM a possibilidade de atingir a massa crítica em termos de competências acumuladas no capital humano: mais projectos – mais produção – mais dados. São as pessoas que fazem as coisas. Estes factos podem ser considerados simultaneamente como forças e oportunidades.

Por oposição, o facto de a informação estar desorganizada é o ponto de maior fraqueza do departamento. Este ponto pode também ser encarado como uma oportunidade, no sentido em que existe a possibilidade de melhorar a organização dos dados.

A possibilidade de não existir capital humano ou deste existir de forma precária constitui-se como uma ameaça. Na UGM, actualmente, o capital humano existe, mas uma grande parte do mesmo possui vínculos precários. Esta realidade pode considerar-se como uma ameaça, pois a precariedade compromete a operacionalidade, levando à perda de competências difíceis de repor. Este facto pode levar, assim, à perda de sustentabilidade da produção científica e afectar a eficácia no que concerne à capacidade de organizar o grande volume de dados existentes no departamento.

### 2.3 O Desenvolvimento da Infra-estrutura SIG da UGM

Não existe um processo único quando se aborda o problema de implementação de uma infra-estrutura SIG. Como em quase todas as actividades, não existe uma receita mágica normalizada que se utilize com garantia total de sucesso. Uma das formas, entre outras, de estruturar uma infra-estrutura SIG consiste na aplicação de uma metodologia composta como a preconizada pelo *Royal Town Planing Institute*, designado como método *RTPI*. Através da aplicação deste modelo de desenvolvimento à implementação de uma infra-estrutura SIG na UGM, apresenta-se na Figura 2 um esboço das diferentes etapas a incluir neste projecto. Esta figura permite representar, de forma diagramática, uma proposta descritiva das etapas que configuram a implementação de uma infra-estrutura de dados geográficos

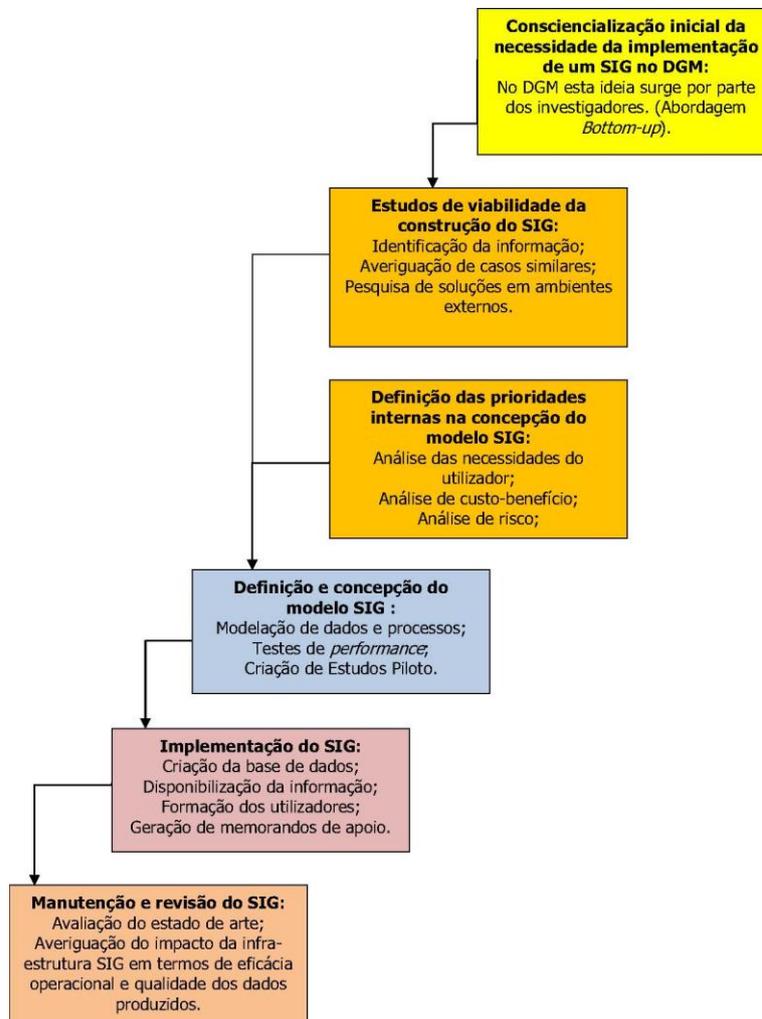


Figura 2. Etapas de desenvolvimento da implementação de uma infra-estrutura SIG.

A ordenação proposta não consiste numa estrutura rígida, existindo procedimentos ou decisões que podem ser tomadas por ordem não sequencial ou decorrerem em paralelo. Na UGM, o primeiro

impulso já foi concretizado, tendo os investigadores envolvidos na produção de informação georreferenciada alertado para a necessidade de implementação de uma infra-estrutura SIG que permita uma organização e consulta dos dados de forma eficaz. Deste ponto inicial surgiu a necessidade de caracterizar a informação a incluir na infra-estrutura de dados bem como as soluções existentes no mercado que possam responder de forma equilibrada à implementação requerida para os dados. Nesta fase, a existência de licenciamento de software ArcGis (ESRI) na UGM estão a servir este intuito estando, no entanto, a ser feito um estudo de soluções alternativas.

O ponto seguinte, respeitante à avaliação das necessidades dos investigadores, encontra-se na sua fase inicial, estando-se a executar o seu levantamento em dois domínios distintos mas complementares, relacionadas com questões de software e hardware resumidas na Figura 3.

Software	Hardware
Quais as funcionalidades disponibilizadas pelo software?	Qual o hardware mais adequado?
Estas são compatíveis com as necessidades do departamento? Ficam além ou aquém?	Quantas estações de trabalhos são necessárias?
O software é <i>user-friendly</i> ? Qual o seu grau de "customização"?	Que tipo de servidor de dados implementar? Rede interna, intranet, internet?
Quais os formatos usados e disponibilizados pelo software?	Quais os equipamentos periféricos são necessários?
Quais os custos de formação? Estão incluídos no licenciamento?	Quais os custos de manutenção associados ao hardware?
Qual o sistema operativo necessário?	Qual o investimento inicial necessário?
Que documentação é fornecida?	Qual o capital humano necessário para a implementação destes recursos?
Quais os custos de manutenção?	

Figura 3. Resumo do levantamento de necessidades software e hardware.

Actualmente o desenvolvimento da infra-estrutura SIG encontra-se nas fases 5 e 6 apresentadas na Figura 2, estando a UGM envolvida num projecto europeu que visa a criação de uma infra-estrutura de dados científicos, denominado *Geo-Seas (Pan-European infrastructure for management of marine and ocean geological and geophysical data)*. Deste envolvimento, resulta que um grande volume de dados terão que ser alvo de levantamento e caracterização, para que seja possível propor uma modelação que se adapte da melhor forma possível às suas características. Uma das formas possíveis para iniciar esta fase passa pela construção de uma base de dados relacional que inventarie, de forma estruturada, todo o espólio existente na UGM, a partir da qual se evoluirá para a construção da infra-estrutura SIG. É de referir que as actividades desenvolvidas na UGM se inserem, normalmente, em projectos autónomos, pelo que uma das soluções possíveis é a criação de bases de dados relacionais para gerir a informação alfanumérica de cada um dos projectos e, concomitantemente, modelar uma infra-estrutura SIG que possa gerir toda a informação geográfica, esta comum aos diversos projectos desenvolvidos.

## 2.4 Organização da Informação no Projecto

Para que seja possível produzir informação de qualidade na UGM é imprescindível que se crie uma estrutura de dados, bem documentada, homogénea e moderadamente normalizada, tendo em atenção que os standards nunca se devem sobrepor às necessidades científicas do projecto e assegurando a possibilidade da disponibilização dos dados em formato aberto.

Devido às características dos projectos de investigação científica onde, normalmente, a documentação e a estruturação é sempre função do paradigma seguido pelos investigadores que adquiriram os dados, e como em ciência os paradigmas estão em metamorfose constante, é natural e desejável que estes sejam revistos à medida que os projectos decorrem. Este facto não é compatível com uma estruturação e normalização rígida dos dados, pois estas promovem a cristalização da informação num paradigma e provocam uma grande dificuldade de reutilização dessa informação sempre que esse paradigma ou parte dele muda.

Contudo, deverá existir um modelo que contenha os requisitos estruturais mínimos transversais a todos os projectos, tomando em consideração estas idiosincrasias. Assim, a aquisição bem como a produção da informação devem permitir a criação de uma base de dados geográfica baseada em preceitos idênticos e transversais aos projectos. Esta metodologia possibilita a compatibilidade, a integração e a consulta de toda a informação existente. Para tal objectivo ser atingido são necessários critérios uniformes na caracterização da informação em termos de metadados, nomeadamente:

- Sistemas de coordenadas;
- Precisão dos dados;
- Escalas de trabalho;
- Níveis de informação;
- Formatos de dados;
- Tipos de informação alfanumérica;
- Topologia dos dados (se necessário);
- Metadados.

Assim, toda a informação, quer de carácter geográfico, quer alfanumérica, deve estar convenientemente documentada, garantindo a sua qualidade e possibilitando a sua utilização em qualquer altura, por qualquer utilizador. Desta forma, os metadados assumem um papel importante e determinante na caracterização da informação geográfica. O conhecimento adicional proporcionado pela existência dos mesmos assegura:

- a manutenção da organização da informação na base de dados;

- a informação sobre os dados existentes numa determinada área de interesse nomeadamente o seu grau de actualização, formato, sistema de coordenadas, e as restrições ao seu uso;
- a capacidade de processar e interpretar dados recebidos de fontes exteriores;
- a possibilidade de fornecer dados, com agilidade, a infra-estruturas de dados standard de referência (como a *Geo-Seas*).

Uma base de dados digital de um grupo de investigação científica deve, em primeira instância, constituir o repositório de toda a sua produção científica digital ou digitalizável, georreferenciada ou simplesmente alfanumérica. Assim, a prioridade inicial de qualquer sistema de informação desta natureza deve servir para preservar a produção científica, garantindo que esta possa ser utilizada, no futuro, de forma eficiente e eficaz. Por este motivo, na ausência de uma infra-estrutura SIG ou estando a mesma na sua fase de implementação, surge como uma necessidade premente assegurar a preservação da memória, de forma a garantir a continuidade da produção científica.

Como o presente projecto foi concretizado a montante da implementação (em curso) da infra-estrutura SIG da UGM, os dados geográficos nele utilizados e produzidos, não são geridos de acordo com as características específicas da mesma, mas são estruturados de forma a garantir os propósitos acima enunciados permitindo e assegurando sua integração futura na referida infra-estrutura.

## **2.5 Síntese Conclusiva**

É de salientar que numa estrutura com grande complexidade e de largo âmbito de gestão como o LNEG, é com naturalidade que a consciencialização da necessidade de apostar numa infra-estrutura SIG tenha partido do nível técnico. Refira-se ainda que esta necessidade não parte do imperativo tecnológico mas sim das necessidades específicas dos investigadores da unidade.

Constituindo-se a UGM como uma unidade que gere e produz um grande volume de dados geográficos, a construção e implementação de uma infra-estrutura SIG funcional e bem estruturada afigura-se como uma necessidade de primeira ordem não só com o intuito de aumentar a produtividade e a qualidade dos dados produzidos pela investigação nas diversas áreas de actuação, mas também estar preparada para responder ao desafio constituído pela integração no projecto europeu *Geo-Seas*.

A gestão da informação geográfica utilizada neste projecto, bem como os dados que resultam do estudo e das análises efectuadas, é realizada de modo a assegurar a memória futura e a integração das mesmas na futura infra-estrutura SIG da UGM.

### 3. DADOS E MÉTODOS

No presente capítulo apresentam-se os dados e os métodos de aquisição que são a base do estudo efectuado no capítulo 4. Faz-se ainda uma avaliação do desempenho de métodos de interpolação presentes nos softwares SIG para a produção de modelos batimétricos do fundo marinho. Para tal, são efectuadas várias simulações com diversos interpoladores, com dados geográficos da região imersa do Algarve, escolhendo-se o método de interpolação mais eficiente para o estudo em causa.

#### 3.1 Dados e Métodos de Aquisição da Informação Utilizados no Estudo da Área Emersa

A falha SMQ foi alvo de estudos efectuados por diversos autores encontrando-se, por isso, caracterizada na sua área de desenvolvimento terrestre. Neste projecto, utilizam-se dados de natureza geográfica obtidos por métodos indirectos que contribuem para o enquadramento e estudo geomorfológico da referida falha na área emersa. Esta caracterização é, posteriormente, integrada com os dados relativos à zona imersa para efectuar um estudo comparativo da extensão global da falha SMQ. A informação utilizada consta de dados de imagem de satélite e de natureza altimétrica cuja descrição se efectua em seguida e que foi obtida já processada e pronta a utilizar.

Os dados de detecção remota usados provêm da imagem de satélite *Landsat TM7* (GLFC, 2001) de 01 Abril de 2001 (Figura 4), cujas características principais são:

- Satélite: *Landsat 7*
- Sensor: *ETM+* (multi-espectral)
- Número de Bandas: 6 (excluindo a banda térmica, *TM6* e pancromática)
- Largura de banda: 0.45-2.35  $\mu\text{m}$
- Trajectória (*Path*): 203; Linha (*Row*): 34
- Sistema de coordenadas: UTM WG84 zona 29N

A imagem de satélite é alvo de um estudo exploratório para averiguar quais as aplicações possíveis das bandas fornecidas tendo em vista a análise geomorfológica procedendo-se, ainda, ao ajustamento do contraste para melhorar a análise visual e realçar os objectos que se pretende classificar. No seguimento da análise exploratória, efectua-se a composição das bandas (cor falsa) com o intuito de realçar os elementos que se pretende classificar, facilitando deste modo a triagem da informação. A imagem foi alvo de várias composições de bandas vulgarmente utilizadas para estudos que envolvem (pondo em evidência) objectos geológicos, nomeadamente RGB541, RGB542, RGB741, RGB742 e RGB754, (Rabaça, 2004).



Figura 4. Imagem utilizada no estudo da área emersa obtida pelo satélite Landsat TM7 (GLFC, 2001)

Na Tabela 1 é apresentada a caracterização espectral das bandas do sensor *ETM+* do satélite *Landsat 7*.

Bandas	Resolução espectral	Resolução espacial
TM1	0.45-0.52 $\mu\text{m}$	30 m
TM2	0.52-0.60 $\mu\text{m}$	30 m
TM3	0.63-0.69 $\mu\text{m}$	30 m
TM4	0.76-0.90 $\mu\text{m}$	30 m
TM5	1.55-1.75 $\mu\text{m}$	30 m
TM7	2.08-2.35 $\mu\text{m}$	30 m

Tabela 1. Caracterização das bandas do sensor *TM+* do satélite *Landsat 7*.

A informação altimétrica mostrada na Figura 5 é utilizada para análise e caracterização geomorfológica da área de estudo emersa. Esta provem da célula 35\_05 da cobertura *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* versão 4, com resolução espacial de, aproximadamente, 90 metros realizada pela *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* e distribuída pelo *Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)*. Estes dados foram descarregados do sítio oficial do consórcio, cujo endereço consta nas referências bibliográficas. A informação encontra-se referenciada em coordenadas geográficas WGS84.



Figura 5. Célula 35\_05 da cobertura *SRTM*. Representação sem escala.

### **3.2 Dados e Métodos de Aquisição da Informação Utilizados no Estudo da Área Imersa**

A investigação em Geologia Marinha depara-se com uma dificuldade adicional em relação à Geologia tradicionalmente efectuada em terra, pois a matéria de estudo encontra-se submersa. Esta realidade implica que, para a obtenção de dados de natureza morfológica da superfície marinha e geológica da crosta submersa, seja necessário utilizar métodos que abreviem o obstáculo físico que constitui a coluna de água. Para tal, foram desenvolvidos, recorrendo às Ciências Geofísicas, variados métodos indirectos de aquisição de dados baseados, genericamente, na utilização de ondas acústicas. Neste projecto são usados dados obtidos por dois métodos de prospecção geofísica que recorrem às ondas acústicas. Assim, na caracterização da morfologia submarina utiliza-se a tecnologia de Sonda Acústica e para a caracterização do subsolo marinho usa-se a Sísmica de Reflexão, que permite a obtenção de perfis da estrutura interna da crosta.

#### **3.2.1 Prospecção Geofísica: Aspectos Gerais**

Os sistemas acústicos usados para prospecção geofísica em meio aquático são concebidos em função das características específicas deste ambiente. O seu princípio de funcionamento baseia-se na emissão de energia (ondas sonoras ou acústicas) produzida a partir de fontes mecânicas e/ou eléctricas, que podem estar localizadas nos navios usados nos levantamentos ou ser rebocadas por eles, consoante o tipo de equipamento usado. Através da utilização de hidrofones, usados para receber o sinal acústico propagado pelas fontes e reflectido pelos diferentes meios por este onde viajou, é então possível estudar a propagação e reflexão dessas ondas sonoras e definir pacotes de reflexões com a mesma resposta acústica e respectivas zonas de separação (interfaces).

Em termos gerais as ondas são caracterizadas por dois parâmetros (Figura 6): o comprimento de onda ( $\lambda$ ) correspondente à distância, em unidades métricas, entre dois pontos homólogos e a

amplitude de onda ( $\gamma$ ) que mede a amplitude da oscilação. No caso deste parâmetro as unidades de medida variam consoante o tipo de onda caracterizada, assumindo sempre um valor positivo. Nas ondas acústicas utilizam-se unidades de medida métricas ou de pressão.

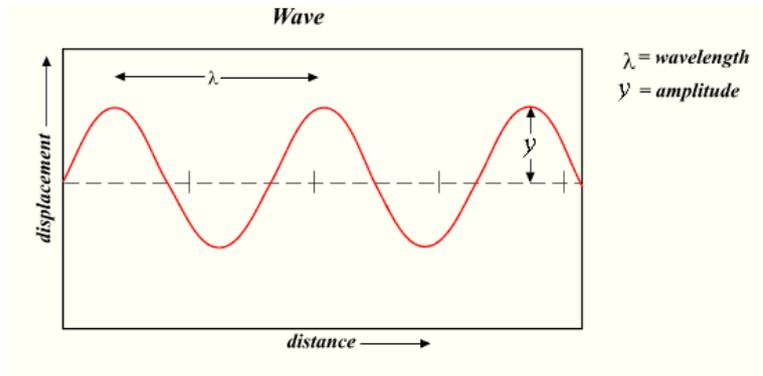


Figura 6. Propagação de uma onda no espaço;  $\lambda$  é o seu comprimento e  $\gamma$  a sua amplitude.

A amplitude ( $\gamma$ ) corresponde à quantidade de energia elástica transmitida pela onda através do meio. À medida que uma onda se propaga através de um meio, a sua energia elástica é transferida, acabando por ser totalmente absorvida devido à fricção interna que ocorre entre as partículas constituintes do meio. Esta perda de energia é denominada de atenuação e corresponde a uma diminuição na amplitude da onda (McQuillin et al., 1979).

Outro conceito utilizado para caracterizar as ondas é a sua frequência ( $f$ ), que corresponde ao número de oscilações registadas num determinado período de tempo, sendo expressa em ciclos por unidade de tempo, cuja unidade do Sistema Internacional (SI) é o Hertz (número de ciclos por segundo). A partir da frequência ( $f$ ) é possível deduzir o período ( $T$ ) que define o tempo de um ciclo completo de uma oscilação de onda, correspondendo ao inverso da mesma. Conhecendo-se a velocidade de propagação de uma onda ( $v$ ) pode-se relacionar a frequência com o comprimento de onda: se o comprimento de onda ( $\lambda$ ) aumentar é necessário diminuir proporcionalmente a frequência ( $f$ ) para manter a velocidade de propagação ( $v$ ).

Na prospecção geofísica onde, para se obter informações acerca dos objectos submersos se utilizam sistemas hidro-acústicos, a velocidade de propagação ( $v$ ) é um parâmetro que assume elevada importância, pois é através das ondas acústicas que se torna possível obter informações, por via indirecta, acerca dos meios onde estas se propagam como, por exemplo, as litologias, as relações estruturais ou a natureza dos fluidos intersticiais. Como nestes sistemas as medições das distâncias são efectuadas em tempo, o conhecimento da velocidade de propagação das ondas é fundamental para efectuar o cálculo da profundidade expressa em unidades métricas. Para tal transformação ser exacta é necessário conhecer com precisão a velocidade de propagação das ondas nos diferentes meios atravessados. No caso da água, o som propaga-se a uma velocidade da ordem de 1500 m/s,

um valor da mesma ordem de grandeza que os observados para outros líquidos. Variáveis como a pressão, a densidade do meio e a temperatura interferem na velocidade de propagação das ondas. Este valor da velocidade depende muito pouco da frequência da onda sonora. No entanto, como para outros líquidos, a atenuação é tanto maior quanto maior é a frequência. Nos restantes meios atravessados pelas ondas acústicas, as velocidades de propagação dependentes das propriedades físicas intrínsecas do meio são bastante mais complexas de obter. Nestes casos, é necessário recorrer a sondagens para caracterizar as referidas propriedades físicas desses meios, dos quais resultam os perfis de velocidade do som (*sonic logs*) respectivos a cada um deles. Como os sistemas hidro-acústicos medem as distâncias em tempo, o intervalo de decorrido entre a emissão de uma vibração e a respectiva recepção do seu eco corresponde a um valor obtido em tempo duplo, designado em inglês por *Two Way Traveltime (TWT)*, expresso em segundos.

Neste projecto, apenas os mapas batimétricos são apresentados em unidades métricas calculadas com base nos pressupostos acima enunciados. Não tendo sido possível obter os perfis de velocidades para a crosta atravessada pelos ecos acústicos dos sistemas de sísmica de reflexão utilizados para prospecção, os mapas de isóbatas e isópacas são apresentados em unidades de tempo duplo (*TWT*).

Quando a energia produzida por uma fonte sísmica é propagada através da coluna de água e das camadas de sedimentos ou do substrato rochoso acontecem três fenómenos às ondas acústicas: reflexão, transmissão e dispersão (McQuillin et al., 1979; Riddy e Masson, 1996). Uma parte da energia emitida é reflectida nas interfaces dos meios caracterizados por diferentes impedâncias acústicas, é recuperada através de um receptor e posteriormente registada sob a forma analógica ou digital. As ondas acústicas, quando são transmitidas através do subsolo marinho sofrem, para além da reflexão, fenómenos de refacção, absorção e difracção e, tal como outros tipos de ondas, obedecem à lei de *Snell* (op.cit).

O fenómeno da absorção é caracterizado por uma perda de energia pela conversão em calor (McQuillin et al., 1979), existindo uma relação directa entre a frequência de emissão e o valor de absorção. As frequências elevadas são rapidamente absorvidas não penetrando, por isso, mais do que os níveis superficiais (Ewing, 1963). Características como a porosidade, o grau de compacção, a granularidade, o teor de fluidos e a litologia promovem uma absorção eficiente da energia (Roque, 1998). O fenómeno de difracção ocorre quando existem estruturas geológicas (falhas ou irregularidades na morfologia do fundo oceânico) que funcionam como fonte emissora ou amplificadora de ondas, das quais resultam padrões de reflexão hiperbólicos, designadas por difracções.

As reflexões ocorrem entre meios com diferente impedância acústica ( $Z$ ). Esta grandeza adimensional resulta do produto da velocidade de propagação ( $v$ ) das ondas sísmicas pela densidade ( $\rho$ ) do meio atravessado (Waters, 1981; McQuillin et al., 1979).

Nas interfaces que separam meios com diferentes respostas acústicas, ocorre uma variação da velocidade de propagação das ondas. Desta mudança resulta um contraste de impedância acústica, denominado coeficiente de reflexão ou reflectividade ( $R$ ) (Waters, 1981; McQuillin et al., 1979).

### 3.2.1.1 Resolução vs Penetração

Cada sistema sísmico é caracterizado por duas propriedades inversamente relacionadas: a resolução e a penetração, sendo ambas condicionadas pela frequência do sinal emitido e pela natureza da fonte acústica (Abarzuza, 1991).

A resolução de um sistema sísmico define-se como a capacidade que este tem em efectuar a distinção entre dois reflectores distintos, correspondendo à distância mínima a partir da qual é possível efectuar a sua identificação para um dado valor de frequência (Abarzuza, 1991; Riddy e Masson, 1996). Esta definição está directamente relacionada com o conceito de interferência. Este assenta no princípio da sobreposição das ondas, o qual postula que a amplitude da onda resultante num determinado ponto é igual à soma das amplitudes das ondas sobrepostas nesse ponto. Em termos práticos, existem dois tipos de interferência: negativa (ou destrutiva) e positiva (ou construtiva) conforme mostrado na Figura 7.

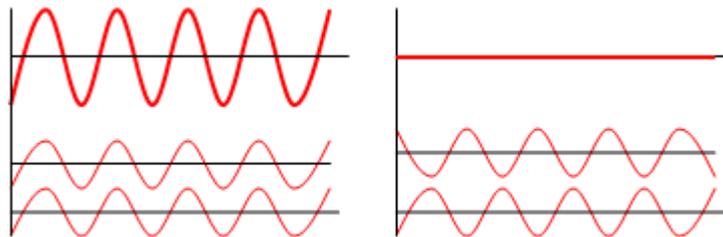


Figura 7. Fenómeno de interferência, positiva (à esquerda) e negativa à (direita). As ondas mais carregadas resultam da interferência (sobreposição) das ondas mais finas representadas em baixo.

Para que não existam fenómenos de interferência entre as reflexões de duas interfaces sucessivas (por exemplo o topo e a base de uma sequência deposicional), o comprimento de onda tem que corresponder, pelo menos, ao dobro da sua espessura (Figura 8). Quando a espessura equivale a um quarto do comprimento de onda sucede um fenómeno de interferência construtiva máxima entre as reflexões das duas interfaces sendo que, a partir desta espessura, as reflexões deixam de ser diferenciáveis.

Assim, a resolução vertical corresponde à distância mínima (entre duas interfaces) necessária para dar origem a duas reflexões distintas, isto é, um quarto do comprimento de onda do sinal emitido. Deste modo, quanto maior a frequência maior será a resolução vertical. No entanto, à medida que a resolução vertical aumenta, a capacidade de penetração dos sistemas sísmicos diminui devido ao fenómeno de atenuação das frequências, sendo as frequências mais altas atenuadas mais rapidamente.

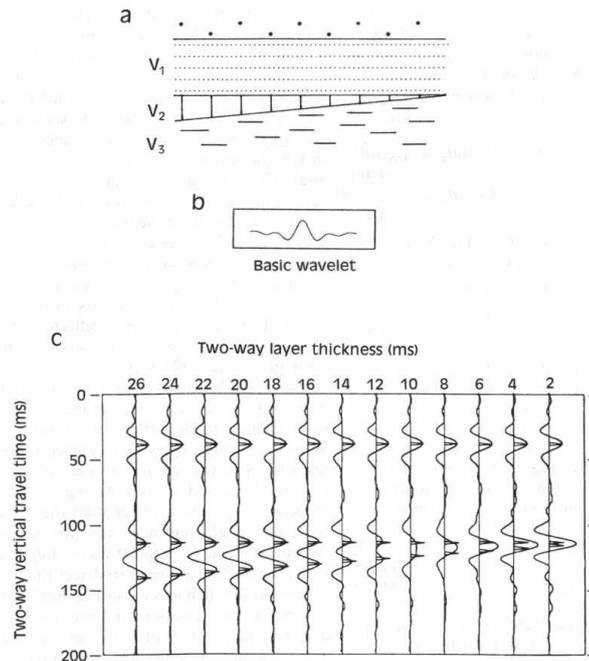


Figura 8. Resolução vertical. Repare-se na unidade V2. Quando esta é mais espessa (a) distinguem-se dois pulsos unitários (c). À medida que a espessura diminui, começa a ocorrer interferência, deixando de se distinguir as interfaces (Jones, 1999).

A penetração é uma propriedade que pode ser definida como a profundidade máxima de detecção de um reflector (Abarzuza, 1991), sendo a sua eficiência determinada, directamente, em função da frequência e da potência do sinal emitido pelos sistemas sísmicos e, complementarmente, da reflectividade, do número de interfaces acústicas afectadas e da proporção de energia excedente após a reflexão sucessiva em cada interface.

A relação de proporcionalidade existente entre penetração e resolução é, então, um dos factores a ter em conta aquando da escolha de um equipamento de sísmica de reflexão e depende simultaneamente dos objectivos da investigação a efectuar. Em estudos que exigem informação detalhada dos níveis superficiais, a escolha recai sobre sistemas de alta resolução capazes de operar em frequências elevadas mas com penetração reduzida (McQuillin et al., 1984; Riddy e Masson,

1996); naqueles em que o imperativo é obter informação em profundidade, têm características inversas.

### **3.2.2 Prospecção Geofísica: Dados e Métodos Utilizados**

Neste projecto, cujos objectivos centrais são a caracterização morfológica da área envolvente da falha SMQ e o estudo da sua actividade neotectónica, com especial incidência na área imersa, utilizam-se dados provenientes de várias campanhas de prospecção geofísica. Para caracterização do subsolo marinho, utilizaram-se métodos de sísmica de reflexão multicanal (baixa resolução) e monocanal (média resolução) e para o estudo da morfologia do fundo do mar, sistemas com eco-sonda multifeixe.

#### **3.2.2.1 Batimetria com Sensores Multifeixe**

Através da análise dos modelos batimétricos é possível caracterizar a morfologia submarina e efectuar um estudo preliminar da geologia de uma região. Este conhecimento permite o planeamento de campanhas de prospecção, do subsolo marinho, com recurso a outras técnicas. Os levantamentos batimétricos efectuados com sondas multifeixe são, presentemente, um dos métodos mais eficazes de obter dados sobre esta temática. A tecnologia usada na prospecção com sondas foi desenvolvida a partir do momento em que foi determinada a velocidade de propagação do som na água, durante o advento das grandes Guerras Mundiais do século XX.

A determinação da profundidade do fundo oceânico com sistemas sonar baseia-se no envio de impulsos de energia acústica gerados por um transdutor emissor que, depois de viajarem na coluna de água, são reflectidos pelo fundo marinho e após nova viagem, pelo mesmo meio, são captados por um transdutor receptor. Os sistemas eco-sonda podem ser simples, sendo constituídos por um sensor que efectua apenas o levantamento, na linha vertical do trajecto do navio ou multifeixe. Este foi usado para obter os dados utilizados neste projecto, cujo transdutor emissor é composto por várias eco-sondas, que permitem o varrimento, em leque, das zonas laterais da embarcação, possibilitando deste modo a aquisição de informação numa área muito mais vasta.

O transdutor emissor dos sistemas multifeixe é composto por várias eco-sondas de alta precisão, que emitem feixes acústicos numa geometria em leque (Figura 9), ortogonal ao eixo longitudinal do navio. Os feixes acústicos funcionam numa gama de frequências entre 12 a 500 kHz, dependente da profundidade de trabalho. Assim, baixas frequências (12 kHz) atingem grandes profundidades (10000 m), enquanto altas frequências (acima dos 300 kHz) são usadas em levantamentos até 20 metros (Hughes-Clarke et al., 1996).

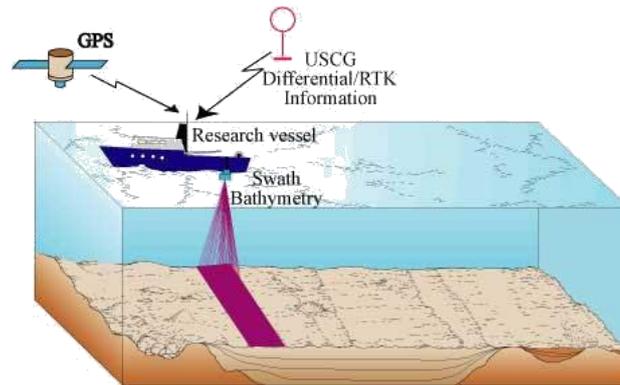


Figura 9. Representação gráfica do método de prospecção geofísica para aquisição de batimetria com sistema multifeixe.

A geometria dos feixes emitidos permite obter valores de profundidade ao longo de uma faixa do fundo oceânico, cuja dimensão varia com a altura da coluna de água, correspondendo normalmente a um valor 5 a 7 vezes maior que o da profundidade.

O transdutor receptor detecta o eco dos feixes acústicos emitidos (Figura 9), computando o lapso de tempo ocorrido entre a transmissão e a recepção do sinal. Uma vez conhecido este intervalo de tempo, bem como o ângulo correspondente a cada um dos feixes, obtêm-se os valores respectivos de profundidade.

Os levantamentos batimétricos são geralmente realizados ao longo de linhas paralelas, assegurando a existência de sobreposição (cerca de 10 %) entre as fiadas efectuadas. Este procedimento evita a ocorrência de lacunas no levantamento e possibilita a diminuição dos erros.

Os sistemas eco-sonda multifeixe são, actualmente, a tecnologia mais avançada no que respeita ao mapeamento batimétrico de precisão do fundo dos oceanos, permitindo a recolha de uma enorme densidade de informação, devido à capacidade que têm de efectuar um elevado número de medições de profundidade, num curto intervalo de tempo e numa extensa área, possibilitando, após ser devidamente processada, criar modelos bastante precisos e detalhados da morfologia submarina.

### 3.2.2.2 Aquisição e Processamento dos Dados Batimétricos

A informação utilizada neste projecto provém da compilação de dados batimétricos SWIM 2005 (*South West Iberian Margin*). Esta compilação, constituída por uma grelha de pontos com espaçamento de 100 metros, abrange uma vasta área geográfica localizada entre os paralelos 34°N e 38°N e os meridianos 12.5°W e 5.5°W, conforme ilustrado na Figura 10.

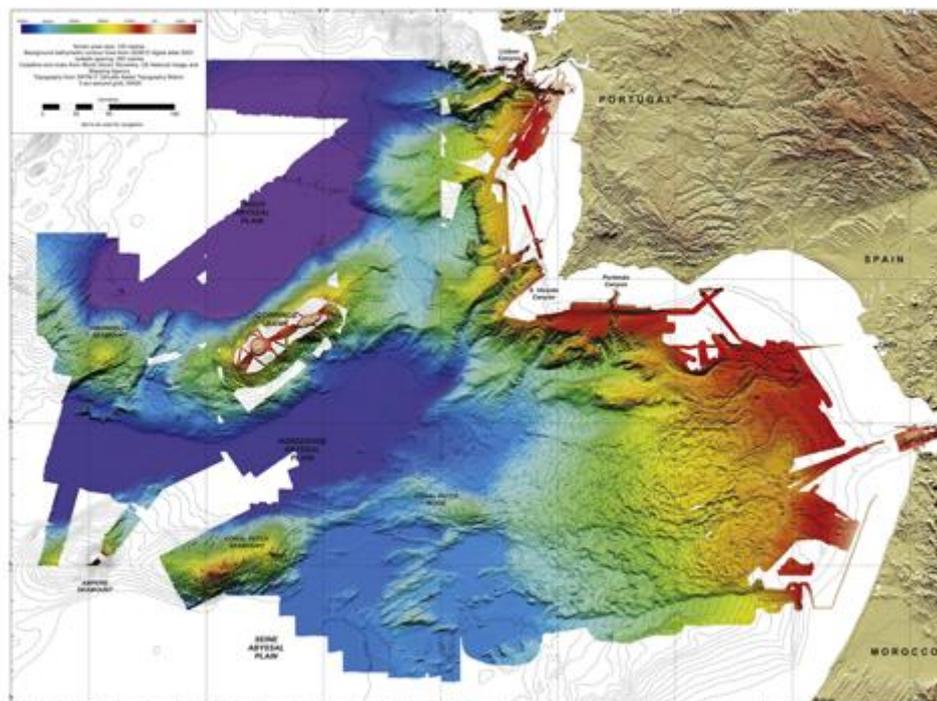


Figura 10. Área abrangida pela compilação de dados batimétricos SWIM 2005, (Diez et al., 2005, Zitellini et. al., 2009).

Os dados compilados na batimetria SWIM 2005 foram adquiridos em vários cruzeiros realizados no Golfo de Cádiz, nomeadamente: TASYO-2000, PARSIFAL-2000, CADISAR-2001, HITS-2001, PICABIA-2003, MATEPRO-2004, CADISAR2-2004, DELILA-2004, DELSIS-2005 e SWIM2-2005 (Diez et al., 2005, Zitellini et. al., 2009). Nestes cruzeiros, para os levantamentos efectuados em águas superficiais, foram utilizadas as sondas Simrad EM3000 e EM1000, ao passo que, para as zonas de águas intermédias a profundas, se recorreu aos sistemas Simrad EM300, EM12S, EM120 e Reson Seabat 8150. Os dados foram adquiridos no sistema de coordenadas geográficas WGS84. O processamento e fusão dos dados foram efectuados com o pacote de software *Caraibes*, especificamente desenvolvido pelo IFREMER para tratamento de informação levantada com sensores multifeixe. As principais etapas de tratamento e processamento da informação são indicadas no fluxograma da Figura 11.

Os dados obtidos em tempo duplo são convertidos, tendo em conta os perfis de velocidade da coluna de água, em unidades métricas. Simultaneamente, os dados obtidos são conjugados com a informação proveniente do sistema de localização, adquiridos com recurso a GPS (*Global Positioning System*) e corrigidos dos efeitos de maré e do movimento do navio (inclinação longitudinal, lateral e ondulação). A informação recolhida é, em seguida, submetida a um controlo de qualidade, efectuado a bordo do navio, para detectar possíveis problemas de aquisição, lacunas, bem como a sua integridade. Considerando todas as variáveis conjugadas e assumindo o bom funcionamento dos

sensores, a precisão vertical expectável (erro quadrático médio) inerente a estes sistemas situa-se nos seguintes intervalos:

- 0.2% da profundidade (da vertical até aos 45 graus);
- 0.3% da profundidade (até aos 60 graus);
- 0.5% da profundidade (entre 60 e 70 graus).

Após estas tarefas de pré-processamento, os dados são armazenados em ficheiros *raw data* (ficheiros originais, em bruto, sem processamento avançado). Posteriormente, na maioria dos casos já em gabinete, a informação é sujeita a tarefas de processamento com software dedicado, para filtragem automática e manual de valores extremos (*outliers*), ficando pronta para o passo seguinte que consta da criação de modelos batimétricos (através de métodos de interpolação espacial), da integração da informação em ambiente SIG e do seu armazenamento. Após este fluxo de trabalho, a informação está pronta para ser analisada e interpretada.

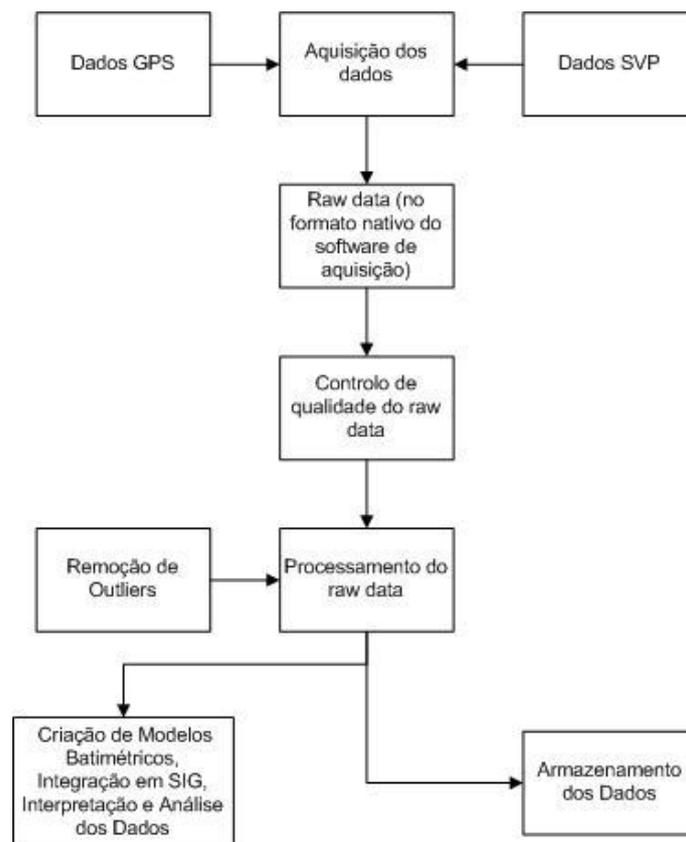


Figura 11. Fluxograma das principais etapas de tratamento e processamento da informação levantada com sensores multifeixe através do pacote de software *Caribes*.

### 3.2.3 Sísmica de Reflexão

A sísmica de reflexão marinha é um método que se baseia na emissão de energia acústica, através da coluna de água e da crosta oceânica e no estudo da propagação e reflexão das ondas sonoras nas interfaces que separam meios com diferentes propriedades acústicas. Para efectuar exploração sísmica no mar, é necessário: (Jones, 1999):

- Uma fonte de energia acústica;
- Um meio que permita a detecção das ondas acústicas que viajam na coluna de água ou no subsolo oceânico;
- Um sistema para gravação, processamento e disponibilização dos dados sísmicos obtidos.

Em traços gerais, o funcionamento de um sistema de sísmica de reflexão marinha está ilustrado na Figura 12.

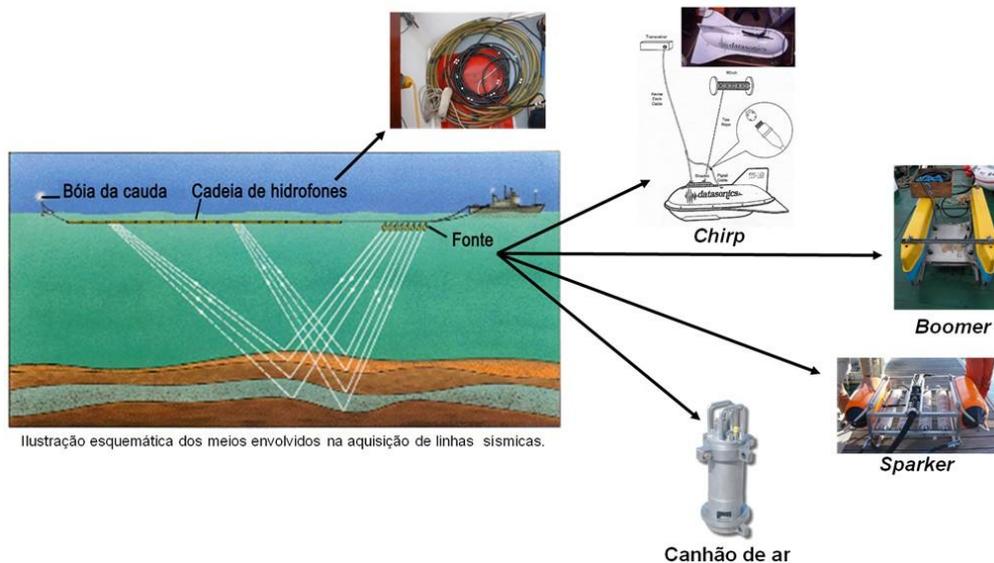


Figura 12. Ilustração esquemática dos meios envolvidos na aquisição de linhas sísmicas. À direita estão representados vários tipos de fontes sísmicas.

O som é produzido por fontes eléctricas (Chirp, Boomer, Sparker) ou mecânicas (canhões de água ou canhões de ar), genericamente designados por FONTE SÍSMICA o qual depois de viajar pela coluna de água e pela crosta é, posteriormente, gravado por uma cadeia de microfones, neste caso hidrofones, genericamente designados por receptores ou CADEIA DE HIDROFONES. A escolha da fonte sísmica, como já foi acima explicado, depende da profundidade que se pretende investigar e qual a resolução vertical que se pretende alcançar (Figura 13).

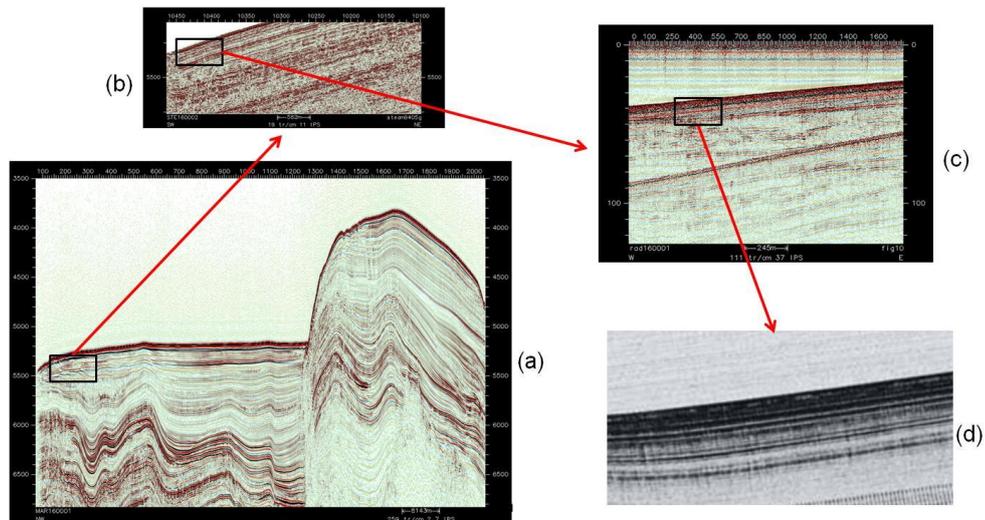


Figura 13. Exemplo de perfis adquiridos com diferentes frequências e resoluções verticais: (a) perfil multicanal de baixa frequência (~500 Hz); (b) perfil multicanal de média frequência (~1500 Hz); (c) perfil monocanal, boomer, de alta frequência (~2500 Hz) e (d) perfil monocanal, chirp, de muito alta frequência (~7000 Hz).

Os levantamentos realizados por sistemas de alta e média resolução são convencionalmente designados por sísmica monocanal, cujo funcionamento se mostra na Figura 14.

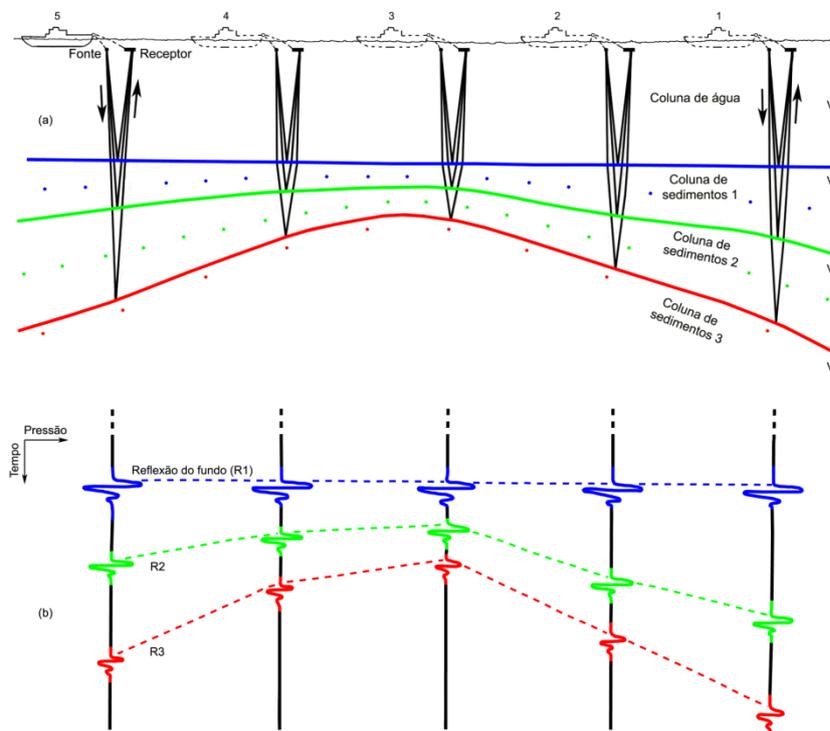


Figura 14. Aquisição de perfis sísmicos monocanal: (a) percurso das ondas em 5 posições de disparo/recepção; (b) sismogramas que mostram a chegada das reflexões (adaptado de Jones, 1999).

Os sistemas multicanal (baixa resolução) possuem uma grande capacidade de penetração. Desta aptidão resulta que quanto maior for a penetração dos ecos acústicos na crosta, maior irá ser a distância, relativamente à posição do navio, de chegada dos mesmos aos receptores localizados à superfície do oceano. Por isso, as cadeias de hidrofones utilizadas neste tipo de levantamentos são, normalmente, muito compridas (por vezes com vários quilómetros de comprimento) e compostas por vários grupos, possibilitando que cada um deles receba os ecos acústicos de forma independente (Figura 15). Esta metodologia permite recolher um elevado número de reflexões comuns ao mesmo ponto levantado, designados por CDP (Common Depth Point), o que origina maior qualidade dos dados e mais possibilidades de processamento (Mussett et. al., 2000).

Os dados adquiridos durante os levantamentos são guardados em suporte digital. Após esta operação, a informação adquirida está pronta a ser processada e integrada com os dados de navegação.

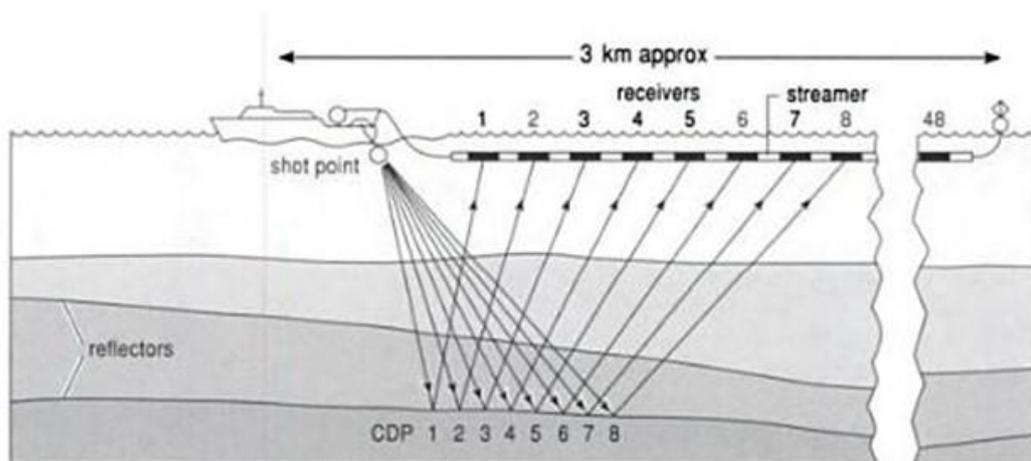


Figura 15. Representação esquemática da aquisição de perfis sísmicos multicanal; (adaptado de Mussett et al. 2000)

No diagrama da Figura 16 apresenta-se um exemplo genérico de um fluxo de processamento. A aquisição do sinal ou de perfis sísmicos contém, normalmente, ruído que, através de uma série de operações apropriadas a cada caso, permite obter uma melhoria na razão sinal-ruído. O processamento consiste na aplicação de vários tipos de filtros ao sinal que ajudam a melhorar os dados de sísmica e na correcção da geometria das reflexões, permitindo ao geólogo uma melhor interpretação dos mesmos.

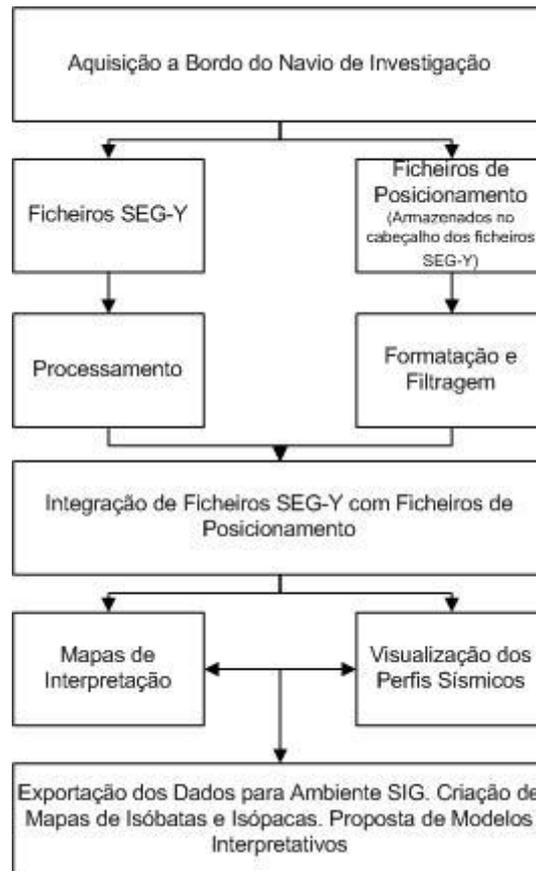


Figura 16. Diagrama genérico de um fluxo de processamento de dados sísmicos.

### 3.2.3.1 Aquisição e Processamento dos Dados Sísmicos de Reflexão

#### 3.2.3.1.1 Sísmica Multicanal

Os perfis sísmicos multicanal utilizados neste projecto foram obtidos nas campanhas realizadas por companhias petrolíferas, na Bacia Algarvia, nas décadas de 1970 e 1980, respectivamente CHEVRON74 e ESSO81, cuja localização e apresentada na Figura 17. A informação foi obtida no sistema de coordenadas UTM ED50 Fuso 29N, sendo o posicionamento efectuado pelo método de rádio-posicionamento.

Os perfis sísmicos CHEVRON74 foram adquiridos com uma fonte constituída por 22 canhões de ar (Airgun) mergulhados a cerca de 1.5 metros de profundidade, uma cadeia de hidrofones com 2350 metros de comprimento e um intervalo de disparo de 50 metros. Os perfis sísmicos ESSO81 foram obtidos com uma fonte constituída por 36 canhões de ar (Airgun) mergulhados a cerca de 60 centímetros de profundidade, uma cadeia de hidrofones com 3500 metros de comprimento e um intervalo de disparo de 73.8 metros. Os perfis de ambas as campanhas foram disponibilizados em

formato analógico já processados, sendo que os CHEVRON74 não foram alvo de operações de migração ao contrário dos ESSO81.

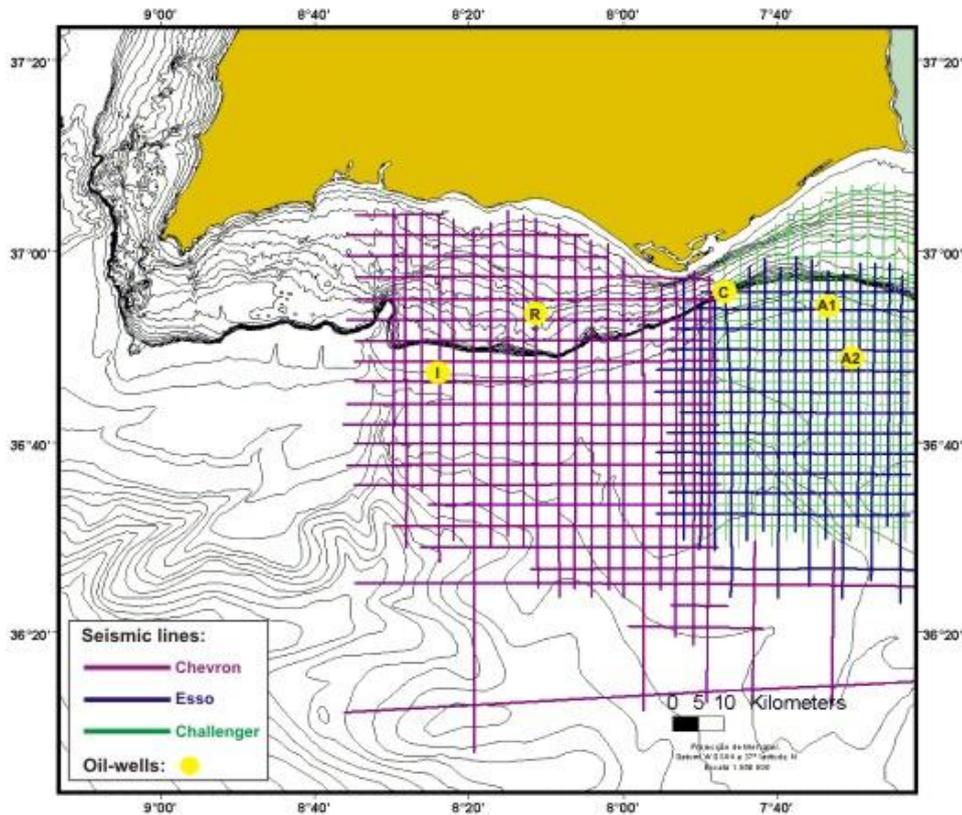


Figura 17. Campanhas realizadas por companhias petrolíferas, na Bacia Algarvia, nas décadas de 1970 e 1980, utilizadas neste trabalho, respectivamente CHEVRON74 (lilás) e ESSO81 (azul).

O facto das linhas sísmicas terem sido disponibilizadas em formato analógico constitui uma evidente limitação, tanto a nível de manuseio dos dados, como da sua integração com outros provenientes de campanhas mais recentes, já completamente adquiridos e armazenados em formato digital. Para obviar esta limitação, foi elaborado um fluxo de trabalho (Duarte, Brito, Vicente, 2004) para conversão dos dados para formato digital, cujas principais tarefas estão ilustradas na Figura 18. Para importar linhas sísmicas para o ambiente *Landmark* é necessário ter os dados do posicionamento dos pontos de disparo (*shotpoints*) dos perfis, os ficheiros em formato SEG-Y e os respectivos dados sísmicos e, finalmente, conhecer as relações *shotpoint*-traço sísmicas de cada perfil. A tarefa seguinte consiste na compilação dos dados de posicionamento dos *shotpoints* em tabelas ASCII, na preparação dos ficheiros SEG-Y com os respectivos dados sísmicos e na listagem das relações *shotpoint*-traço para carregamento no sistema. Finalmente, é efectuado o controlo de qualidade dos dados introduzidos no projecto *Landmark* ficando os dados prontos para interpretação.

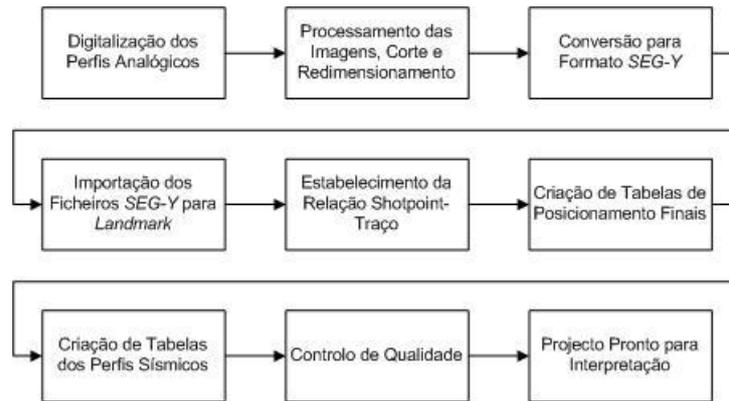


Figura 18. Fluxo de trabalho para conversão dos dados em formato analógico para formato digital (Duarte, Brito, Vicente, 2004) e para a sua utilização no software de interpretação em ambiente *Landmark*.

### 3.2.3.1.2 Sísmica Média de Resolução

Os dados de sísmica de média resolução utilizados neste projecto foram adquiridos na campanha ERSTA-SANDEX, realizada ao largo de cidade de Quarteira (Figura 19).

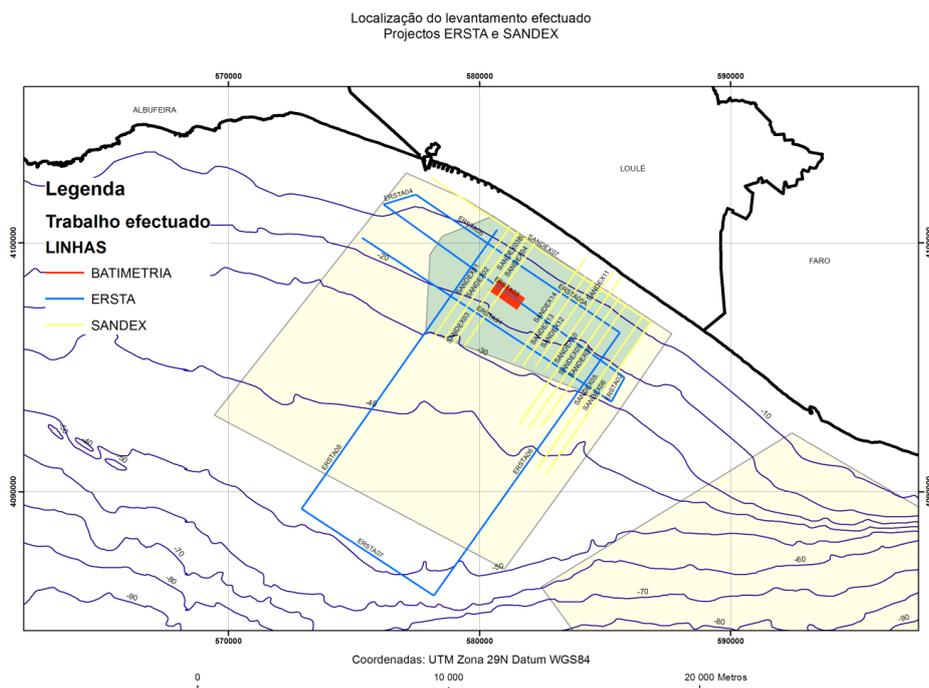


Figura 19. Mapa de posicionamento dos perfis de sísmica de média resolução adquiridos durante a campanha Ersta –Sandex.

Os perfis sísmicos da campanha ERSTA\_SANDEX foram adquiridos a uma velocidade média de 3,5 nós, usando uma fonte Sparker com uma energia de 300 J, uma cadeia de hidrofones com 25 metros de comprimento, um intervalo de disparo variando entre os 500 a 600 ms e uma janela temporal de 400 ms. O registo dos dados, durante a aquisição, foi efectuado com recurso ao pacote de software

Geo-Trace e os perfis foram armazenados no formato SEG-Y. O posicionamento foi efectuado por GPS no sistema de coordenadas geográficas *WGS84*. O facto dos dados terem sido adquiridos sob a forma de uma malha regular (ortogonal), permite a elaboração de modelos de superfície muito mais realistas e auxilia fortemente na compreensão das geometrias presentes ao longo dos vários perfis sísmicos. Em gabinete, os dados foram alvo de processamento e de controlo de qualidade, de acordo com o fluxo de trabalho mostrado na Figura 20:

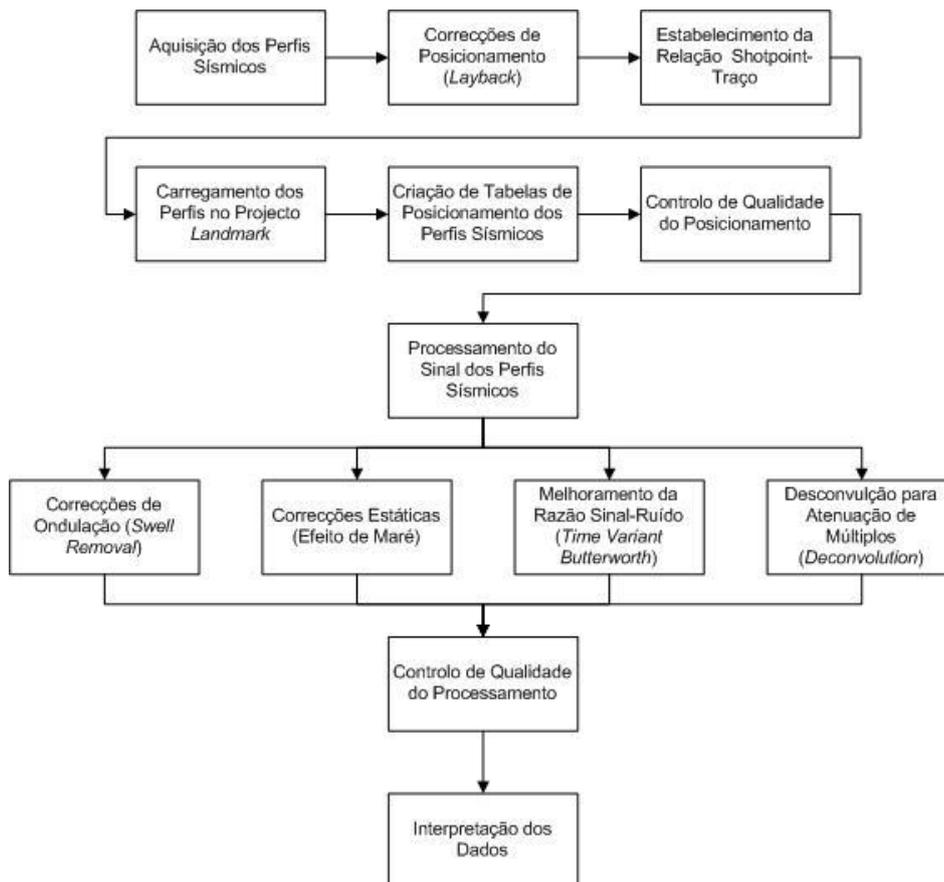


Figura 20. Fluxo de trabalho realizado em gabinete com uma primeira fase de correcção do posicionamento e uma segunda fase de processamento do sinal.

Em primeiro lugar, foram calculadas as correcções do *layback* que correspondem ao ajuste do posicionamento dos perfis tendo em conta a geometria do sistema de aquisição sísmica (Figura 21), os tempos de disparo e a velocidade média da embarcação, tendo-se chegado a um valor aproximado de 34 metros. Após esta operação, foram gerados os ficheiros de posicionamento onde se define a relação *shotpoint*-traço para cada perfil. Conhecida esta relação, os perfis adquiridos foram importados para o projecto *Landmark*, previamente criado para a interpretação das linhas sísmicas multicanal, tendo sido avaliada a qualidade do posicionamento dos mesmos através da análise visual da regularidade do trajecto para as linhas carregadas e do seu desfaseamento vertical nos pontos de cruzamento.

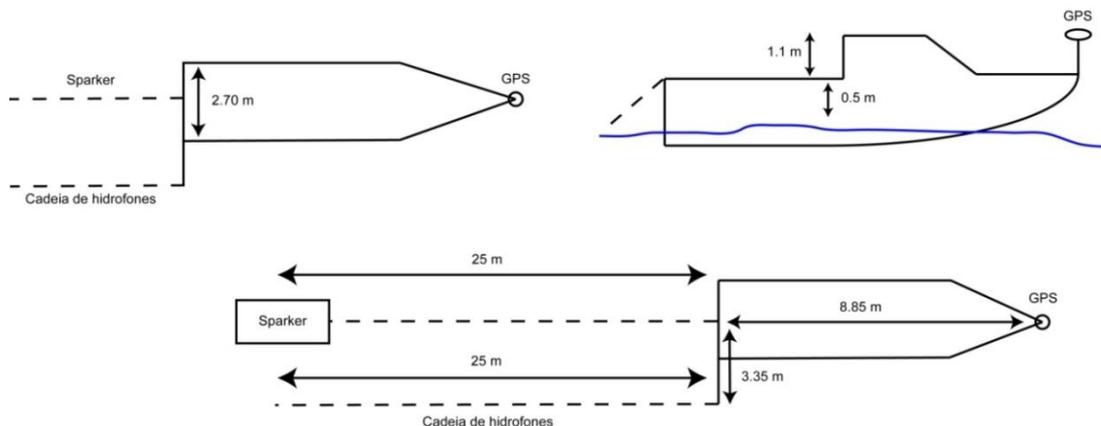


Figura 21. Geometria de aquisição com esquematização das diferentes distâncias entre GPS, fonte e receptores, utilizados na campanha ERSTA-SANDEX.

Em seguida os perfis foram alvo de correcção da ondulação (*Swell Removal*) para minimizar o efeito da mesma na geometria das reflexões adquiridas. Neste processo, aplicam-se aos traços que correspondem ao fundo marinho, ajustes de tempo determinados automaticamente através da análise de defasamentos, em tempo, entre traços vizinhos. Depois deste procedimento, foram efectuadas correcções estáticas para ajustar o *datum* vertical de cada perfil, a fim de atenuar o efeito das oscilações de altura da maré. Para melhorar a razão sinal-ruído, foi aplicado um filtro passa-banda (*Time Variant Butterworth*) e para atenuar o efeito dos múltiplos, foi efectuada uma desconvolução predictiva (*Deconvolution*) com auxílio da geometria do fundo. Após novo controlo de qualidade destas tarefas de processamento, os perfis ficaram prontos para análise e interpretação.

### 3.2.4 Estratigrafia Sísmica

A interpretação dos dados de sísmica de reflexão mono e multicanal utilizados neste projecto é efectuada de acordo com os princípios de Estratigrafia Sísmica. As bases conceptuais desta metodologia surgem durante as décadas 60 e 70 do século XX, com o advento da capacidade de processamento e armazenamento digital da sísmica multicanal, através dos trabalhos realizados por R. Mitchum, P. Vail e seus colaboradores, publicados na Memória nº 26 da *American Association of Petroleum Geologists* (AAPG), em 1977 (Emery e Meyers, 1996).

Com base nesta metodologia é possível realizar vários tipos de interpretação, nomeadamente realizar correlações no tempo geológico, definir unidades deposicionais com significado genético, inferir a geometria e ambiente de deposição das unidades sismostratigráficas, inferir sobre acontecimentos pós-deposicionais, reconstituir a paleomorfologia, a paleogeografia com o auxílio de dados geológicos (Vail e Mitchum, 1977) e a ocorrência de eventos tectónicos (Winter, 1984).

As análises efectuadas pela Estratigrafia Sísmica assentam na noção de sequência deposicional definida por Mitchum et al. (1977) como “uma unidade estratigráfica constituída por uma sucessão contínua de estratos, geneticamente relacionados e limitada na base e no topo por discordâncias ou pelas suas conformidades correlativas”. Este conceito adaptado à análise sísmica conduz à definição de sequência sísmica, que não é mais do que a sequência deposicional identificada sobre uma secção sísmica, cujo principal critério consiste na identificação do tipo de terminação dos reflectores em relação às discontinuidades que limitam a sequência.

A caracterização de uma sequência sísmica é efectuada tendo em conta outros dois conceitos (Mitchum et al.,1977):

- Unidade Sísmica: que corresponde a uma unidade tridimensional, com expressão cartográfica, limitada por discontinuidades sismostratigráficas e composta por um grupo de reflexões cujos parâmetros ( fácies sísmica) diferem das unidades adjacentes.
- Fácies Sísmica: conjunto de parâmetros sísmicos (geometria e carácter das reflexões, configuração interna e forma externa) que permitem caracterizar uma unidade sísmica e individualizá-la das adjacentes.

A análise de fácies sísmica consiste num conjunto de tarefas que constituem a base da interpretação de perfis sísmicos cujos fundamentos foram sendo definidos, ao longo do tempo, por vários autores (Vail e Mitchum, 1977; Mitchum et al., 1977; Sheriff e Geldart 1983; McQuillin et al., 1984), encontrando-se sintetizados em Roque (1998 e 2007). Este é um processo que, normalmente, envolve quatro etapas resumidamente expostas na Figura 22.

Neste projecto, onde se pretende averiguar e caracterizar a actividade neotectónica da falha SMQ, a abordagem metodológica passa por várias fases de trabalho interpretativo (adaptado de Roque, 2007):

- Reconhecimento das superfícies de discontinuidade, recorrendo à caracterização do carácter das terminações das reflexões.
- Definição e descrição das unidades e sequências sísmicas tendo em conta o carácter e a configuração das reflexões.
- Cartografia de fácies sísmica efectuada através da interpretação de fácies deposicionais (Sangree e Widmier, 1977). Efectua-se a caracterização das superfícies de discontinuidade, através do mapeamento da geometria das reflexões contribuindo para a construção dos modelos geológicos.
- Cartografia das estruturas, efectuada a partir do levantamento e caracterização das relações geométricas entre os diferentes horizontes identificados.

- Elaboração de mapas de isóbatas das discontinuidades principais que permitem caracterizar a morfologia das diferentes superfícies possibilitando, por exemplo, o reconhecimento de fenómenos erosivos e a hierarquização de eventos tectónicos.
- Construção de mapas de isópacas das unidades sísmicas que possibilitam a identificação da espessura máxima das unidades, dos principais depocentros e efectuar cálculos volumétricos.

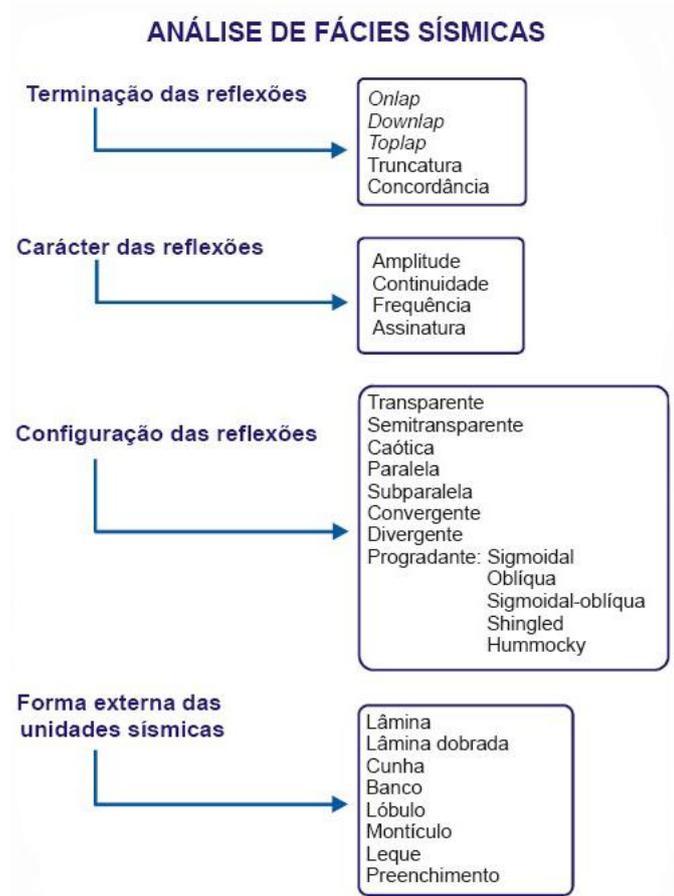


Figura 22. Síntese das diferentes características utilizadas na interpretação sismostratigráfica para análise de fácies sísmicas.

Para definir as unidades sísmicas é necessário caracterizar as discontinuidades que as limitam. Esta acção baseia-se na calibração dos horizontes sísmicos, sendo uma das tarefas críticas no trabalho de interpretação, pois é determinante para garantir o rigor, a qualidade e a fiabilidade dos dados tratados. A tarefa de calibração consiste no seguimento de uma discontinuidade ao longo de um perfil sísmico e na sua propagação ao longo da malha sísmica, enquanto a sua identificação não for ambígua.

A interpretação sismostratigráfica realizada neste trabalho enraizou no modelo sismostratigráfico de Roque (2007) e Vicente (em curso) em perfis multi-canal da mesma região.

### 3.2.5 Posicionamento dos Dados

Em ambiente terrestre, a localização de um ponto onde se realizam observações geológicas ou de qualquer outro carácter é relativamente simples de obter, através da utilização de diversos meios como fotografias aéreas, imagens de satélite ou cartografia de apoio. Através da associação destas ferramentas com os sistemas de posicionamento via satélite, como o GPS (*Global Positioning System*) ou através de métodos topográficos clássicos, é possível obter uma localização rápida e precisa dos objectos que se pretendem estudar.

Em ambiente marinho, a maior parte dos meios tradicionalmente utilizados em terra para localização dos pontos onde se efectuam as observações não podem ser aplicados devido às limitações impostas pelo obstáculo materializado pela coluna de água. Assim, para o posicionamento dos dados recolhidos pelos métodos de prospecção geofísica bem como para outros tipos de levantamentos como a localização de pontos de amostragem de sedimentos, recorre-se, actualmente, ao uso do GPS em detrimento de outros métodos que, com o aparecimento desta tecnologia, foram sendo abandonados. Os métodos de localização comumente usados em ambiente marinho são o rádio-posicionamento, o rádio-posicionamento por satélite (GPS), as técnicas inerciais, as técnicas acústicas e as técnicas integradas. Estes métodos encontram-se bem descritos em vários livros e artigos científicos, pelo que se efectua apenas uma breve descrição dos utilizados na aquisição dos dados estudados.

O método de rádio-posicionamento baseia-se na medida das distâncias entre o navio de reconhecimento e um conjunto de estações fixas ou na diferença em distância entre a embarcação e duas estações fixas. No primeiro caso, a distância entre o navio e as estações fixas é determinada, na embarcação, a partir do cálculo do lapso de tempo entre a emissão e a recepção do sinal, sendo o posicionamento dado pela intersecção da rede de círculos (Sistema Telúrico). No outro caso, é medida a diferença, em distância, entre o navio e duas estações fixas, a partir da interferência gerada entre a frequência fixa emitida a partir da embarcação e os sinais emitidos pelas antenas fixas. As diferenças de fase destes sinais são proporcionais às diferenças, em distância, entre o navio e as antenas fixas, sendo o posicionamento materializado pela intersecção da rede de hipérbolas (Lorac, Decca, Toran, etc). Estes sistemas têm um alcance máximo de cerca de 190 quilómetros (Lavergne, 1989). A precisão deste método de posicionamento está relacionada com as frequências utilizadas. Assim, os sistemas que recorrem a baixas frequências têm grande alcance mas pequena precisão (na ordem da dezena de quilómetros). Por outro lado, os sistemas que permitem maior precisão (na ordem da dezenas de metros) estão constrangidos a levantamentos perto da costa (McQuillin et al., 1984).

O GPS é um sistema de posicionamento e navegação baseado numa constelação de satélites desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América a partir de 1973 (Seeber, 1993). Devido ao seu elevado custo de manutenção, foi idealizado um novo sistema universal e que proporciona uma navegação contínua e precisa denominado Sistema NAVSTAR GPS (*Navigation Satellite with Time and Ranging Global Positioning System*). A sua configuração consiste numa constelação de 24 satélites, posicionados numa órbita a cerca de 20200 km de altitude, com um arranjo espacial que assegura a visibilidade de, pelo menos, quatro satélites acima do horizonte, em qualquer ponto da Terra, 24 sobre 24 horas (Seeber, 1993). O princípio de funcionamento baseia-se na medição de pseudo-distâncias entre o utilizador e quatro satélites. A partir das coordenadas conhecidas dos satélites pode ser calculada a posição do utilizador. Em termos geométricos são apenas necessárias três coordenadas conhecidas (dos satélites). No entanto, para obter valores de altitude e para medições mais precisas, são necessários pelo menos quatro satélites disponíveis, pois só com esta informação é possível calcular a posição do receptor e o erro do relógio (sincronização).

O aparecimento do GPS, com uma constelação de satélites permanentemente disponível, operou uma grande mudança nos sistemas de posicionamento em geral e, particularmente, na investigação marinha, pois resolveu um dos grandes problemas do rádio-posicionamento, o alcance, para além de permitir uma recolha de dados com precisões muito maiores e em qualquer altura. Os métodos de posicionamento por GPS são utilizados desde 1985 para navegação e localização em trabalhos de investigação em ambiente marinho, tendo sido alvo de grandes evoluções no que concerne à precisão alcançada. No início, esta era de 10 a 15 m; no entanto, por motivos estratégicos, foram introduzidas restrições de utilização que degradavam propositadamente o sinal recebido nomeadamente o *Selective Availability (SA)* e o *Anti-Spoofing (AS)*, diminuindo a precisão para valores entre os 50 m e 100 m. Depois de 1994, com o abandono destas restrições e com aparecimento do DGPS (*Diferencial GPS*) que consiste na utilização de uma estação de levantamento móvel ligada a uma estação de referência fixa onde são efectuadas as correcções de posição, a precisão relativa situa-se em valores entre 1 m e 10 m. Nesse ano, foi ainda desenvolvido pela agência norte-americana *Federal Aviation Administration* o sistema de correcção WAAS (*Wide Area Augmentation System*) que consiste numa correcção de posicionamento do receptor, efectuada e emitida de 5 em 5 segundos, a partir de um dos 4 satélites geoestacionários disponíveis, ligados às estações-base terrestres situadas em território americano, onde é efectuado o cálculo dessas correcções, permitindo precisões abaixo dos 7 metros. Apesar de este sistema ter sido desenvolvido para ser utilizado nos Estados Unidos da América, é possível usar as correcções na Europa desde que os satélites que as emitem se encontrem acima da linha de horizonte. Desde a década de 90 do século XX que está a ser desenvolvido um sistema equivalente para o território europeu denominado EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), composto por três satélites geoestacionários, que à data deste trabalho não se encontra operacional por estar em testes de

funcionamento, o qual irá permitir precisões abaixo dos 2 metros. Com o desenvolvimento da tecnologia, surge o posicionamento em tempo real denominado *Real Time Kinematic* (RTK), que permite precisões nos levantamentos efectuados na ordem dos centímetros.

Os dados utilizados neste projecto foram obtidos em diferentes cruzeiros de geologia marinha, com intervalos de tempo díspares, tendo sido adquiridos com diferentes métodos de posicionamento (Tabela 2), em função dos constrangimentos tecnológicos existentes à época em que foram adquiridos, ou logísticos relacionados com os meios disponíveis para cada uma das campanhas. Devido a este facto, a informação trabalhada apresenta características diferentes de posicionamento, tanto no que concerne à precisão como ao grau de incerteza do mesmo.

Campanha	Método de Posicionamento	Precisão Média
CHEVRON 1974	Rádio-Posicionamento (SHORAN <sup>1</sup> GEONAV)	30-50 m
ESSO 1981	Rádio-Posicionamento (MAXIRAN <sup>2</sup> )	30-50 m
SWIM 2005	DGPS (GPS Diferencial)	1-4 m
ERSTA+SANDEX 2008	GPS (WAAS)	5-7 m

1 SHORt RANge Navigation (Telford et al., 1990)

2 Sistema equivalente ao SHORAN (Telford et al., 1990)

Tabela 2. Resumo dos métodos de posicionamento utilizados nas campanhas e respectiva precisão média.

Da análise da Tabela 2 depreende-se que os dados mais antigos, recolhidos na era pré-GPS, têm menor precisão de posicionamento quando comparados com os mais recentemente colhidos. No entanto é de referir que, normalmente, o posicionamento da informação recolhida em contínuo durante uma determinada campanha tem um grau de consistência elevado, permitindo reduzir o grau de incerteza inerente aos mesmos. Neste trabalho, a situação é complexa pois os dados, para além de serem recolhidos por métodos geofísicos diferentes, os métodos de posicionamento são também diversos, situação transversal a muitos dos trabalhos de investigação nesta e noutras áreas. Neste caso, as diferenças obtidas por localizações com precisões diversas aumenta o grau de incerteza gerando, se não for efectuada uma análise cuidada, erros grosseiros de interpretação. Nos dados analisados verifica-se a existência de algumas inconsistências devidas a erros de posicionamento entre dados da mesma campanha, nomeadamente erros no cruzamento dos perfis sísmicos, situação mais frequente nos dados provenientes da CHEVRON74 e ESSO81, pois estes para além da menor precisão de levantamento, foram sujeitos a uma conversão de formato analógico para digital e a uma transformação de coordenadas (ED50 para WGS84). No que se refere à

campanha ERSTA\_SANDEX este problema é menos frequente, pois os dados foram recolhidos directamente para formato digital e num sistema de posicionamento muito mais preciso. Este problema não se coloca nos dados de batimetria SWIM, pois a metodologia de levantamento é diversa dos levantamentos de sísmica de reflexão.

Esta problemática está também relacionada com o nível de detalhe (escala) do trabalho efectuado. Assim, a precisão e a resolução do conjunto de dados disponíveis deve ser tida em consideração visto condicionar a escala de análise, devendo-se ter em conta estes factores aquando da construção de modelos a partir das interpretações efectuadas. No entanto, a diferenças de precisão dos dados não devem constituir um obstáculo à investigação que se pretende efectuar mas sim contribuir para a construção de uma abordagem metodológica que permita retirar de cada conjunto de dados a máxima informação possível tendo em conta esta limitação.

### **3.3 Metodologia Utilizada na Produção de Modelos de Superfície**

Outro dos objectivos deste trabalho prende-se com a avaliação do desempenho de métodos de interpolação presentes nos softwares SIG para a produção de modelos batimétricos do fundo marinho. Para tal, são efectuadas várias simulações com diversos interpoladores, com dados geográficos da região emersa e imersa do sudeste de Algarve. Depois de encontrar o método de interpolação mais eficiente, produz-se um mapa morfológico do fundo marinho. Para a concretização deste objectivo, efectua-se uma breve descrição de alguns conceitos importantes e dos métodos utilizados na produção dos modelos batimétricos.

#### **3.3.1 Conceitos**

##### **3.3.1.1 Representação Digital do Terreno**

Os primeiros mapas de sombras e as primeiras imagens aéreas em estereoscopia datam do século XVII. No final do século XVIII, o cartógrafo e matemático inglês, Johann Lehmann, formulou as regras necessárias para a construção de mapas de representação de relevo sombreado em diferentes perspectivas. Actualmente, os modelos tridimensionais produzidos com dados digitais de elevação são baseados, aproximadamente, nos mesmos princípios. Se, para a produção destes mapas e análises eram necessários muitos meses ou até anos, a tecnologia actual oferecida pelos SIG permite grande capacidade de processamento, reduzindo drasticamente o tempo necessário para a produção desses mapas, para a escala dos minutos ou segundos.

Utilizando software adequado é possível produzir mapas de relevo sombreado, mapas de declive, mudar a orientação de fontes de luz, etc. Com estas ferramentas pode-se também efectuar novas

análises, nomeadamente a produção de bloco diagramas que permitem gerar modelos tridimensionais virtuais que simulam a realidade.

No campo da Geologia em geral e, principalmente, no que respeita aos estudos geomorfológicos ou de estruturas neotectónicas realizados em *offshore*, as ferramentas SIG conjugadas com este tipo de modelação e análise são amplamente utilizadas.

Existem vários métodos para representar o terreno em formato digital, como se ilustra na Figura 23. No domínio da C&SIG (Ciência e Sistemas de Informação Geográfica) recorre-se, normalmente, às representações geométricas constituídas por pontos regular ou irregularmente distribuídos no espaço, que são materializados por geometrias pontuais ou lineares. Miller e Laflamme em 1958 propõem a primeira definição de Modelo Digital do Terreno (MDT) como “a representação estatística de uma superfície contínua de uma porção de terreno, por um determinado número de pontos com coordenadas xyz conhecidas”. Entretanto, nas décadas seguintes, surgiu um novo conceito denominado Modelo Digital de Elevação (MDE) e, mais recentemente, o Modelo Digital de Superfície (MDS).

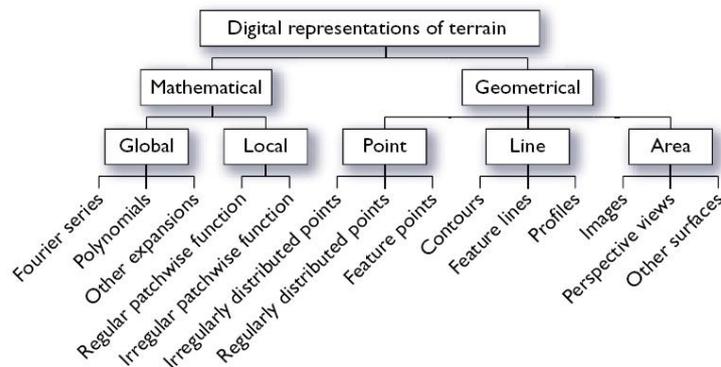


Figura 23. Representações do terreno em formato digital. Figura adaptada de Li *et al.* (2005).

Na Tabela 3 resumem-se as características de cada um destes conceitos. Da sua leitura pode-se compreender que as diferentes definições dependem do contexto em que se inserem e os conceitos podem variar de país para país (Maune e tal., 2001).

A elevação tem sido reconhecida como uma variável elementar e fundamental no mundo dos SIG (Atkinson, 2002). As razões desta relevância assentam na importância que os MDE têm na análise geomorfológica, pois modelam as superfícies de referência onde ocorrem os movimentos induzidos pela gravidade, bem como noutros campos de utilização, existindo um grande leque de aplicações

onde são largamente usados. Na Tabela 4 são apresentados, de forma resumida, os diferentes campos de aplicação e utilização.

Termo	Definição
Modelo Digital de Elevação (MDE)	Termo genérico correspondente a dados topográficos e batimétricos digitais. Normalmente representa o relevo <i>per si</i> , sem vegetação e construções. Os MDE são o componente fundamental dos MDT (Li et al., 2005).
Modelo Digital do Terreno (MDT)	Conceito abrangente que inclui os modelos de elevação bem como outros elementos geográficos como rios e outras linhas de quebra. Pode ainda incluir dados derivados como declive, visibilidade, relevo sombreado, etc, (Kennie & Petrie, 1990).
Modelo Digital de Superfície (MDS)	Modelo usado para representação do topo das superfícies reflectoras mais elevadas. Os dados são normalmente obtidos por tecnologia <i>Laser Scan</i> .

Tabela 3. Definições de MDE, MDT e MDS.

Usos e aplicações de MDE
Bancos de dados de elevação, como por exemplo o SRTM da NASA.
Em cartografia, para gerar curvas de nível, mapas hipsométricos e de relevo sombreado.
Visualização tridimensional de modelos.
Análise e modelação geomorfológica.
Análises e modelação biogeográficas.
Estudos agrícolas.
Estudos da dinâmica da paisagem.
Modelos geofísicos.
Aplicações no domínio da hidráulica e da hidrogeologia.
Aplicações na área da geologia.
Análise geomorfológica.

Tabela 4. Resumo de exemplos de usos e das aplicações de MDE.

Tal como noutros tipos de dados geográficos digitais, os MDE podem ser produzidos em diferentes resoluções espaciais, conforme ilustrado na Tabela 5. Como é evidente para cada uma das escalas descritas, existem especificações e custos inerentes à sua aquisição. Geralmente, quanto maior a precisão dos MDE, menor é a extensão espacial adquirida. Os levantamentos mais precisos são efectuados com recurso a campanhas GPS de elevado custo. Em levantamentos de áreas de maior extensão geográfica, utilizam-se métodos menos precisos mas com custos de produção mais razoáveis, como por exemplo, processos fotogramétricos, digitalização de mapas ou tecnologia InSAR (Radar Interferométrico de Abertura Sintética) (Li et al., 2005). A partir de meados dos anos 90 do século XX, foi desenvolvida uma nova tecnologia denominada LIDAR (*Light Detecting And Ranging*), que combina alta precisão com rapidez de aquisição, conduzindo a uma boa relação custo-eficácia, quando a ela é possível recorrer.

Fazendo o paralelo com os métodos de aquisição de batimetria, um dos métodos mais precisos para levantamentos de pequena profundidade é o LIDAR, para levantamentos ao nível topográfico de detalhe são usadas eco-sondas multifeixe e para levantamentos mais grosseiros, a sísmica multicanal.

Escala	Resolução	Tipo de aquisição	Exemplo de aplicação
Micro-escala	0.1-5 m	GPS, LIDAR	Engenharia civil, modelação de pormenor, batimetria de pormenor.
Topografia de detalhe	5-50 m	Fotogrametria, InSAR, LIDAR, Eco-sonda multifeixe, Sísmica de alta resolução	Modelação hidrológica, análise espacial de solos, batimetria fina.
Topografia grosseira	50-200 m	Fotogrametria, digitalização de mapas, InSAR, Eco-sonda simples, Sísmica Multicanal.	Modelação ampla. Batimetria grosseira.
Meso-escala	200 m -5 km	Digitalização de mapas	Mapas de globais de elevação.
Macro-escala	5 -500 km	Digitalização de mapas	Modelos globais de circulação.

Tabela 5. Escalas e resoluções típicas de MDE., adaptada de Hutchinson & Gallant, 2000.

### 3.3.1.2 Métodos de Interpolação

Quando se pretendem efectuar estudos relacionados com a caracterização morfológica dos fundos oceânicos é necessário gerar modelos de superfície. Como normalmente os levantamentos batimétricos efectuados não abrangem toda a área de estudo, é necessário recorrer a métodos de interpolação espacial que transformam os valores obtidos pontualmente em superfícies contínuas. As ferramentas para implementação destas técnicas estão normalmente embutidas em softwares SIG, como pode ser consultado em Li & Heap (2008). Os softwares SIG, para além de integrarem estas técnicas, possibilitam ainda efectuar procedimentos de análise e visualização, funcionando como uma mais-valia para esta área de investigação.

A interpolação espacial assenta no conceito enunciado pela primeira lei da geografia, proposto por Waldo Tobler (1979): tudo está relacionado mas as realidades tendem a ser semelhantes em locais mais próximos do que em locais mais afastados. Esse conceito fundamenta a base das relações espaciais entre fenómenos geográficos, a correlação espacial.

Os métodos de interpolação espacial podem ser agrupados em três categorias: métodos determinísticos ou não-geoestatísticos, geoestatísticos e métodos combinados (Li & Heap, 2008). No primeiro caso, a interpolação espacial baseia-se na utilização de uma função matemática da distância ou são função do grau de suavização. No que respeita aos métodos geoestatísticos, estes resultam da união do conceito de variáveis aleatórias com a noção de variáveis regionalizadas, gerando um novo conceito de funções aleatórias que incorporam também características estatísticas das amostras. Finalmente os métodos combinados que resultam da aplicação dos dois conceitos

anteriores. Por exemplo, para se obter o valor de elevação num local sem amostragem, recorre-se aos valores medidos nas zonas envolventes, aos quais são atribuídos pesos, em função da sua distância, no caso de um interpolador determinístico como o IDW (*Inverse Distance Weight*). Se for utilizado um método geoestatístico como a krigagem pode-se modelar a estimação em função da direcção e da dependência espacial das amostras, geridas por um variograma. O maior benefício que os métodos geoestatísticos têm quando comparados com os determinísticos assenta no facto daqueles quantificarem a dependência espacial entre pontos amostrados e possibilitarem a incorporação de informação complementar relacionada com a variável em estudo, sem desaproveitar a informação das amostras localizadas nas zonas envolventes. Uma exposição completa sobre os diversos métodos de interpolação aplicados às ciências do ambiente pode ser consultada em Li & Heap, (2008). Na Tabela 6 apresenta-se um quadro resumo dos métodos usados neste trabalho, excepto a krigagem, que se descreve apenas para termo de comparação.

Método	Categoria	Resultado	Exacto	Vantagens	Desvantagens
IDW*	Determinístico	Estimação	Sim	Poucos parâmetros de decisão.	Não avalia erros de estimação; produz "bull's eye" em torno das amostras.
NaN**	Determinístico	Estimação	Sim	Poucos parâmetros de decisão.	Não avalia erros de estimação.
Polinomial Local	Determinístico	Estimação	Não	Mais parâmetros de decisão.	Não avalia erros de estimação; automatização.
Funções de base radial (Spline, etc)	Determinístico	Estimação	Sim	Flexível e automático com alguns parâmetros de decisão.	Não avalia erros de estimação; automatização
Krigagem (senso lato)	Geoestatístico	Estimação; Erros de Estimação; Probabilidade.	Sim, sem medidas de erros; Não, com medidas de erros.	Muito flexível; permite o cálculo de auto correlação espacial; pode estimar erros; muitos parâmetros de decisão.	Necessita de tomar muitas decisões acerca de transformações, tendências, modelos, parâmetros e vizinhos.

\*IDW (*Inverse Distance Weight*) \*\* NaN (*Natural Neighbors*)

Tabela 6. Descrição dos métodos de interpolação usados neste trabalho. Para um análise mais detalhada consultar Li & Heap, 2008 e Johnston et al., 2001.

### 3.3.2 Fluxo de Trabalho Desenvolvido para o Estudo dos Métodos de Interpolação

#### 3.3.2.1 Preparação dos Dados

Da descrição dos dados acima efectuada, depreende-se que o seu conjunto é bastante heterogéneo no que respeita às escalas de aquisição, aos sistemas de coordenadas e ao arranjo espacial dos dados. Devido a estas circunstâncias, torna-se necessário estabelecer um fluxo de trabalho (Figura

24) com o objectivo de homogeneizar os dados antes de lhes aplicar os processos de análise e interpolação espacial. O sistema de coordenadas de trabalho é UTM WGS84 Zona 29N.

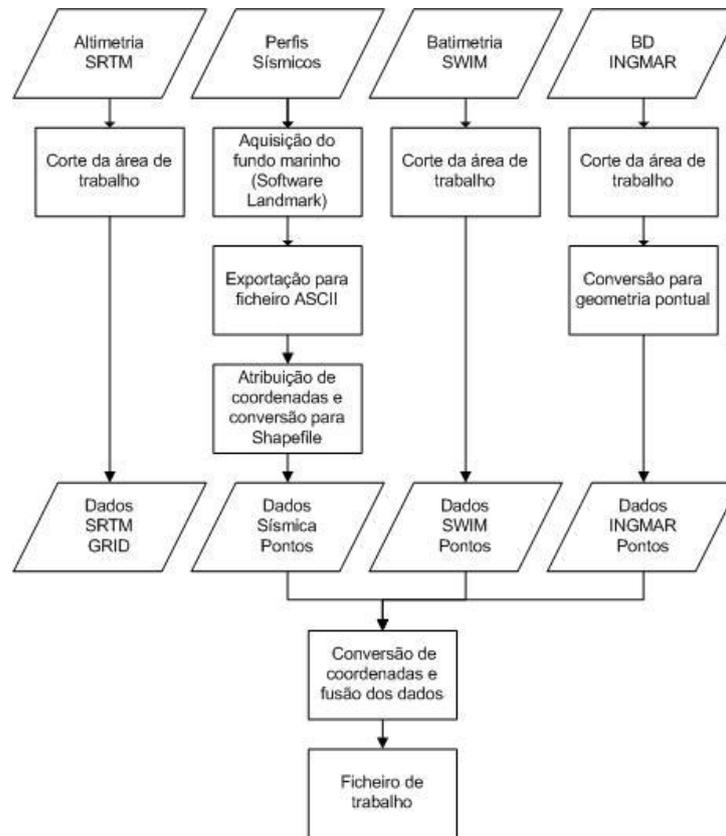


Figura 24. Fluxograma dos processos usados na preparação da informação para análise espacial.

### 3.3.2.2 Análise Espacial

Obtido o conjunto final de dados, são realizadas as operações de análise espacial para geração dos MDE necessários à análise da morfologia do terreno da área em estudo e percepção do desenvolvimento espacial da falha SMQ.

Para além das diferentes fontes, formatos e sistemas de coordenadas, os dados usados neste estudo possuem um desenvolvimento espacial distinto. Assim, enquanto os dados provenientes da batimetria *SWIM* tem um arranjo espacial regular, os adquiridos a partir dos perfis sísmicos têm uma distribuição particular e complexa para efectuar análises espaciais. Esta distribuição está directamente ligada com o método de aquisição da sísmica multicanal, que implica que exista muita informação ao longo das linhas de levantamento e grandes áreas com ausência de informação, como se mostra na Figura 17. Esta diferença leva a que os métodos de análise espacial aplicados para os dados com desenvolvimento espacial regular não sejam adequados para aqueles que são irregulares ou com distribuição particular.

A metodologia implementada para testar o desempenho dos métodos de interpolação espacial segue o fluxo de trabalho ilustrado na Figura 25.

Os testes efectuados para verificar o desempenho dos métodos de interpolação seleccionados, utilizando o fluxo de trabalho atrás descrito, foram aplicados aos dados provenientes dos levantamentos realizados pela indústria dos petróleos, por estes serem os que apresentam uma distribuição espacial específica, isto é irregular, com distâncias muito variáveis em pontos. Depois de seleccionado o método mais adequado, este vai ser aplicado ao conjunto total da informação, pois tendo os restantes dados uma distribuição regular e uma elevada densidade de pontos (quando comparada com os dados da indústria dos petróleos), podemos assumir que os diferentes métodos usados produzem resultados similares (Burrough & McDonnell, 1998).

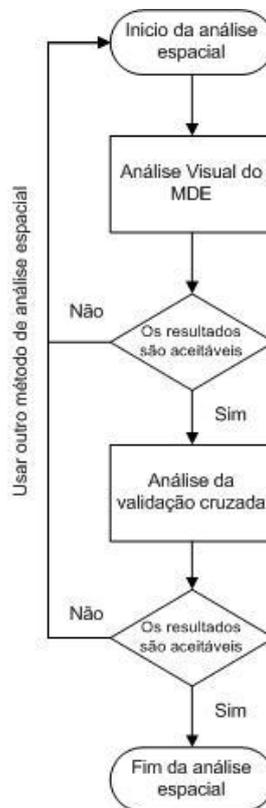


Figura 25. Fluxograma para avaliação do desempenho dos métodos de interpolação espacial.

Para a validação cruzada usam-se os valores da batimetria *SWIM* como valores de controlo, por serem os mais precisos, pois não existem dados obtidos por medição directa para efectuar essa verificação. Nos métodos de interpolação em estudo que não permitem validação cruzada, foi adoptada uma metodologia comparativa, gerando-se para o efeito um ficheiro matricial a partir do ficheiro vectorial (Figura 26), de geometria pontual, da batimetria *SWIM*. A partir de operações de álgebra de mapas cujos fundamentos podem ser consultados em diversas publicações (Tomlin, 1990, Longley et al. 2005, Matos, 2008, entre outros) é, então, possível avaliar as estatísticas de erro.

Para o cálculo das estatísticas de erro são usados os parâmetros apresentados na Tabela 7.

Parâmetro	Descrição
Erro ( $E$ )	Valor observado ( $VO$ ) - Valor de referência ( $VR$ )
Desvio padrão ( $DP$ )	Desvio padrão de $E$
Erro absoluto ( $E_{abs}$ )	Valor absoluto do erro ( $VA$ )
Erro relativo ( $E_{rel}$ )	Valor absoluto de $(VO-VR)/VO$
Erro médio quadrático ( $EMQ$ )	Raiz quadrada da média dos quadrados dos erros

Tabela 7. Parâmetros usados no cálculo do estatístico do erro.

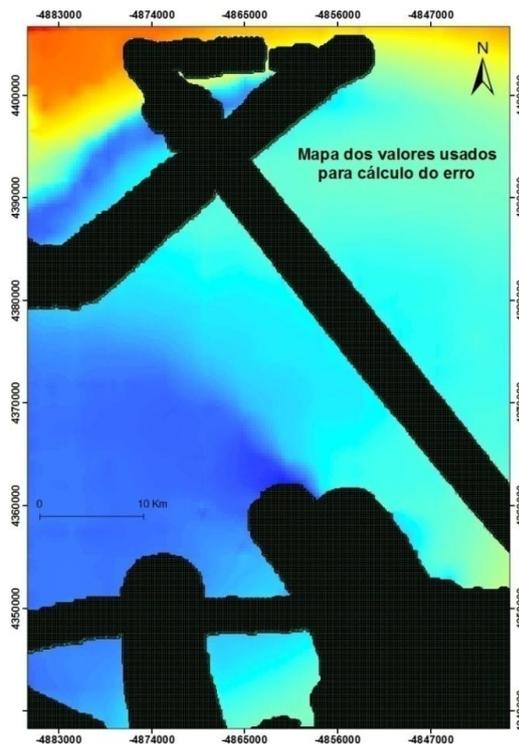


Figura 26. Mapa dos valores usados no controle de erro.

Posteriormente, na avaliação dos resultados obtidos para parâmetros de erro calculados, usam-se os seguintes critérios (adaptado de Johnston et al., 2001):

- O erro médio ( $E$ ), o mais próximo de zero que for possível;
- O erro médio absoluto ( $E_{abs}$  médio), menor possível;
- O Erro Quadrático Médio ( $EMQ$ ), menor possível;
- O desvio padrão ( $DP$ ) deve ser o mais baixo possível indicando, assim, menor dispersão dos erros;
- O valor da média dos valores absolutos dos erros ( $E_{abs}$  médio) deverá ser o menor possível.

### 3.3.3 Ferramentas de Trabalho

A preparação, manipulação e análise espacial dos dados são efectuadas com recurso ao conjunto de ferramentas presentes no software ArcGIS 9.3 da ESRI (Environmental Systems Research Institute), nomeadamente as extensões *Spatial Analyst*, *Geoestatistical Analyst*, *3D Analyst* e o *Model Builder*, para a automatização de processos (Figura 27). A visualização da informação é efectuada utilizando o software *Fledermaus* desenvolvido pela empresa *IVS 3D*.

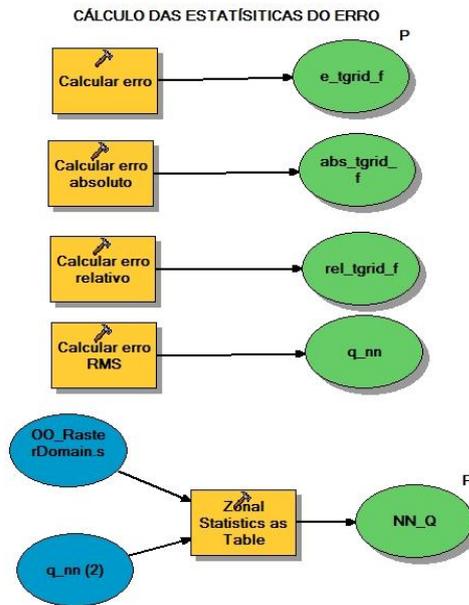


Figura 27. Excerto do modelo criado no *Model Builder* do ArcGIS 9.3 para efectuar álgebra de mapas.

### 3.3.4 Discussão dos Resultados Obtidos pelos Métodos de Interpolação

Neste ponto apresentam-se, avaliam-se e discutem-se os resultados obtidos pelos métodos de interpolação espacial estudados. O método mais eficiente, segundo os parâmetros avaliados, irá ser utilizado no capítulo IV, na produção de modelos de superfície necessários para o caso de estudo proposto.

Da análise visual dos resultados obtidos pelos diferentes métodos de interpolação em estudo, como ilustra a Figura 28, é possível verificar que existem diferenças no comportamento dos algoritmos embutidos nos mesmos.

Como já foi referido, o arranjo espacial dos dados em estudo tem uma distribuição espacial particular, que os diferentes interpoladores têm alguma dificuldade em dirimir. Assim, o interpolador *IDW* (Figura 28-A), apresenta artefactos muito típicos denominados “*bull’s eye*” principalmente nas zonas onde o terreno apresenta maior declive. O *Spline* (Figura 28-B) também apresenta alguns artifícios gráficos nas zonas com maior inclinação, embora nas restantes áreas

parece ter um comportamento aceitável. No que respeita ao interpolador *Polinomial Local* (Figura 28-C), este aparentemente apresenta uma superfície bastante regular, mas um olhar mais atento mostra que esta superfície se encontra muito suavizada, resultado da função polinomial que, grosso modo, ajusta o plano aos pontos observados, o que provavelmente interfere na qualidade do produto final. Finalmente, o interpolador *NaN* (Figura 28-D) parece apresentar o resultado mais equilibrado, embora também não seja completamente eficaz nas zonas com maior declive.

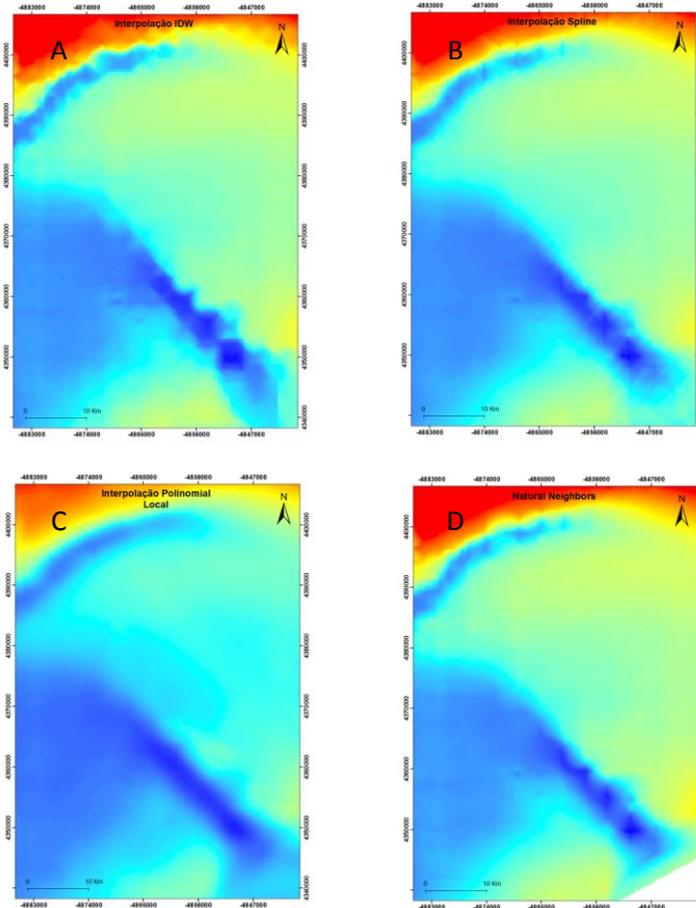


Figura 28. Resultado das interpolações efectuadas com os dados da indústria dos petróleos CHEVRON74 e ESSO81: A) interpolador *IDW*; B) interpolador *Spline*; C) interpolador *Polinomial Local*; D) interpolador *NaN*

Após o exame visual preliminar, procede-se à análise crítica dos resultados obtidos pela estatística de erro efectuada de acordo com a modelação acima descrita. Os resultados obtidos constam da Tabela 8. Como se pode observar na referida tabela, os interpoladores que apresentam piores resultados são os *IDW* e o *Spline Regular*, o que corrobora as observações visuais efectuadas. O melhor método de interpolação testado é o *Natural Neighbors (NaN)*.

Método	Erro médio	DP	$E_{abs}$ médio	% média $E_{rel}$	EMQ
<i>IDW</i>	-12	26	22	0.04	29
<i>NaN</i>	-0.7	6	2.9	0.004	5
<i>Polinomial Local</i>	-1	15	9	2	15
<i>Spline Regular</i>	-9	24	21	0.04	26

Tabela 8. Erros de estimação obtidos para os métodos seleccionados. Valores em metros.

Sendo este o método com melhor desempenho, atendendo tanto à análise visual como aos valores calculados na estatística efectuada, opta-se por apresentar apenas o mapa de erros obtido para este interpolador (Figura 29). Como se pode observar na Figura 29, as zonas mais problemáticas, isto é, onde o erro cometido é maior para interpolação NaN, correspondem aos locais onde existe maior variação de cota e onde o declive é maior.

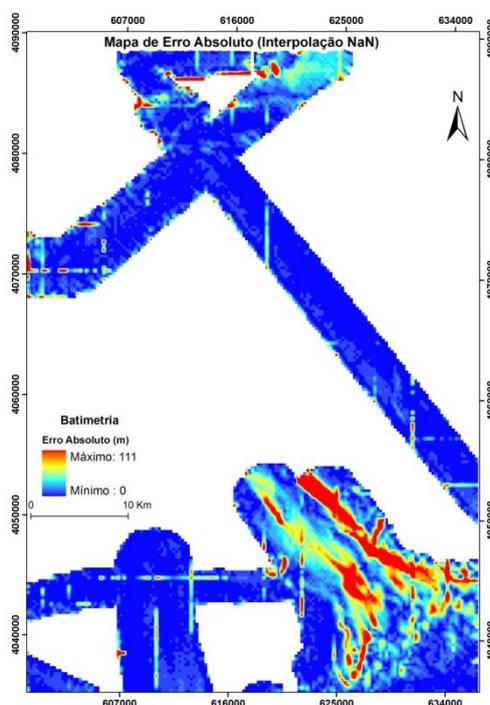


Figura 29. Erro absoluto da interpolação *NaN*, com os dados da indústria dos petróleos CHEVRON74 e ESSO81.

### 3.3.5 Síntese Conclusiva do Estudo sobre Métodos de Interpolação

A estimação da qualidade dos interpoladores para cada um dos métodos utilizados foi efectuada através da comparação dos diferentes tipos de erro, demonstrando que as diferenças existentes entre os mesmos são bastante significativas, destacando-se como melhor método de interpolação o *Natural Neighbors*.

Esta conclusão está de acordo com o referido em Sambridge et al., 1995, que aponta os seguintes pontos fortes do interpolador *NaN* na sua aplicação a dados provenientes de levantamentos geofísicos:

- ✓ Os valores da função original correspondem exactamente aos pontos de referência;
- ✓ A interpolação é inteiramente local, isto é, cada ponto é apenas influenciado pelos nós que são seus vizinhos naturais;
- ✓ As derivadas da função interpolada são contínuas em todos os pontos com excepção dos pontos de referência;
- ✓ Por último, a capacidade de lidar com distribuições espaciais de pontos altamente irregulares, onde as grandes variações na escala dos comprimentos das funções interpoladas pode ser facilmente representada.

Concluiu-se, desta forma, que o desempenho dos interpoladores mais comumente utilizados para a interpolação espacial não se adequa facilmente aos dados provenientes de levantamentos geofísicos devido ao seu peculiar arranjo espacial, quando comparados com os resultados obtidos através do método de interpolação *Natural Neighbors*.

No entanto, este interpolador tem algumas limitações no que respeita ao tipo de dados de entrada, os quais têm que ser, obrigatoriamente, de geometria pontual e no desempenho no processamento dos dados, que comparativamente com outros métodos de interpolação é muito mais lento. Este facto pode ser relevante, pois por vezes os dados em análise são constituídos por largos milhões de pontos e mesmo com a tecnologia actual, as operações de processamento podem levar dias a ser efectuadas.

Provando-se com base nas metodologias testadas e implementadas, que os resultados obtidos pelo método *Natural Neighbors* são adequados para os dados provenientes de levantamentos geofísicos, esta análise constitui o ponto de partida e a justificação para a realização de todos os mapas de modelação de superfície necessários para o estudo geológico desenvolvido no capítulo IV. Estes terão como objectivo modelar para além do fundo marinho, as superfícies correspondentes aos limites das diferentes horizontes e unidades sísmicas interpretados, que caracterizam a geologia do subsolo marinho nas áreas dos levantamentos geofísicos CHEVRON74, ESSO81 e ERSTA\_SANDEX, servindo deste modo para construir os mapas que permitirão caracterizar e explicar a actividade neotectónica da falha SMQ.

Em trabalho posterior será necessário abordar um tema que aqui não foi discutido, mas que é muito importante quando se efectua a construção de modelos digitais de elevação, a obtenção do tamanho do pixel adequado para a representação matricial dos dados. Esta temática, bastante complexa, é abordada em Hengl T. (2005), para modelação de dados de uso do solo, salientando-se

que a metodologia proposta por este autor necessita de algumas adaptações para ser aplicada ao tipo de dados usados no presente estudo.

Para obviar esta limitação utilizou-se uma metodologia iterativa, testando-se vários tamanhos de *pixel* até atingir um valor satisfatório, garantindo deste modo que os modelos gerados não apresentam artefactos comprometedores para as análises efectuadas no caso de estudo. Assim, enquanto nos modelos que resultam dos dados da indústria dos petróleos o tamanho do *pixel* têm uma dimensão de 500 metros, nos modelos gerados com os dados recolhidos na campanha ERSTA\_SANDEX este têm uma dimensão de 50 metros.

## 4. CASO DE ESTUDO: O CASO DA FALHA DE SÃO MARCOS-QUARTEIRA

No presente capítulo enquadra-se a região do Algarve na Margem Sudoeste Ibérica e aplica-se o método de interpolação, Natural Neighbours, seleccionado a partir do estudo efectuado no capítulo anterior. Com base neste método são produzidos e posteriormente analisados os diversos modelos de superfície que concorrem para a caracterização, geométrica, cinemática e dinâmica da falha São Marcos-Quarteira (SMQ) averiguando-se a sua actividade neotectónica, o seu prolongamento para offshore e o impacto no contexto geológico contíguo.

### 4.1 Enquadramento da Região do Algarve no Contexto da Margem Sudoeste Ibérica

A região do Algarve localiza-se a norte do segmento oriental da Zona de Fractura Açores-Gibraltar (ZFAG), num quadro tectónico dominado pela convergência NW-SE a WNW-ESE entre a Ibéria localizada na placa litosférica Eurásia e o bloco Núbia da placa África. Nesta região destacam-se três domínios morfo-tectónicos: o prisma acrecionário do Golfo de Cádiz a sul, a Planície Abissal da Ferradura e o Banco de Gorringe a oeste e o arco orogénico de Gibraltar ou arco- Bético-Rifenho a este (Figura 30).

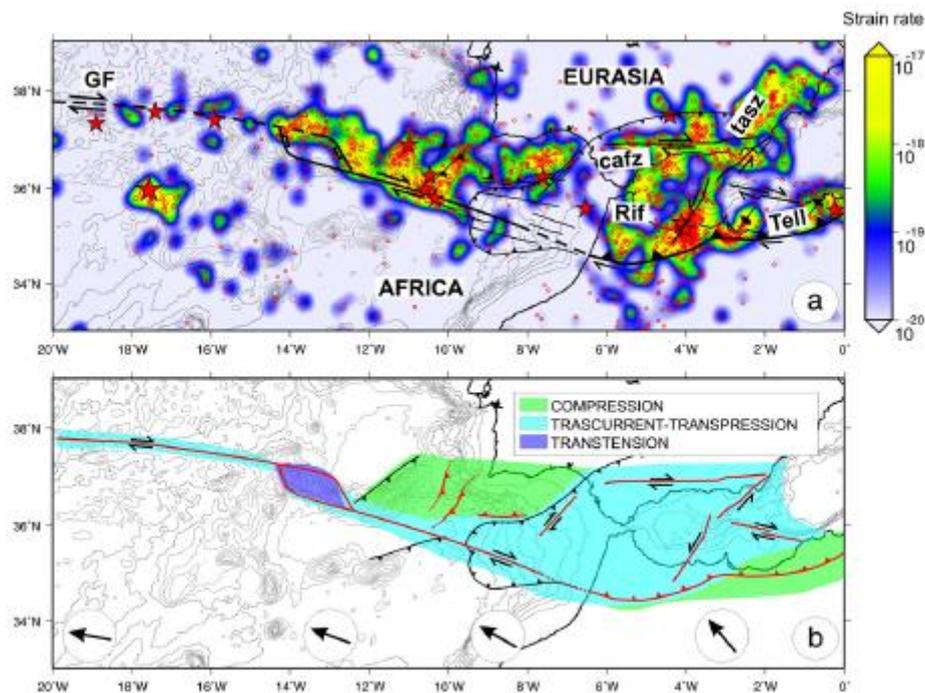


Figura 30. Domínios morfo-tectónicos da Margem Sudoeste Ibérica.

O campo de tensões que afecta a Ibéria apresenta uma tensão compressiva máxima horizontal ( $\sigma_1$ ) orientada NW-SE no interior do território português e no litoral meridional, e WNW-ESE próximo do

litoral ocidental (Cabral, 1995; Ribeiro et al., 1996; Herraiz et al., 2000). No Golfo de Cádiz, os modelos geodéticos recentes mostram uma convergência oblíqua segundo a direcção WNW-ESE entre a Núbia e a Ibéria (Stich et al., 2006).

Este contexto é responsável pela ocorrência de actividade tectónica regional e sismicidade significativa, proporcionando um cenário de importante potencial sismogénico (Dias 2001, Terrinha, et al. in press).

#### **4.2 Actividade Sismotectónica e Tsunamigénica**

Decorrente da sua proximidade com o segmento oriental da fronteira de placas Ibéria-Núbia, a região Sul da Ibéria caracteriza-se pela ocorrência de sismos de magnitude pequena a moderada ( $M < 5$ ) (a maioria dos quais com hipocentro localizado a profundidade inferior a 40 km (Buforn et al., 2004)) e sismos de grande magnitude ( $M > 8$ ) com grandes intervalos de recorrência. Trabalho recente baseado na análise de registos de sismicidade em 25 OBS localizados no Golfo de Cádiz ocorridos entre Julho de 2007 e Setembro de 2008 indica ocorrência principal dos eventos entre os 30 e os 50 km para  $M = [1.2-4.5]$ , segundo Silva et al (2009). Na Margem Sul Portuguesa, a sismicidade encontra-se associada a quatro morfo-estruturas principais, o Banco de Gorringe, a Falha da Ferradura, a Falha Marquês de Pombal e o Banco de Guadalquivir.

A Margem SW Ibérica foi abalada em tempo histórico por fortes sismos, alguns deles associados a tsunamis, de entre os quais merecem particular destaque, pela destruição que provocaram, os sismos de Lisboa em 1755 ( $M=8.75$ ) (Richter, 1958; Abe, 1979), o tsunami de 60-63 AC, que devastou a cidade de Cádiz e o evento de 1531 que atingiu a costa SW de Portugal (Zitellini et al., 2004). Regista-se ainda a ocorrência do sismo de 28 de Fevereiro de 1969, com hipocentro localizado na Planície Abissal da Ferradura, a cerca de 22 km de profundidade, que atingiu uma magnitude de 7.9 (Fukao, 1973).

Existem registos históricos da ocorrência de alguns sismos, com características intraplaca, de intensidade elevada, na zona emersa ou próxima do litoral algarvio: o sismo de Portimão em 1719 com intensidade IX, na Escala de Intensidades de Mercalli Modificada, o de Tavira em 1722 que gerou um tsunami (Baptista et al., 2000), com intensidade X e o de Loulé em 1856, com intensidade máxima de VIII, (Carillho et al., 1997).

#### **4.3 Evolução Geodinâmica da Margem SW Ibérica**

A evolução Mesozóica da zona sul da Ibéria foi guiada e constringida pelos movimentos das placas mais importantes que a cercavam, a África, a Eurásia e a América) (Dewey et al., 1989; Srivastava et

al., 1990). Durante o Mesozóico, a separação entre a Ibéria e as placas África e América do Norte induziu diversos episódios de rifting precusores da abertura do Neo-Tétis e do Atlântico Central (Roque, 2007).

A partir do Cenomaniano a África passa a aproximar-se da Eurásia, iniciando a inversão tectónica das bacias distensivas anteriormente formadas, como no caso da Bacia Algarvia, cuja inversão tectónica se iniciou no Cretácico superior, pós-cenomaniano e perdurou durante o Paleogénico, com impulsos compressivos de menor importância no Miocénico (Terrinha, 1998).

#### **4.3.1 Rifting Inicial Triásico-Jurássico Inferior**

A estreita franja de sedimentos triásicos e da transição Triásico-Jurássico não deixa grande espaço de observação. Os trabalhos realizados por Palain (1975) e vários autores que se dedicaram à cartografia geológica da Bacia Algarvia parecem mostrar que a drenagem sedimentar continental anterior à invasão marinha da Margem Algarvia se operava no sentido de nordeste para sudoeste, ou seja, sugerindo que o depocentro Triásico se situava para sudoeste da margem continental portuguesa. O facto de esta direcção ser perpendicular à direcção das estruturas orogénicas paleozóicas, sugere que este depocentro inicial estivesse associado a um ponto triplo litosférico a W do Algarve e que a distensão estivesse a ser acomodada pelo colapso das estruturas de empilhamento orogénico da orogenia varisca (ou hercínica).

Através de reconstituição da cinemática de placas consegue-se mostrar que durante o Triásico, o S da Ibéria fazia parte dos sistemas de rift relacionados com a abertura do Neo-Tétis, resultantes da reactivação das fracturas da orogenia varisca (Ziegler, 1988), como falhas extensionais. Este rifting Triásico levou ao desenvolvimento das margens continentais do sul da Ibéria e Norte de África. Associado a este fenómeno regista-se a ocorrência de um breve episódio de vulcanismo básico toleítico no Hetangiano, também representado na cordilheira Ibérica e nas bacias do Atlas. A tectónica extensional pós-vulcanismo ocorreu com direcção SSW rodando posteriormente para SE (Maldonado et al., 1999).

#### **4.3.2 Rifting Jurássico-Cretácico**

Durante o Jurássico e o Cretácico, o depocentro da Bacia Algarvia deslocou-se para E, o que nos é revelado pelo espessamento das séries sedimentares destas idades no Algarve oriental (> 4 km) em comparação com as do Algarve ocidental (+/-0,5 km). Este facto coaduna-se com as evidências de que o oceano Neo-Tétis se expandiu de E para W segundo as coordenadas actuais e que o ponto triplo a localizado a SW de Portugal desenvolveu principalmente os seus ramos de tendência N-S que deram origem ao Oceano Atlântico. O ramo de tendência E-W, actualmente transformado na ZFAG, ficou associado a um limite transcorrente que neste intervalo de tempo terá sido transtensivo com

eventual geração de crosta oceânica, separando a Ibéria de África. Este oceano nunca terá sido muito largo, conforme mostram várias reconstituições paleogeográficas. À escala da tectónica de placas, o estiramento que deu origem às margens continentais e às bacias do NW de África e SW da Ibéria deveu-se ao movimento transcorrente transtensivo sinistrógiro da África em relação à Ibéria, durante o Jurássico e o Cretácico inferior, de NW para SE (Dewey et al., 1989), reactivando falhas tardi-variscas de orientação NE-SW, como falhas extensionais (Terrinha, 1998).

O regime transtensivo geral que caracteriza o Mesozóico foi interrompido no Jurássico Inferior, na passagem Jurássico Médio-Superior e no Cretácico Inferior, momentos onde se registaram episódios curtos de inversão tectónica, bem registados na Margem Algarvia (Terrinha et al., 2002).

### **4.3.3 Evolução do Cenozóico ao Presente**

A partir do Cenomaniano (+/-92 Ma), base do Cretácico Superior, África inicia uma rotação anti-horária em relação à Europa Central, deslocando-se para NE, continuando a rotação do seu vector de movimento no sentido sinistrógiro, ligado com a abertura do Atlântico Sul. A convergência generalizada entre as Placas África e Eurásia teve como consequência a subducção da crosta oceânica do Neo-Tétis sob a litosfera continental da Eurásia e provavelmente provocado o início da subducção para NW do Oceano Ligúrico, ao longo da Margem Oriental Ibérica (Faccenna et al., 2001). Esta zona de subducção terá sido contínua pelo menos desde a zona SE Ibérica até aos Alpes (Figura 31). Alguns autores sugerem que a subducção se prolongaria até à zona SW Ibérica, acomodando a convergência entre a Placa África e a Placa Ibéria entre o Cretácico Superior-Paleogénico e o Miocénico (Srivastava et al., 1990; Terrinha et al., in press). No Cretácico Superior ocorreu a abertura do Golfo da Biscaia que provocou a rotação sinistrógiro da Ibéria (+/- 30º) e a sua deslocação para W (Sanz de Galdeano, 2000)

No Eocénico Inferior o movimento de África é dirigido para N (Dewey et al., 1989) e no final do Eocénico o Oceano Atlântico já apresentava uma configuração próxima da actual (Olivet et al., 1984). Entre o Oligocénico Médio e o Miocénico Superior, na área do Golfo de Cádiz teriam ocorrido cerca de 200 km de convergência N-S, seguidos de cerca de 50 km de convergência oblíqua sinistrógiro (SE-NW) desde o Miocénico Superior até à actualidade (Dewey et al., 1989).

O primeiro resultado na Margem Portuguesa da rotação anti-horária da África em relação à Ibéria foi o fim do regime de transtensão sentido na Margem Sul Portuguesa e fim da subsidência da Bacia Algarvia. Efectivamente, os sedimentos mesozóicos mais antigos encontrados no Algarve são de idade cenomaniana. Verifica-se também, que as estruturas compressivas na Bacia Algarvia, são na sua maioria anteriores ao Miocénico e de muito maior envergadura do que as pós-miocénicas. O Paleogénico, ainda que ausente na área emersa, foi reconhecido em sondagens na área imersa e, perfis sísmicos de reflexão permitem pôr em evidência dobramentos pré-paleogénicos e pós-

paleogénicos-ante-miocénicos. No Miocénico, altura em que a deformação compressiva se torna mais importante no maciço central português (*pop-up* da serra da Estrela) e na Bacia Lusitânica (serra e cadeia de cavalgamentos da Arrábida) a deformação compressiva na Bacia Algarvia é praticamente inexistente. Contudo na área imersa a sul do Banco do Guadalquivir, i.e. na parte profunda do Golfo de Cádiz, verifica-se que a compressão miocénica continuou activa até à actualidade (Figura 31).

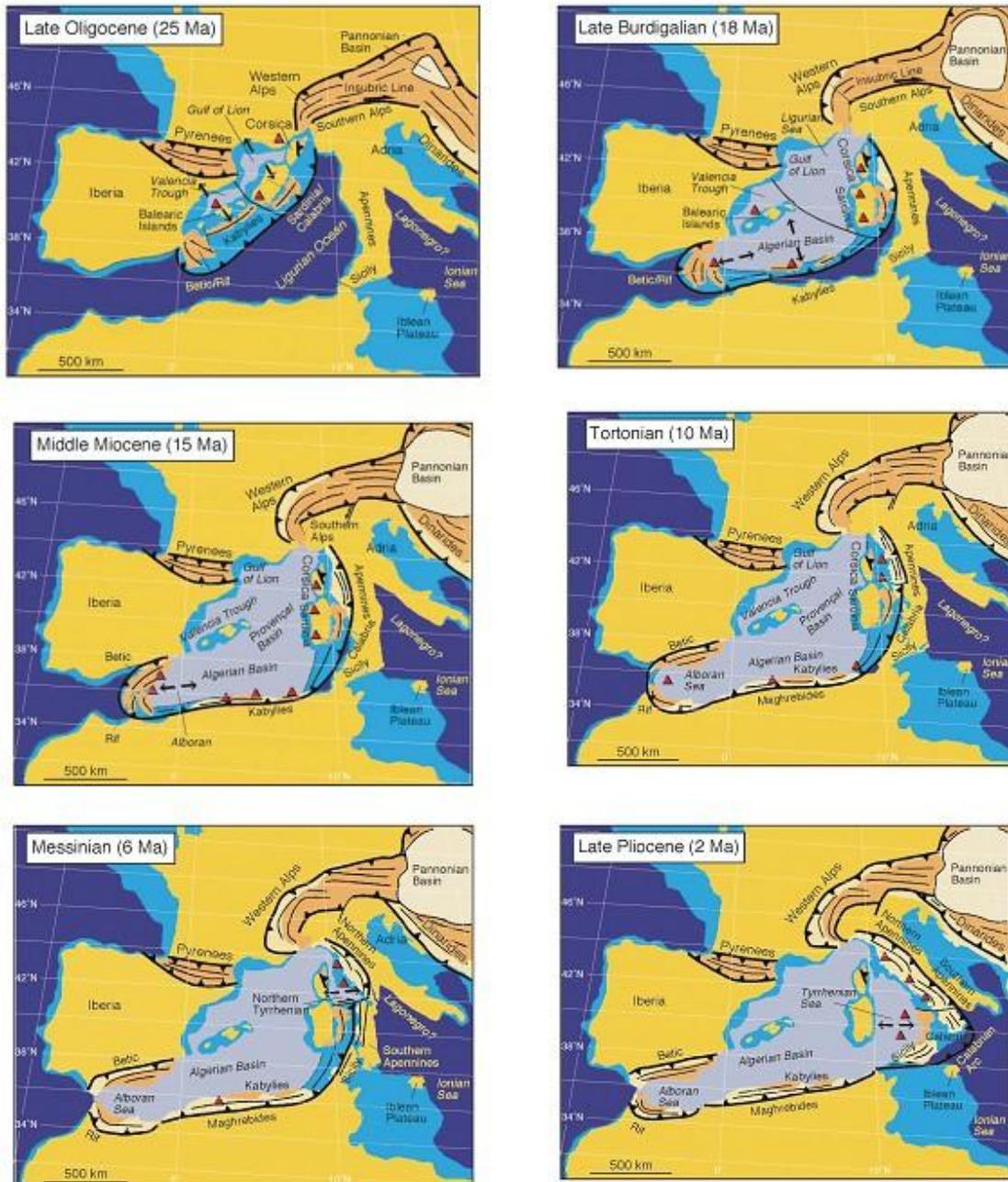


Figura 31. Reconstituição da evolução tectónica do Mediterrâneo Ocidental desde o Oligocénico superior até ao Pliocénico superior (Rosenbaum et al., 2002).

Presentemente, porque a se África desloca para WNW em relação à Ibéria o Golfo de Cádiz apresenta um cenário generalizado de deformação transpressiva. A tensão compressiva é dissipada através da partição da deformação ao longo de estruturas pré-existentes. A reactivação destas estruturas ocorre segundo diversos estilos tectónicos de acordo com a sua posição e orientação, sendo de salientar a existência de falhas de desligamento direito WNW-ESE e duas famílias de cavalgamentos com direcções E-W e NE-SW (Rosas et al., 2009; Terrinha et al., in press, Zitellini et al., 2009).

#### **4.4 Enquadramento Estratigráfico**

A Orla Sedimentar Meridional ou Bacia do Algarve é constituída por um domínio emerso, com orientação aproximadamente E-W, paralelo à linha de costa, onde formações mesozóicas e neogénicas repousam sobre um soco varisco tectonizado e metamorfizado e por um domínio imerso, denominado Margem Continental do Algarve, que corresponde ao prolongamento submarino da Bacia situada em terra, consistindo em três bacias sobrepostas, tectónica e estratigraficamente distintas (Terrinha, 1998; Terrinha et al., 2006). O preenchimento sedimentar destas bacias, consideradas no seu conjunto, é composto por depósitos que abarcam o Meso-Cenozóico com uma importante discordância, entre o Cretácico superior (Cenomaniano) e o Miocénico em terra e Eocénico no mar.

##### **4.4.1 Estratigrafia da Área Emersa**

###### **4.4.1.1 Mesozóico**

A Bacia do Algarve é limitada a N pelas formações de fácies continental do Triásico a Jurássico inferior (Hetangiano), constituídas por depósitos clásticos, evaporíticos e carbonatados, bem como pelo complexo vulcano-sedimentar (Manupella, 1998). A sedimentação marinha iniciada no Jurássico inferior representa um mega sequência predominantemente carbonatada que apresenta diversas variações de fácies e se estende até ao final deste sub-sistema.

Durante o Jurássico inferior depositam-se sedimentos tipicamente marinhos correspondentes a um ambiente predominantemente hemipelágico. Durante o Jurássico médio o ambiente de deposição alterna entre o de plataforma continental e o hemipelágico reflectindo variações do nível do mar (Manupella et al., 1992). No Jurássico superior a sedimentação é representada por sedimentos de plataforma interna, por vezes confinada (Ramalho, 1985). A partir do Kimmeridgiano superior o ambiente sedimentar passa a ser uniforme de plataforma interna, com desenvolvimento de espessas séries carbonatadas francamente regressivas, atingindo-se o pico regressivo na transição Jurássico-Cretácico (Manupella et al., 1992). As transições entre os sub-sistemas Jurássicos e para o Cretácico

inferior encontram-se incompletas no topo e na base de cada um, com discordâncias erosivas bem marcadas, provavelmente associadas a episódios compressivos (Terrinha et al., 2002).

Durante o Cretácico sucedem-se três ciclos de mega sequências com características iniciais de tendência regressiva e final tipicamente transgressivo. Estes ciclos são separados por duas discontinuidades principais: a “descontinuidade valanginiana”, manifestada por lacunas importantes, colocando em contacto formações do Berrassiano médio a Valangiano basal, com formações do Hauteriviano ao Barremiano, acompanhado de movimentos tectónicos em zonas diapíricas e a “descontinuidade beduliana” correspondente a uma transgressão marinha generalizada (Rey, 1983). A sedimentação, no Hauteriviano e no Barremiano é mais evidente no Algarve oriental, tem características marinha e fluviais. Com a transgressão do Aptiano inferior e o aumento da subsidência, as fácies tendem a ser mais uniformes depositando-se sequencialmente, em todo o Algarve, “Calcários com Palorbitoninas”, “Margas da Luz” e “Margo-calcários de Porto de Mós” (Rey, 1983). O Cretácico superior é apenas reconhecido no Algarve oriental (Rey, 1983; Manupella et al., 1992). Neste período instala-se o Complexo Ígneo de Monchique, de natureza marcadamente alcalina, constituído essencialmente por dois anéis concêntricos de sienitos nefelínico e intrusões básicas e ultra-básicas no centro (Clavijo e Valadares, 2003) datado por vários autores entre os 72-74 Ma (Valadares, 2004; Miranda et al., 2009).

#### **4.4.1.2 Cenozóico**

Na região do Algarve o Cenozóico é constituído por sedimentos do Paleogénico, Miocénico, Pliocénico e Quaternário, sendo o primeiro apenas bem representado na parte imersa.

A transição do Mesozóico para o Cenozóico é marcada por uma superfície de discordância generalizada que corresponde a uma superfície de erosão sub-aérea. Assim, no território emerso algarvio, o Paleogénico está apenas representado pela “Formação da Guia” (Manupella, 1998).

As séries miocénicas depositaram-se, geralmente em discordância sobre os depósitos precedentes carbonatados (Manupella, 1998; Antunes e Pais, 1993). Estas são compostas essencialmente por depósitos carbonatados (sobretudo do Burdigaliano) e arenosos litorais (Langhiano-Serravaliano), depósitos clásticos de fácies litoral e pelágica (Tortoniano inferior) e, depósitos conglomeráticos poligénicos (sobretudo no Messiniano) (Ribeiro et al., 1979; Antunes et al., 1981; Oliveira et al., 1984; Manupella, 1988; Antunes e Pais, 1993).

O Plio-Quaternário da região algarvia é caracterizado pela ocorrência de areias e cascalheiras de praia, por aluviões de ribeiras e areais dunares (Rocha et al., 1979; Oliveira et al., 1984, Manupella et al., 1987a,b). Observando a Figura 32, verifica-se que os sedimentos do Plio-Quaternário na região

do Algarve estão representados por duas grandes manchas cartográficas correspondentes aos seguintes depósitos:

- Areias, Arenitos e Cascalheiras do litoral do Baixo Alentejo, datadas do Pliocénico, afloram no litoral ocidental (Manupella et al., 1992). Estas assentam geralmente sobre rochas do Paleozóico, e pontualmente em formações do Miocénico ou preenchendo rochas do Jurássico carsificadas (Dias, 2001);
- Areias e Cascalheiras de Faro-Quarteira datadas como pliocénicas (embora consideradas pliocénicas por diversos autores), cobrem uma vasta extensão ao longo do litoral algarvio. Entre Faro e Olhão, as areias dunares constituem uma grande parte do sistema de ilhas barreira da Ria Formosa, em associação com areias de praia (Manupella et al., 1987a,b). Geralmente assentam sobre terrenos do Mesozóico, embora em alguns locais se tenham depositado sobre metassedimentos do Paleozóico (Dias, 2001).

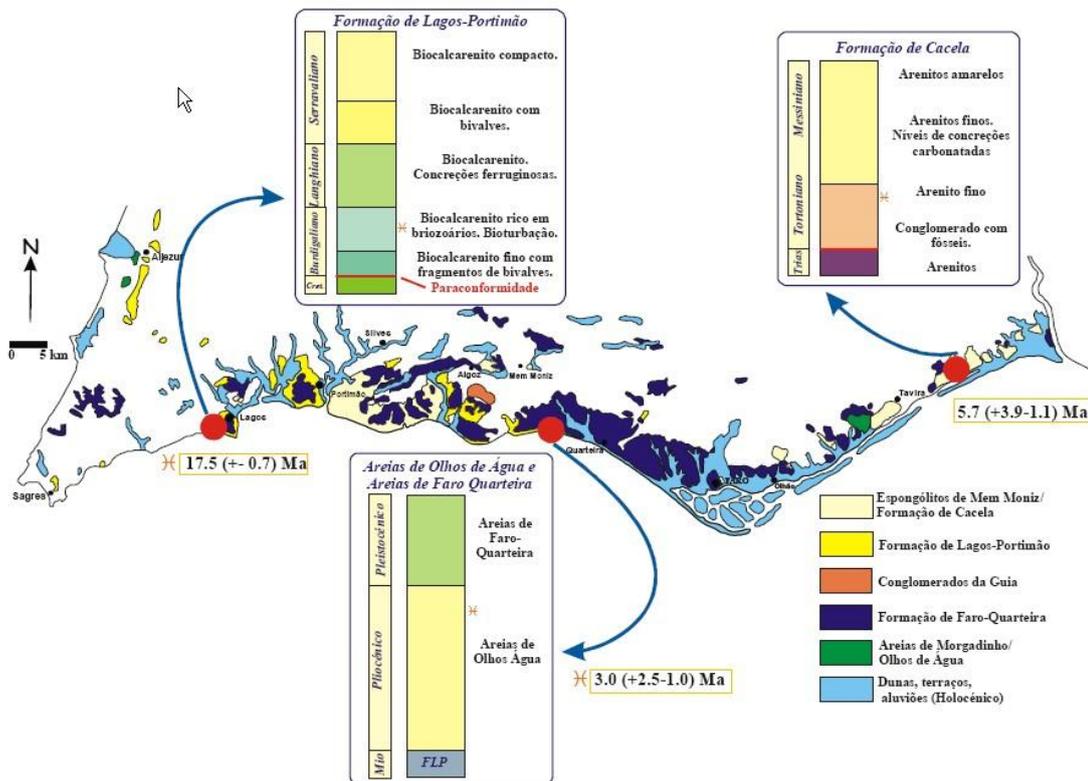


Figura 32. Cartografia simplificada dos depósitos neogénicos da Bacia do Algarve (Pais et al., 2000).

#### 4.4.2 Estratigrafia da Área Imersa

A geologia da área imersa da Bacia do Algarve tem sido alvo de diversos estudos, desenvolvidos ao longo de vários anos, por vários autores. A estratigrafia da região foi inicialmente estabelecida com recurso a técnicas de amostragem de rocha e ao estudo do conteúdo fóssilífero (Baldy, 1977; Baldy

et al., 1977; Mougenot et al., 1979; Mougenot, 1988). As formações identificadas abarcam um intervalo de tempo prolongado entre o Carbónico e o Quaternário, com largo predomínio das formações neogénicas e quaternárias (Mougenot et al. 1979).

A definição das sequências deposicionais foi efectuada com recurso à análise de perfis sísmicos de reflexão principalmente com fontes Sparker e Air Gun. A partir da análise conjunta das informações recolhidas por estes sistemas torna-se possível efectuar uma síntese sismostratigráfica baseada nos trabalhos desenvolvidos por diversos investigadores, nomeadamente Baldy (1977), Baldy et al. (1977), Mougenot et al. (1979), Malod (1979) e Mougenot (1988), Terrinha (1998) e Lopes et al., (2006).

Roque (2007), efectuou uma análise da estratigrafia sísmica da Bacia do Algarve, utilizando as linhas sísmicas ESSO, Challenger e Chevron e a uma calibração estratigráfica com recurso a cinco sondagens petrolíferas. Da síntese efectuada resultou a identificação de três mega-sequências sísmicas, detalhadas na Figura 33. A separação entre as três mega-sequências é materializada pela presença de duas importantes e bem marcadas discordâncias identificadas à escala de toda a bacia do Algarve (op. cit.). A mais antiga, referenciada como discordância Cz, corresponde ao intervalo entre o Cretácico Inferior e o Paleocénico/Eocénico e a mais moderna, referenciada como discordância M, situada na base dos depósitos do Neogénico truncando as unidades subjacentes do Paleogénico e em alguns locais inclusivamente o Mesozóico.

- Mega-sequência I: corresponde a depósitos do Mesozóico, limitada na base pelo soco acústico e no topo pela descontinuidade Cz ou nalguns casos pela descontinuidade M. No seu interior individualizam-se duas unidades sísmicas Mz1 (Triásico e Jurássico) e Mz2 (Cretácico inferior) separadas por uma reflexão com forte amplitude e baixa continuidade lateral, a descontinuidade J.
- Mega-sequência II: corresponde a depósitos do Paleogénico, limitada na base pela descontinuidade Cz e no topo pela descontinuidade M. É composta por duas unidades sísmicas, a unidade Pg1 (Paleocénico superior/Eocénico) e a unidade Pg2 (Oligocénico).
- Mega-sequência III: corresponde a depósitos do Neogénico, limitada na base pela descontinuidade M e a topo pelo fundo marinho. Nesta mega-sequência composta por três sequências sísmicas (A,B e C), cuja deposição foi controlada por diferentes episódios de subsidência neogénica, identificam-se dez unidades sísmicas (designadas de BA1 a BA10). Estas estendem-se entre o Burdigaliano (unidade sísmica BA1) e o Plistocénico-Holocénico (unidade sísmica BA10).

Roque (2007) propõe um modelo de correlação entre a litostratigrafia das áreas emersa (Cachão e Silva, 2000) e a sismostratigrafia da área imersa (Figura 33).

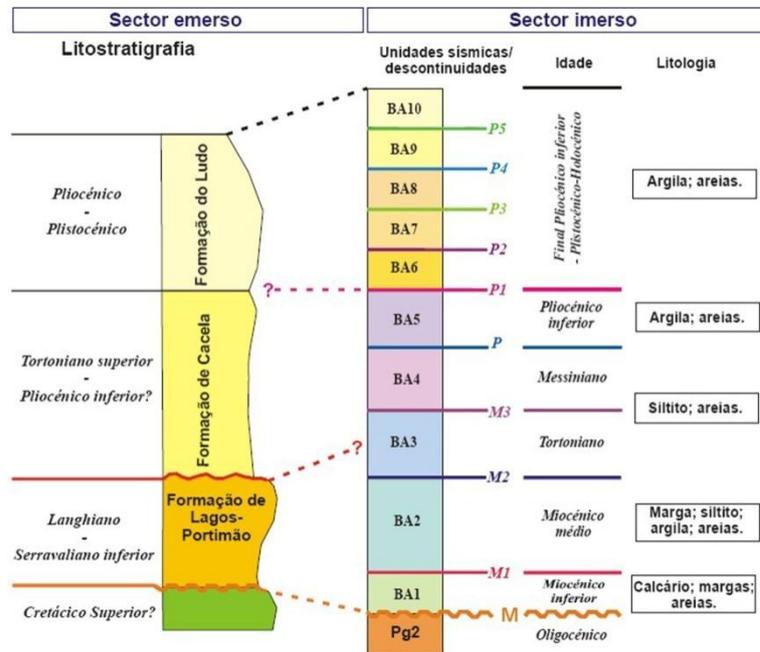


Figura 33. Modelo de correlação entre a litostratigrafia das áreas emersa e a sismostratigrafia da área imersa.

#### 4.5 Principais Estruturas Tectónicas da Bacia do Algarve

O mapa da Figura 34, mostra as principais estruturas tectónicas da região do Algarve, dando ênfase às estruturas que são objecto de estudo neste projecto, as quais estão nomeadas na referida figura e são resumidamente caracterizadas de acordo com os estudos previamente realizados por diversos autores.

O conceito de actividade tectónica activa (neotectónica) utilizado neste projecto, define-se como aquela que ocorreu após a última reorganização significativa da tectónica regional e que, em território continental português terá ocorrido no final do Pliocénico, há cerca de 2 milhões de anos (Cabral, 1993).

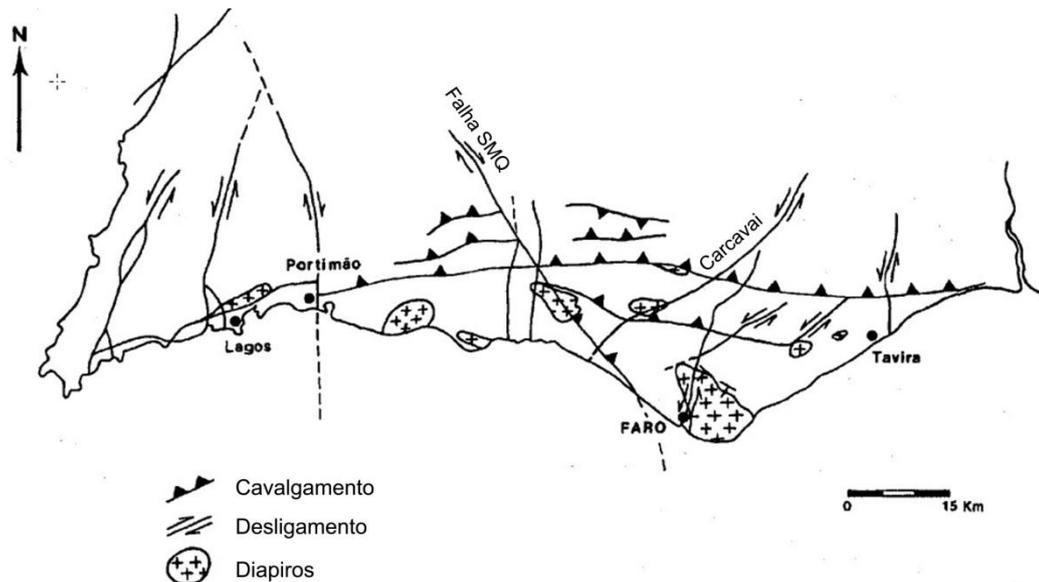


Figura 34. Principais estruturas tectónicas da região do Algarve.

#### 4.5.1 A Falha São Marcos-Quarteira

A falha SMQ, já referenciada por Choffat (Choffat, 1907), tem direcção geral NW-SE, estendendo-se desde São Marcos da Serra, a N, até Quarteira, a S, numa distância superior a 40 km, prolongando-se para a área imersa, na plataforma continental, separando a bacia Algarvia em dois blocos com comportamentos tectónicos diferentes, controlando os relevos da serra da Mesquita, a W, e a serra do Caldeirão, a E.

Em imagem de satélite (Figura 35) o seu traçado é evidente em dois sectores (Dias 2001), designadamente:

- entre São Bartolomeu de Messines e São Marcos da Serra, correspondendo a um vale de fractura no soco varisco, por onde circulam linhas de água que pertencem à bacia hidrográfica da Ribeira de Odelouca, a N da zona do Monte da Serra (área de São Marcos da Serra), e à bacia hidrográfica da Ribeira de Arade, a S (área de São Bartolomeu de Messines).
- entre Tunes e Quarteira, correspondendo à zona de passagem da Ribeira de Quarteira em formações do Meso-Cenozóico.

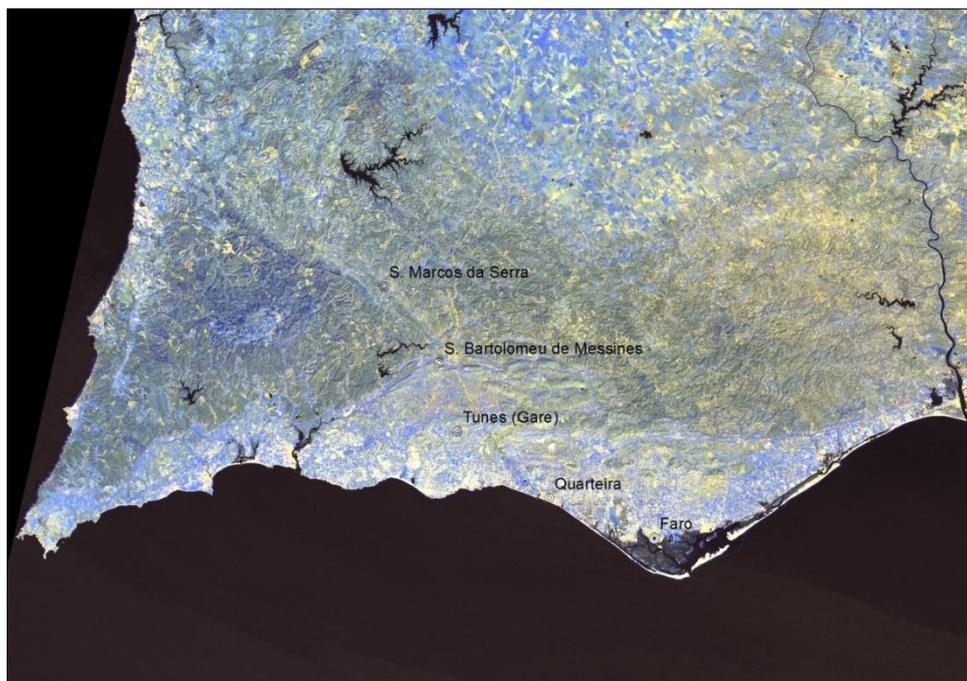


Figura 35. Imagem de satélite (composição RGB745) onde se evidencia o traçado da falha SMQ.

Entre São Bartolomeu de Messines e Tunes, na zona do Barrocal, que é constituída por rochas do Jurássico inferior extensivamente dolomitizadas, o lineamento é pouco perceptível.

A falha SMQ corresponde a uma estrutura herdada do soco paleozóico, tendo sido reactivada desde o Triásico até ao Quaternário, rejogando durante o Plio-Quaternário com movimentação direita e pequena componente de movimentação inversa mal constrangida (Manuppella et al., 1986; Manuppella, 1988, Kulberg e tal., 1992 Dias, 2001; Terrinha, 1998).

Segundo Terrinha (1998), enquanto no soco varisco e nos sedimentos do Triásico, o acidente corresponde a uma falha, nos dolomitos de Sinemuriano é materializado por um corredor de deformação, em grande parte absorvida pelo complexo vulcano-sedimentar do Hetangiano. A sul da falha de Algibre, a falha SMQ está materializado por uma série de desligamentos direitos em *duplex*, que estão enraizados no complexo evaporítico ou no soco varisco (Terrinha, 1998).

Durante o Triásico, a falha SMQ controla a sedimentação, facto evidenciado por uma variação lateral de fácies dos sedimentos triásicos através da falha. Existem depósitos conglomeráticos grosseiros, cobertos por pelitos com gesso e dolomite, no bloco leste do acidente os quais não existem no bloco oeste do mesmo (Terrinha, 1998) e variação de espessuras de um bloco para outro (Palain, 1975).

Durante o Mesozóico esta estrutura funcionou como uma falha transtensional que, conjugada com outros acidentes extencionais da Bacia Algarvia, permitiu uma sedimentação muito superior no bloco a E (Terrinha, 1998).

Durante o período de inversão tectónica da Bacia Algarvia, a falha separa dois domínios de encurtamento diferentes, designadamente, o domínio oriental, com desenvolvimento de dobras, com zonas de descolamento entre o soco e o complexo pelítico-evaporítico, e o domínio ocidental, onde as dobras não se desenvolveram e o soco cavalga a Bacia (Terrinha, 1998).

Durante o Miocénico esta estrutura controlou a sedimentação, separando dois domínios diferentes: a ocidente da falha existe uma predominância da Formação de Lagos-Portimão, e a oriente predomina a Formação de Cacela (Kullberg e tal., 1992).

Mariano Feio (1951) considera que a actividade tectónica na fractura de São Marcos (falha SMQ) é anterior, pelo menos, ao Pliocénico médio, pois:

- a fractura de São Marcos ramifica-se, na zona de São Marcos, em duas falhas distintas, incluindo a fractura de São Marcos propriamente dita, de direcção NNE-SSW, a falha que gerou a escarpa da Mesquita (falha da Mesquita), de direcção NE-SW, que está deslocada, para sul, por sucessivos desligamentos (Feio, 1951, p. 324);
- a actividade tectónica na falha da Mesquita é mais recente do que na fractura de São Marcos (Feio, 1951, p. 324);
- a escarpa da Mesquita é anterior à plataforma calabriana, sendo contemporânea ou imediatamente anterior a um depósito de calhaus mal rolados, correlativo do degrau da Mesquita, do Pliocénico inferior a médio (Feio, 1951, p. 456);
- as ribeiras do Arade e Odelouca instalaram-se por epigenia, posteriormente à sedimentação calabriana, atravessando a depressão produzida pela fractura de São Marcos e o degrau de São Marcos, “encaixando-se no compartimento alto, abrindo vales fundíssimos e abandonando caminhos mais fáceis” (passagem de São Marcos para as depressões subsequentes da orla mesozóica) (Feio, 1951, p. 457);

A actividade neotectónica está bem evidenciada na zona de Boliquireime, onde se observa a estrutura em afloramento a afectar depósitos plio-quadernários, sugerindo que a falha SMQ é activa pelo menos no seu sector meridional. Para sul de Paderne (zona onde passa a Flexura do Algibre) parecem existir evidências morfológicas da passagem do acidente, com ligeira subida do bloco E, compatível com as estruturas observadas em Boliquireime que permitem considerar como o sector mais activo da falha SMQ o segmento entre a Flexura do Algibre e Quarteira (Dias, 2001).

As estruturas observadas, quer as falhas inversas, quer as normais, que afectam os depósitos plio-quadernários, são compatíveis com um regime tectónico de desligamento inverso com a compressão máxima ( $\sigma_1$ ) orientada NNW-SSE, e a compressão mínima ( $\sigma_3$ ) de direcção ENE-WSW, semelhante à compressão intermédia ( $\sigma_2$ ) que é vertical, segundo Kullberg et al. (1992), Terrinha (1998) e Dias (2001).

#### 4.5.2 Falha do Carcavai

A falha do Carcavai (falha de Loulé-São Brás in Terrinha, 1998) tem uma direcção geral NE-SW, (Figura 36) estendendo-se desde São Brás de Alportel, a NE, até Quarteira, a SW, numa extensão de cerca de 20 km (Dias, 2001).

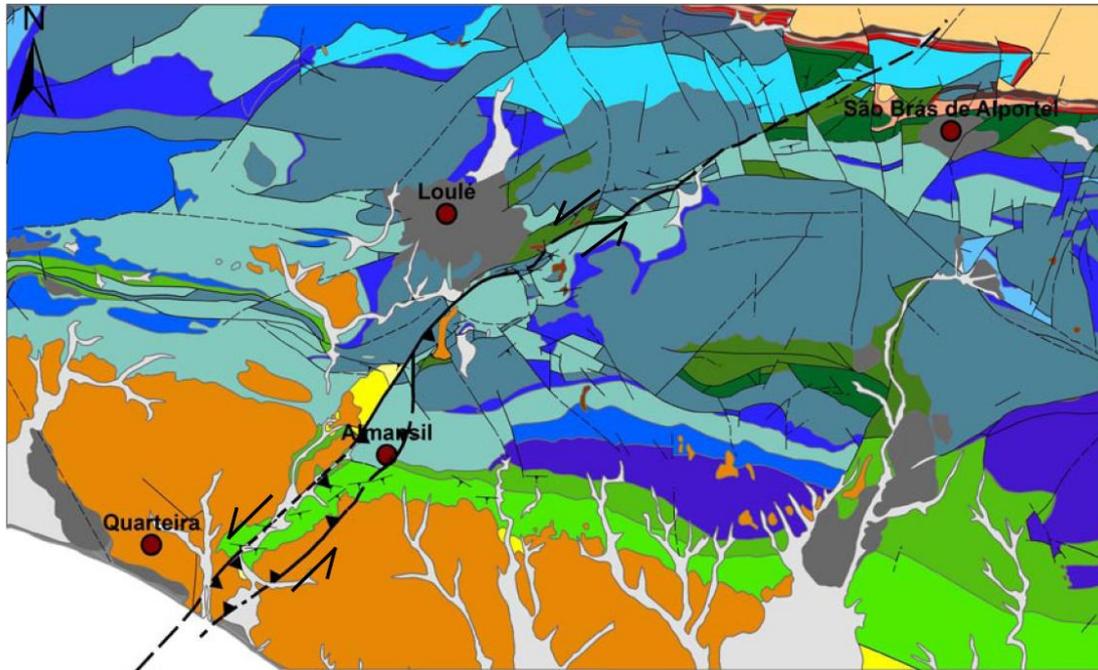


Figura 36. Traçado da falha do Carcavai. Adaptado de Ressureição (2009).

Segundo Terrinha (1998) a falha do Carcavai é limitada a S pela falha São Marcos-Quarteira e a N pelo soco varisco em território emerso e provavelmente tem continuidade para a região imersa (plataforma continental).

A cartografia geológica efectuada por Manuppella et al. (1992), sugere que a falha do Carcavai afecta o Miocénico superior e o Quaternário junto à falha SMQ. Os sedimentos do Miocénico superior nesta área (Barreiros Vermelhos), evidenciam pequenos cavalgamentos e as areias do Quaternário apresentam-se falhadas junto a Goncinha (Dias, 2001).

Segundo Dias (2001), a falha do Carcavai apresenta um traçado complexo, devido às várias reactivações que sofreu durante o Meso-Cenozóico, podendo-se diferenciar dois sectores distintos (Figura 36):

- sector entre São Brás de Alportel e o vértice geodésico Areeiro, constituído por uma zona de falha onde existem numerosos acidentes de direcção NE-SW a ENE-WSW, recortados por falhas, geralmente, de direcção NW-SE. Neste sector apenas existem algumas fracturas a afectar o Plio-Quaternário.

- sector entre vértice geodésico Areeiro e Quarteira, constituído por dois ramos de direcção NE-SW, que se juntam na zona do vértice Areeiro, a N e provavelmente no mar, a S de Quarteira. Estes ramos com direcções aproximadamente paralelas desenvolvem-se a W, segundo o eixo Almansil-Quarteira, e a E, segundo o eixo vértice geodésico de Almansil-Ferrarias-Praia do Trafal (adaptado de Dias, 2001).

A zona de Quarteira, que se encontra coberta pela formação Plio-Quaternária das Areias de Faro-Quarteira, é a área de convergência da falha do Carcavai com a falha SMQ (Figura 36). As falhas evidenciam deformação complexa, com várias orientações, sugerindo mais que um episódio de reactivação nas falhas do Carcavai e SMQ em regime tectónico de desligamento. Na praia do Forte Novo, na zona de passagem da falha do Carcavai, as Areias de Faro-Quarteira apresentam uma fracturação, NNW-SSE e NNE-SSW muito intensa e por vezes apresentam preenchimento argiloso.

Num trabalho recente, Ressureição (2009) sugere que a falha do Carcavai, possivelmente se prolonga para *offshore* e que actualmente corresponde a um desligamento esquerdo com componente de movimentação inversa, apresentando uma actividade neotectónica baixa com deformação recente no sector sul (junto ao litoral) a ser acomodada principalmente no ramo NW (Figura 36).

#### **4.6 Interpretação dos Dados das Campanhas CHEVRON74 e ESSO81**

Com o intuito de compreender as implicações da falha SMQ na morfologia actual e o seu desenvolvimento na região imersa, foi produzido o modelo batimétrico da área em estudo para efectuar a análise da morfologia do fundo marinho, e uma interpretação sismostratigráfica baseada nos perfis da indústria petrolífera CHEVRON74 e ESSO81 para proceder à análise morfo-tectónica.

##### **4.6.1 Análise Morfológica do Fundo Marinho**

Observa-se, entre Quarteira e Faro, um domínio litoral com uma largura de cerca de 6.5 km, até à batimétrica dos 30 metros de profundidade que diminui gradualmente de largura, para cerca de 3.5 km para Este em direcção ao Cabo de Santa Maria (Faro). Este domínio tem com uma inclinação aproximada de 0.2° na zona ao largo de Quarteira até à batimétrica dos 30 metros (Figura 37-A), que vai aumentando para o cabo de Santa Maria (Faro) onde o valor passa para os cerca de 0.3° (Figura 37-B).

Junto da batimétrica dos 30 metros, ao largo de Quarteira (Figura 37-A), verifica-se uma ruptura de pendor diminuindo a inclinação para cerca de 0.08°-0.1°, adelgaçando para cerca de 6 km na zona do Cabo de Santa Maria até à batimétrica dos 150 metros. A inclinação do fundo marinho aumenta abruptamente junto da batimétrica dos 60 metros (Figura 37-C) para cerca de 0.5° diminuindo

novamente para sul, para valores próximos de 0.2º até se atingir o bordo da plataforma (-150 m). O aumento de pendora acentua-se novamente em direcção do Cabo de Santa Maria (Figura 37-D) onde a inclinação se cifra em cerca de 1.8º, diminuindo igualmente para sul, para valores próximos de 0.3º até à batimétrica dos 150 m. No entanto a variação de pendora entre Quarteira e Faro não é gradual, verificando-se que na zona intermédia (Figura 37-E) a inclinação média é menor, cerca de 0.3º, chegando a ser nula na direcção SE, originando um pequeno esporão mostrado na Figura 37-F.

Junto da batimétrica dos 150 metros, a inclinação varia de modo acentuado para valores médios de cerca de 7º-8º, marcando a passagem para o domínio de talude continental. A rampa do talude regista uma atenuação de pendora na sua zona média, entre as batimétricas dos 250 e 350 m, para valores médios de cerca de 3.5º, voltando a ser mais inclinado na sua parte final, entre os -450 e os -650 metros, com valores entre 5.5º-6.5º.

No sopé da plataforma continental observa-se um troço de cerca de 40 km, com cerca de 3 km de largura, a Fossa Álvares Cabral, morfologia cuja origem está identificada como resultante da dinâmica sedimentar do ramo setentrional da corrente superficial da *MOW (Mediterranean Outflow Water)* (Hernandez-Molina et al., 2006).

A Fossa Diogo Cão (Mougenot, 1988, Hernandez-Molina et al., 2006), com orientação NW-SE (Figura 37) apresenta-se como um vale assimétrico com cerca de 25 km de extensão longitudinal e uma largura variável entre 5,8 km a norte e 10 km a sul. No extremo NW o vale vai fechando, sendo gradualmente atenuado a partir da batimétrica dos 850 metros, até fechar completamente cerca da batimétrica dos 750 m (Figura 37-G), sendo limitado a SE pelo Banco de Guadalquivir. A vertente NE, sempre mais elevada e mais inclinada que a vertente SW (mesmo na sua parte mais meridional onde a diferença de cota é menor), prolonga-se para NW até coalescer com a Fossa Álvares Cabral, formando um rebordo que limita uma superfície suave e elevada a nordeste, correspondente à parte frontal do lobo progradante (*drift*) do contornito de Faro (Roque, 2007). Este rebordo, apresenta uma direcção geral NW-SE, com um comprimento total de cerca de 50 km, localiza-se na continuação da linha de costa de direcção NW-SE da cidade de Quarteira que, por sua vez, é paralela ao traço da falha SMQ.

Assinala-se ainda a existência cicatriz de escorregamento gravítico localizado na zona média da vertente NE (Figura 37-H e Figura 38-C2) em frente à qual, na vertente oposta se localiza uma depressão elíptica (Figura 37-I e Figura 38-C3), com orientação NE-SW cujo eixo menor mede cerca de 1.5 km e eixo maior cerca de 2 km.

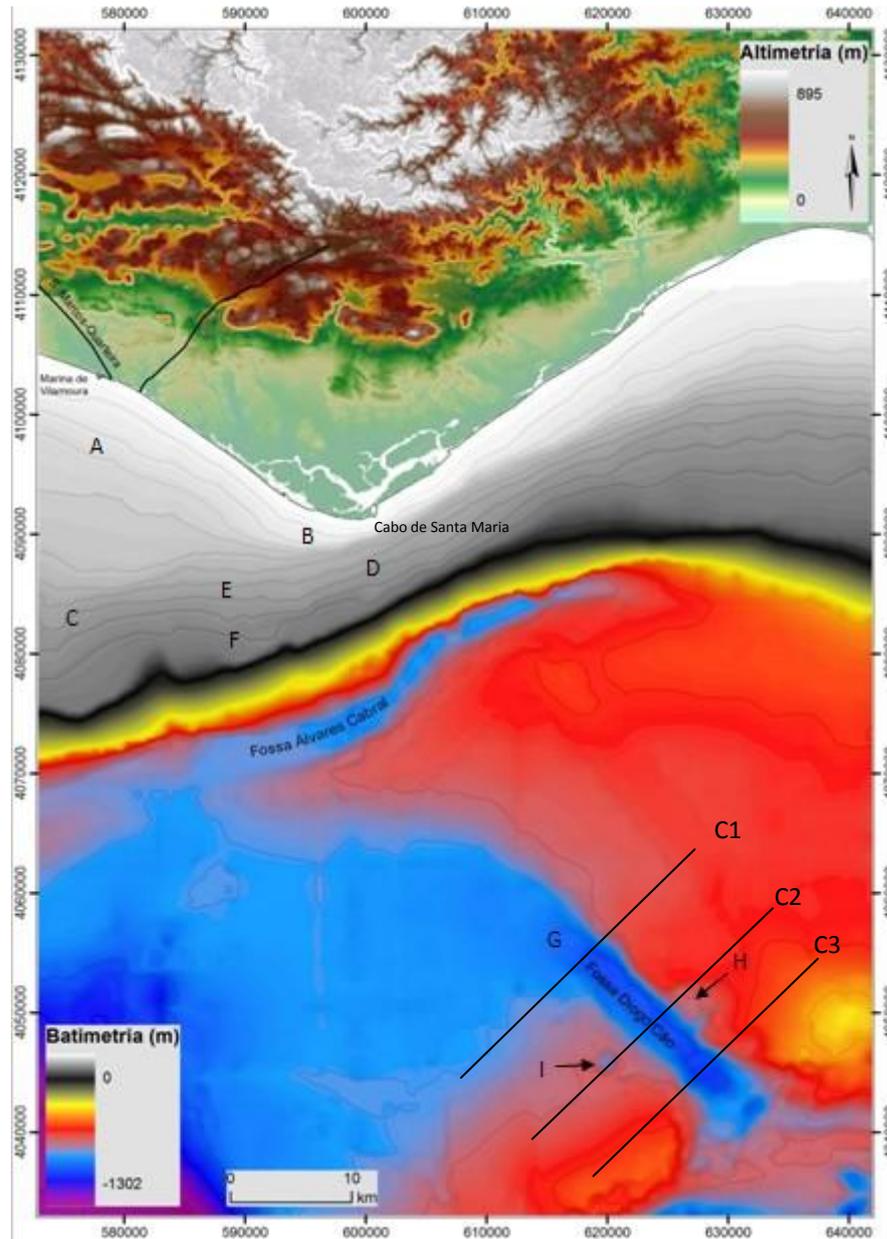
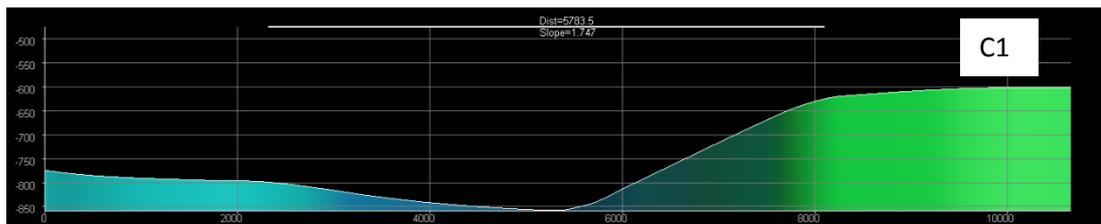


Figura 37. Modelo batimétrico efectuado com os dados da indústria petrolífera, onde são indicadas a características morfológicas significativas.



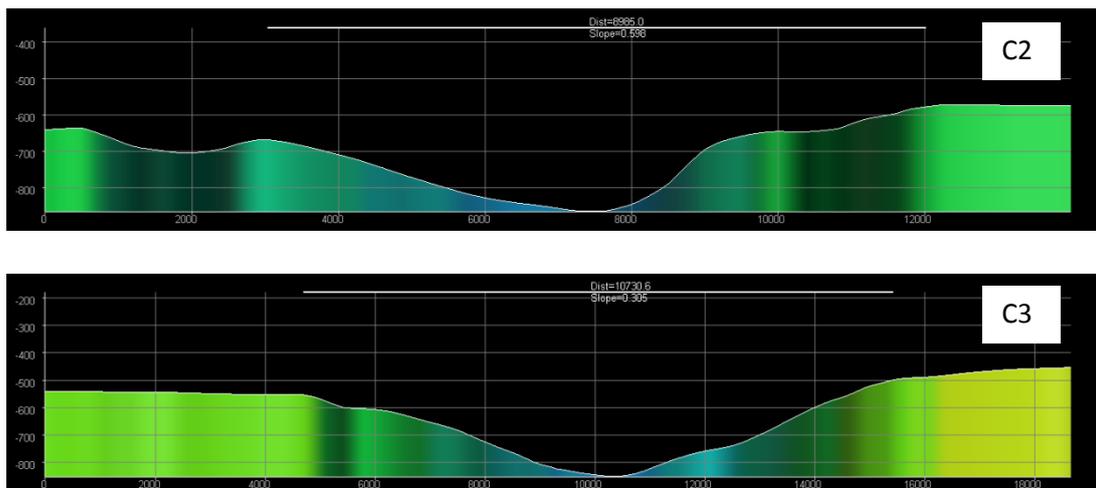


Figura 38. Perfis (x20) da Fossa Diogo Cão. O posicionamento está indicado na figura 37.

#### 4.6.2 Análise Morfo-Tectónica

Com base na interpretação dos perfis sísmicos da indústria dos petróleos (Figura 17), efectuou-se a cartografia estrutural da área imersa, em estudo, correspondente à zona de desenvolvimento da falha SMQ e sua envolvente. Com base na interpretação efectuada, descrevem-se as implicações que as estruturas tectónicas identificadas têm na morfologia do fundo marinho actual e propõe-se o traçado geral da falha SMQ para região imersa. Este é contudo um trabalho preliminar que deverá ser completado com a cartografia dos horizontes sismostratigráficos que concorrerá para um conhecimento mais profundo e que completará a cartografia aqui proposta.

As estruturas cartografadas são apresentadas sobre o modelo batimétrico do fundo marinho (Figura 39), indicando-se quais as idades correspondentes para a actividade tectónica inferida, que foram determinadas com base no modelo sismo-crono-estratigráfico (Figura 33) proposto por Roque (2007).

As estruturas com direcção E-W a NE-SW correspondem a falhas com movimentação inversa durante o Miocénico e o Plio-Quaternário e dispõem-se de ambos os lados da falha SMQ.

Das estruturas N-S salienta-se a presente na zona NW do mapa da Figura 39 que apresenta uma movimentação normal no Jurássico e inversa no Miocénico. Esta poderá corresponder à continuação da falha Areias de Almansil, descrita por Dias (2001) na região emersa, onde o autor sugere que esta foi sujeita a um regime tectónico compressivo no Plio-Quaternário.

As estruturas com orientação NW-SE identificadas na área de estudo correspondem ao desenvolvimento da Falha SMQ na região imersa. A actividade mais recente da falha é observada no

seu sector meridional (Figura 39). Nesta zona a componente de movimentação normal, com idade miocénica, é claramente identificada, enquanto a componente inversa, de idade plio-quaternária, é apenas identificada num segmento menor. A componente de movimento horizontal direito plio-quaternário (Terrinha, 1998; Dias, 2001) descrita na região emersa não é identificável.

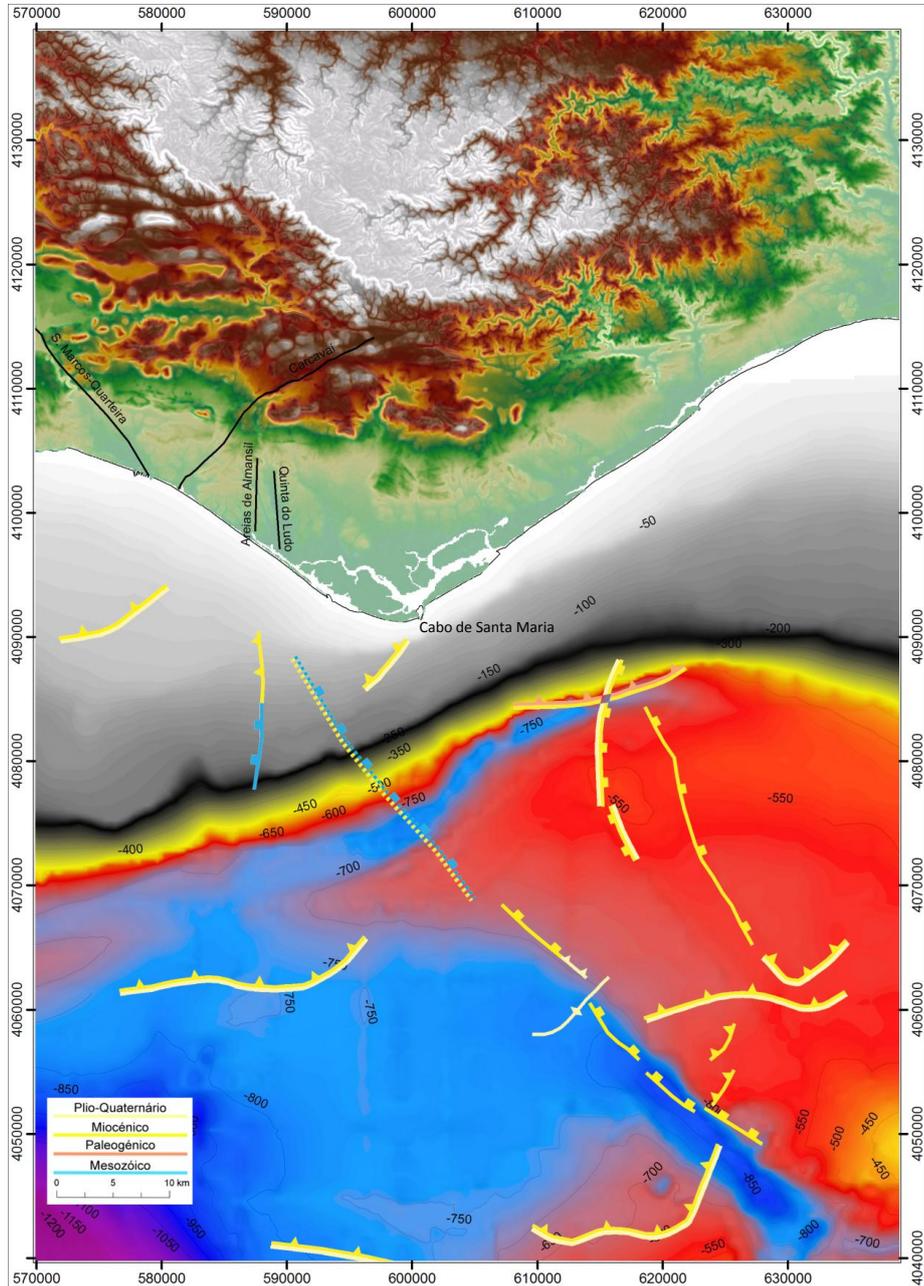


Figura 39. Mapa morfo-tectónico efectuado com os dados da indústria petrolífera.

#### 4.7 Interpretação dos Dados da Campanha ERSTA\_SANDEX

Com o intuito de compreender qual a zona de passagem da falha SMQ da região emersa para a região imersa, o seu desenvolvimento e a sua articulação com a falha de Carcavai nessa mesma região, foi planeada uma campanha de aquisição de perfis sísmicos de reflexão que compreendia perfis de orientação NE-SW a sul do cabo de Sta. Maria. Infelizmente, problemas técnicos e o estado do mar não permitiram a realização destes últimos perfis, tendo-se a zona de aquisição de dados geofísicos ERSTA\_SANDEX, cujos dados são apresentados no capítulo da metodologia, restringido à representada no mapa da Figura 40.

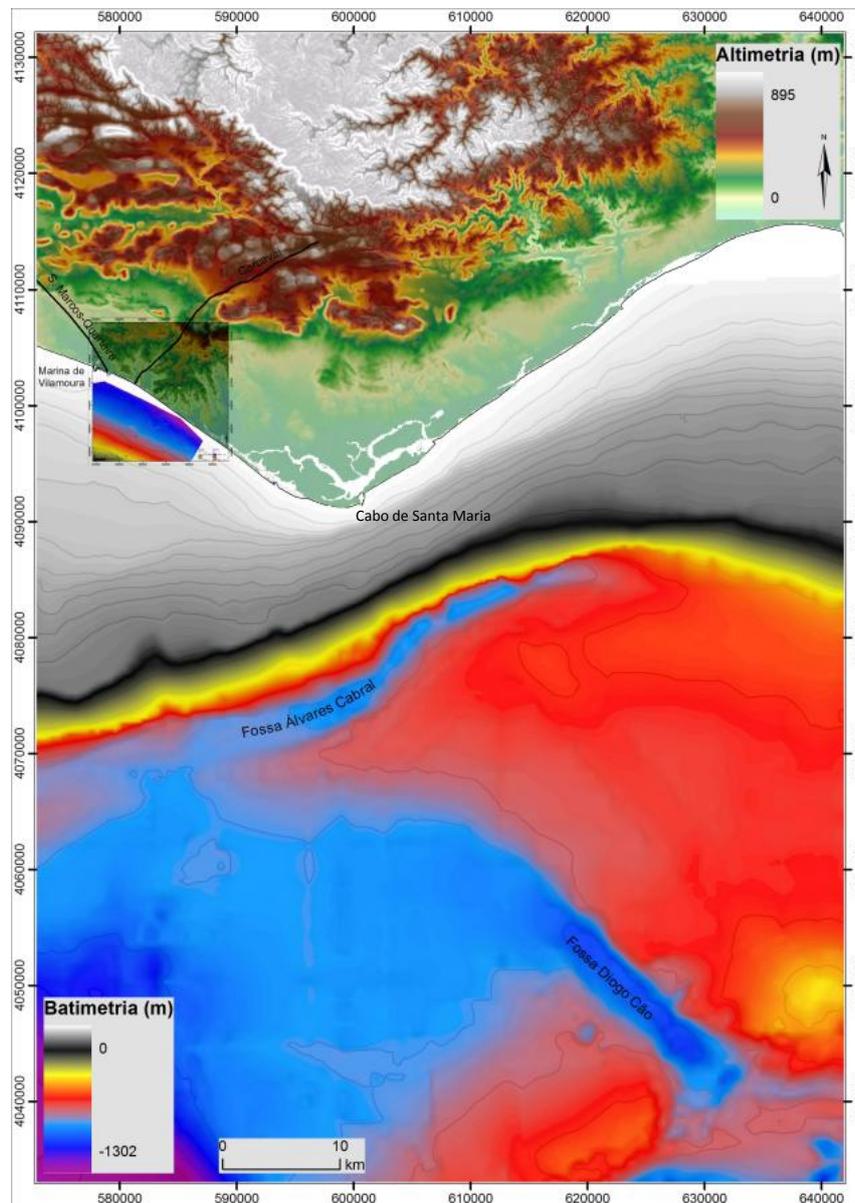


Figura 40. Enquadramento da área de levantamento da campanha ERSTA\_SANDEX.

#### 4.7.1 Análise Morfológica do Fundo Marinho

O modelo batimétrico obtido com base na reflexão do fundo marinho nos dados da campanha ERSTA\_SANDEX (Figura 19), mostram uma superfície regular com inclinação média de cerca de 0.3º para *offshore*.

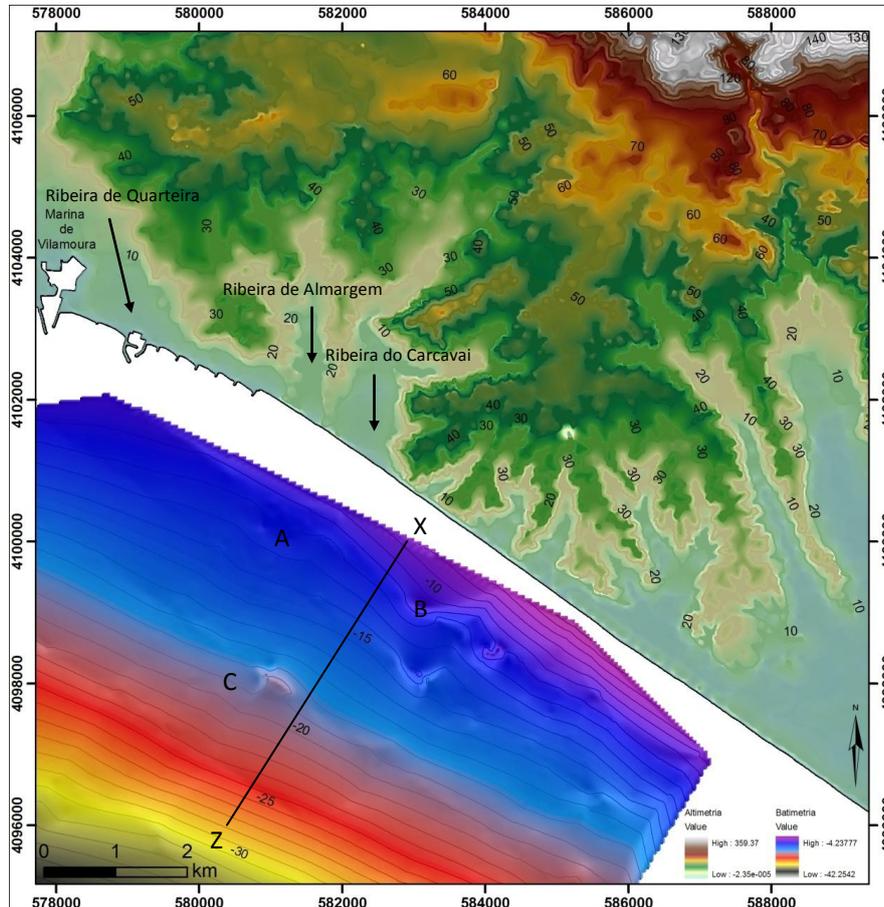


Figura 41. Modelo batimétrico da área de estudo ERSTA\_SANDEX onde são indicadas as características morfológicas significativas.

Uma análise mais detalhada do relevo do fundo marinho permite identificar algumas particularidades morfológicas.

A oeste do perfil X-Z, existe um pequeno esporão marcado pela batimetria dos 12 metros (Figura 41-A), que limita um vale, situado a ocidente do mesmo, com orientação aproximadamente NE-SW que se desenvolve até à batimetria dos 16 metros. Este vale localiza-se na continuação de outro bem desenvolvido em terra.

No sector central, observa-se um fundo marinho com um perfil onde se verificam duas quebras de declive (Figura 41-Perfil X-Z). A primeira é marcada na batimetria dos 15 metros notando-se uma

quebra de inclinação de 0.35º-0.4º para valores aproximados de 0.22º-0.25º e a segunda, marcada pela batimétrica dos 25 m (Figura 42) onde se verifica um aumento da inclinação para valores na ordem dos para cerca de 0.3º-0.35º. Esta última variação de declive é constante ao longo da referida batimétrica, na área de estudo.

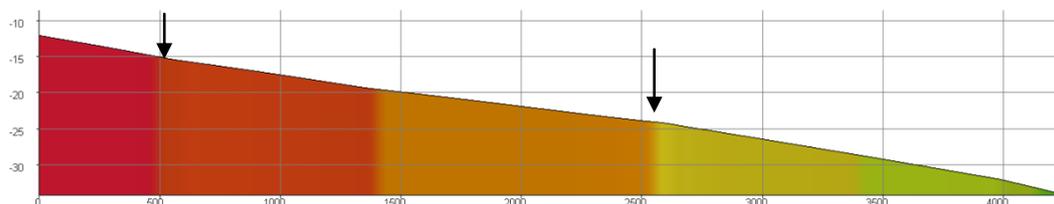


Figura 42. Perfil X-Z (x20), onde estão identificadas as quebras de declive.

A Este do perfil X-Z, existe um vale com direcção NE-SW (Figura 41-B), limitado por um esporão a NW, que condiciona o seu encaixe e a sua direcção. Esta muda para N-S para o largo, sendo o seu curso condicionado pela existência de outra zona elevada situada a W. Este vale deixa de ter expressão morfológica junto da batimétrica dos 16 metros.

Assinala-se ainda, a presença de uma depressão (Figura 41-C), cuja origem se deve à acção antrópica, fruto da extracção industrial de areias.

#### **4.7.2 Sismostratigrafia dos Dados da Campanha ERSTA\_SANDEX**

A partir da análise dos perfis sísmicos adquiridos no decurso da campanha ERSTA-SANDEX foi efectuada a interpretação sismostratigráfica dos mesmos, não tendo sido possível calibrá-los cronostratigraficamente devido à inexistência de sondagens na área. Partindo desta limitação, optou-se por produzir, a partir da interpretação abaixo descrita, uma coluna sismostratigráfica sobre a qual será, posteriormente, efectuada uma correlação com aos dados geológicos existentes, propondo-se então, um modelo sismo-cronostratigráfico.

##### **4.7.2.1 Caracterização dos Horizontes Sísmicos**

Na área de estudo correspondente à campanha ERSTA-SANDEX, foram identificados 5 horizontes sísmicos (Figuras A1 e A2 do anexo 1), correspondentes a descontinuidades geológicas que separam unidades sismostratigráficas, aos quais se atribuiu uma nomenclatura seguindo o critério de nomeação do mais recente para o mais antigo. São eles: Horizonte S1; Horizonte S1A (sendo este de idade equivalente a S1); Horizonte S2; Horizonte S3. Foi ainda considerado um horizonte-guia que se designa por Horizonte HR.

**Horizonte S1:** Este horizonte é caracterizado por uma reflexão com amplitude forte e elevada continuidade lateral, traduzindo um assinalável contraste de impedância acústica. Trata-se duma descontinuidade erosiva caracterizada por trincar sistematicamente as reflexões subjacentes e sobre a qual assentam as reflexões das unidades sobrejacentes, quer paralelamente quer em *downlap*.

**Horizonte S1A:** Este horizonte é caracterizado por uma reflexão com amplitude forte e com boa continuidade lateral, traduzindo um assinalável contraste de impedância acústica, embora localmente apresente continuidade e amplitude moderadas. À semelhança do anterior, trata-se duma descontinuidade erosiva que trunca as reflexões das unidades subjacentes e, sobre a qual, assentam em *onlap* ou *downlap* as reflexões da unidade sobrejacente.

**Horizonte S2:** Este horizonte é caracterizado por uma reflexão com amplitude forte e com boa continuidade lateral, traduzindo um assinalável contraste de impedância acústica.

**Horizonte S3:** Este horizonte é caracterizado por uma reflexão com uma amplitude moderada com boa continuidade lateral, embora localmente apresente alguma descontinuidade, traduzindo um moderado contraste de impedância acústica. Trata-se duma superfície de *downlap* da unidade sobrejacente.

**Horizonte HR:** Este horizonte é caracterizado por uma reflexão forte com boa amplitude e boa continuidade lateral, traduzindo um bom contraste de impedância acústica. A sua identificação serviu horizonte guia na definição do horizonte S3, este de menor continuidade mas constituindo a base duma unidade sismostratigráfica.

#### **4.7.2.2 Caracterização das Unidades Sísmicas**

O reconhecimento dos horizontes acima descritos permitiu a individualização de quatro unidades sísmicas (Figuras A1 e A2 do anexo 1) nomeadas de acordo com o critério da nomenclatura utilizado na caracterização dos horizontes, isto é da mais recente para a mais antiga. Assim as unidades designaram-se U1, U1A (sendo esta de idade equivalente a U1), U2 e U4 e apresentam as características que abaixo se descrevem:

**Unidade U1:** Esta unidade é limitada a tecto pelo fundo do mar (FM) e a muro pelo horizonte S1. As reflexões internas apresentam uma boa amplitude e uma boa continuidade lateral. A sua configuração interna é estratificada, agradável e a sua forma geral é tabular. As reflexões dispõem-se, predominantemente, em *onlap* em direcção a terra.

**Unidade U1A:** Esta unidade é limitada a tecto pelo fundo do mar (FM) e a muro pelo horizonte S1A. As reflexões internas apresentam-se descontínuas e irregulares por vezes com direcções e

inclinações opostas. A sua forma varia ao longo do seu desenvolvimento espacial, alternando entre formas monticulares, lenticulares e em preenchimento de canal. As reflexões dispõem-se de forma irregular.

**Unidade U2:** Esta unidade é maioritariamente limitada a tecto pelo horizonte S1 e em algumas zonas pelo fundo do mar (FM) sendo a muro limitada pelo horizonte S2. As reflexões internas apresentam boa continuidade lateral e uma boa amplitude, sendo a sua configuração interna sub-paralela. A sua forma geral é lenticular. As reflexões internas terminam a topo em *toplap* e na base em *downlap*.

**Unidade U3:** Esta unidade é limitada a tecto por diferentes horizontes. É limitada pelos horizontes S1, S1A, S2 e fundo do mar (FM) consoante a sua localização. As reflexões internas denotam uma variabilidade assinalável, alternando entre reflexões com boa continuidade lateral e boa amplitude com outras de baixa amplitude com fácies transparente. A configuração interna das reflexões é progradante sigmoidal a sigmoidal-oblíqua. A sua forma geral é em cunha. As reflexões dispõem-se em *toplap* relativamente aos horizontes que a limitam a tecto e em *downlap* no que respeita ao seu limite a muro.

**Unidade U4:** Esta unidade é limitada a tecto por S3. As reflexões internas apresentam uma boa amplitude e uma boa continuidade lateral. A sua configuração interna é plano-paralela, e a sua forma geral é tabular. Com os dados disponíveis não é possível definir a sua base.

#### 4.7.2.3 Coluna Sismostratigráfica

A partir da definição das unidades sísmicas é proposta, conforme ilustrado na Figura 43, a coluna sismostratigráfica que mostra a idade relativa das mesmas. Note-se que a escala vertical da mesma não é real, visto existir uma grande variabilidade na espessura das unidades interpretadas, que não foi considerada.

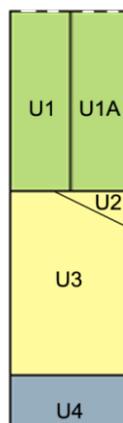


Figura 43. Coluna sismostratigráfica das unidades interpretadas.

## 4.8 Mapas de Isócronas

Depois de efectuada a interpretação sismostratigráfica os dados obtidos são importados para ambiente SIG para serem alvo das das operações de interpolação espacial descritas no capítulo da metodologia. As operações realizadas conduziram à produção de mapas de isócronas de superfície (horizontes), que representam pontos de igual valor de TWT, e de mapas de espessuras medidas em segundos de tempo duplo (TWT), na vertical entre dois pontos de duas descontinuidades. É de referir que normalmente existe tendência para confundir o conceito de isócrona com outros dois comumente utilizados para o cálculo da espessura: isópacas que correspondem a valores iguais de *True Stratigraphic Thickness* (TST) e isócoras que correspondem a valores iguais de *True Vertical Thickness* (TVT). Estes só devem ser utilizados quando se conhecem as velocidades de propagação do meio, facto que permite a conversão de unidade de tempo para unidade métrica.

### 4.8.1 Mapas de Isócronas dos Horizontes

#### 4.8.1.1 Horizonte S1

O mapa de isócronas do horizonte S1 (Figura 44), correspondente à base da unidade S1, mostra uma morfologia suave, com uma inclinação média de  $0.3^\circ$  para SW, que é abruptamente afectada uma forte quebra de declive que se inicia na isócrona dos 45 ms e toma valores máximos na isócrona dos 35 ms, passando a inclinação média a ter, ao longo da mesma, valores de  $1.5^\circ$ . Note-se ainda que existe, na zona oriental do mapa (Figura 44-A), uma área onde a inclinação é máxima, com valores na ordem do  $3^\circ$ , que perturba o alinhamento da quebra de declive acima descrita.

Outro facto que relevante, apesar da cobertura dos dados ser escassa, é a existência de um vale (Figura 44-B), na zona mais oriental do levantamento, com orientação NE-SW que interrompe a linha de quebra de declive da isócrona dos 35 ms.

Assinala-se, finalmente a inflexão das isócronas dos 55 ms e 60 ms (Figura 44-C) que quebram a tendência geral de inclinação da superfície.

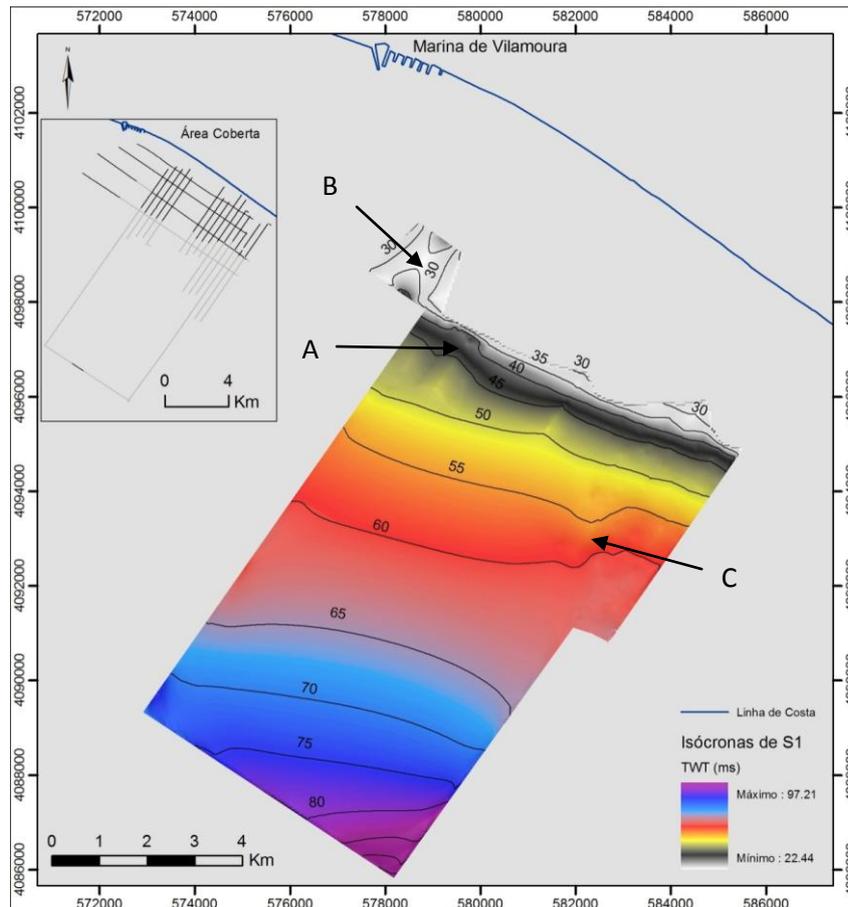


Figura 44. Mapa de isócronas do horizonte S1.

#### 4.8.1.2 Horizonte S1A

O mapa de isócronas do horizonte S1A (Figura 45), correspondente à base da unidade U1A, revela a existência de uma zona deprimida, sinuosa, com direcção geral NW-SE, com tendência a aprofundar-se para SE, com vales sub-perpendiculares, inclinando para o eixo da depressão maior. Esta depressão, paralela à actual linha de costa, pode interpretar-se como um antigo vale cujo sentido de escoamento foi genericamente efectuado para SE, ao qual se associavam drenagens periféricas para o seu interior.

Assim, na zona ocidental do mapa observa-se a zona mais elevada do eixo desta depressão NW-SE (Figura 45-A), com cota máxima a cerca de 30 ms, aprofundando-se e alargando-se para SE (cerca de 2 km) até atingir o depocentro no interior da isócrona dos 40 ms.

De notar que este depocentro tem orientação NE-SW para onde confluem dois vales de menor dimensão (Figura 45-B e C), que drenam de norte, separados da área oriental por zona elevada (Figura 45-D). No seguimento desta zona para E, a rede de drenagem diminui de largura e sofre uma inflexão para sul encaixando-se entre duas elevações, uma mais elevada perto do litoral actual

(isócrona dos 25 ms) e outra menos elevada a SE desta (isócrona dos 30 ms). Depois desta inflexão a direcção volta a ser NW-SE. Note-se que no entanto este prolongamento não é contínuo existindo uma barreira topográfica entre as duas áreas.

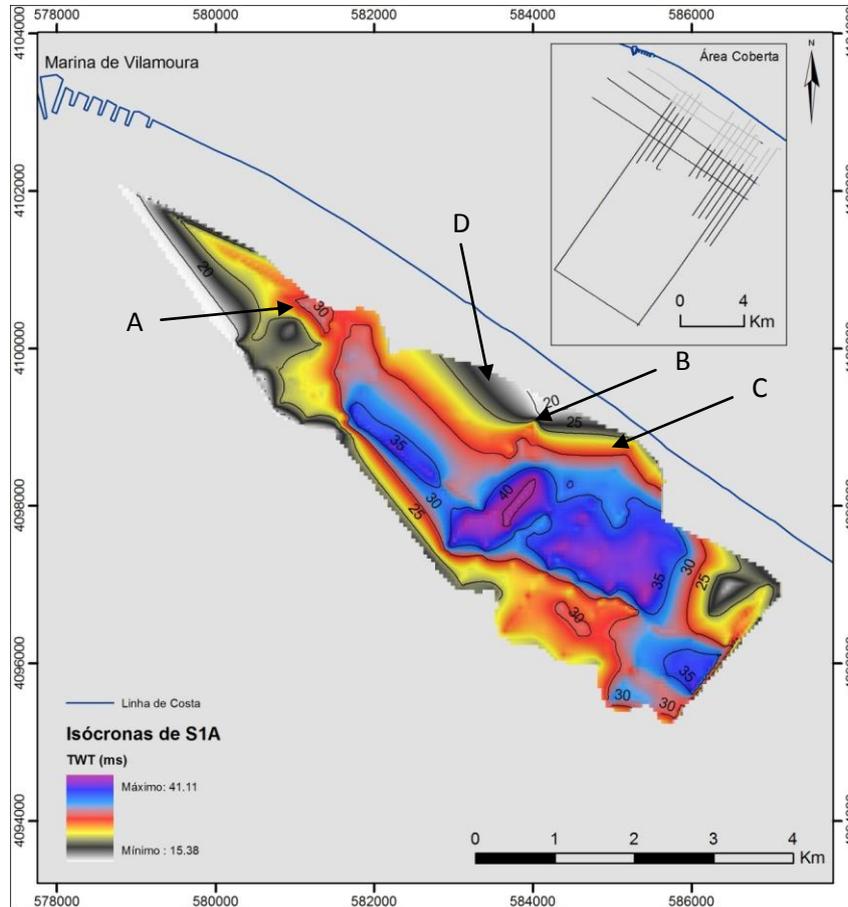


Figura 45. Mapa de isócronas do horizonte S1A.

#### 4.8.1.3 Horizonte S2

A superfície S2 encontra-se representada numa área restrita. O mapa de isócronas do horizonte S2 (Figura 46), correspondente à base da unidade U2, mostra uma depressão côncava, aproximadamente quadrangular, na qual entronca um vale com eixo maior orientado NE-SW. Este é assimétrico sendo a vertente SE mais inclinada (15°) que a vertente NE (3°), conforme é visível na Figura 46. O conjunto geral sugere uma vale largo inclinando para SE.

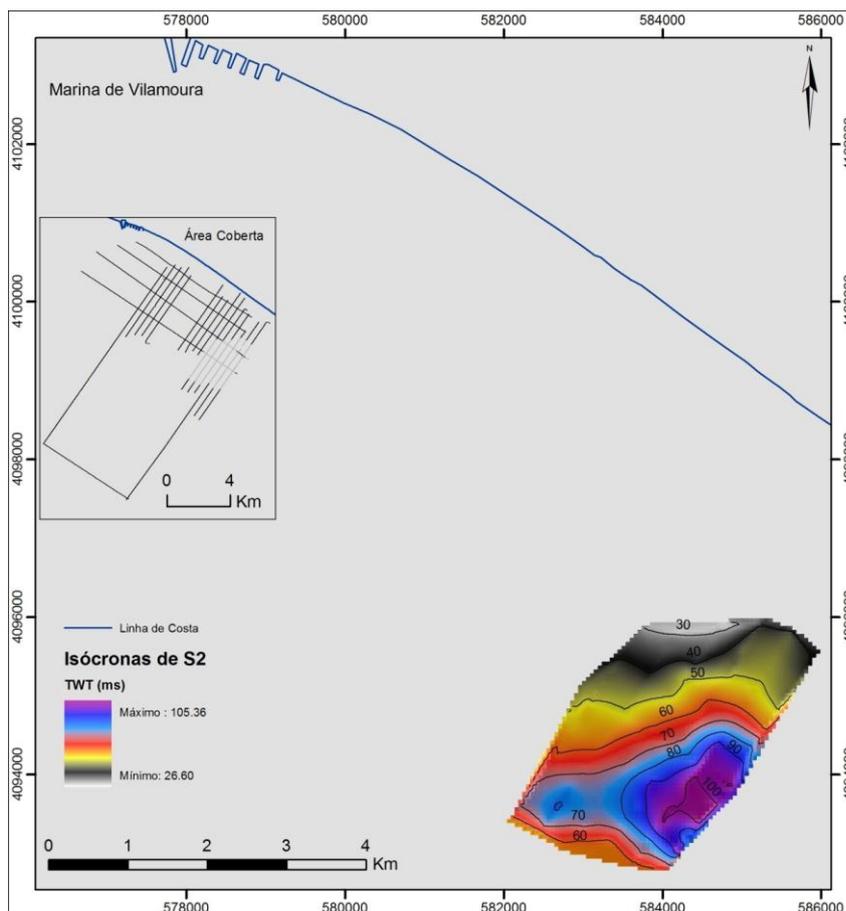


Figura 46. Mapa de isócronas do horizonte S2.

#### 4.8.1.4 Horizonte S3

O mapa de isócronas do horizonte S3 (Figura 47), correspondente à base da unidade U3, prograda sobre a unidade S2, constituída por reflexões plano-paralelas. O mapa mostra uma superfície que pode ser dividida em dois domínios distintos. No domínio oriental esta apresenta uma geometria plana com inclinação média de  $1.5^\circ$  para sul que se atenua próximo do litoral.

No domínio ocidental observa-se uma forte perturbação na geometria da superfície, correspondente a uma superfície sedimentar dobrada em sinclinal aberto e anticlinal mais apertado, associados a uma falha inversa de direcção e inclinação NE-SW/SE. O sinclinal tem uma orientação NE-SW, com flancos assimétricos com terminação periclinal a NE que sofrem uma inflexão para E na região mais meridional. Como se pode observar na Figura 47 o flanco SE do sinclinal apresenta valores de inclinação que variam entre  $4^\circ$  a norte e  $5^\circ$  a sul (na zona de inflexão para E), registando uma inclinação máxima de  $12^\circ$  na zona intermédia. O flanco NW apresenta valores de inclinação mais baixos variando entre  $2-3^\circ$  de inclinação que aumenta para  $4^\circ$  na zona de inflexão do vale para E.

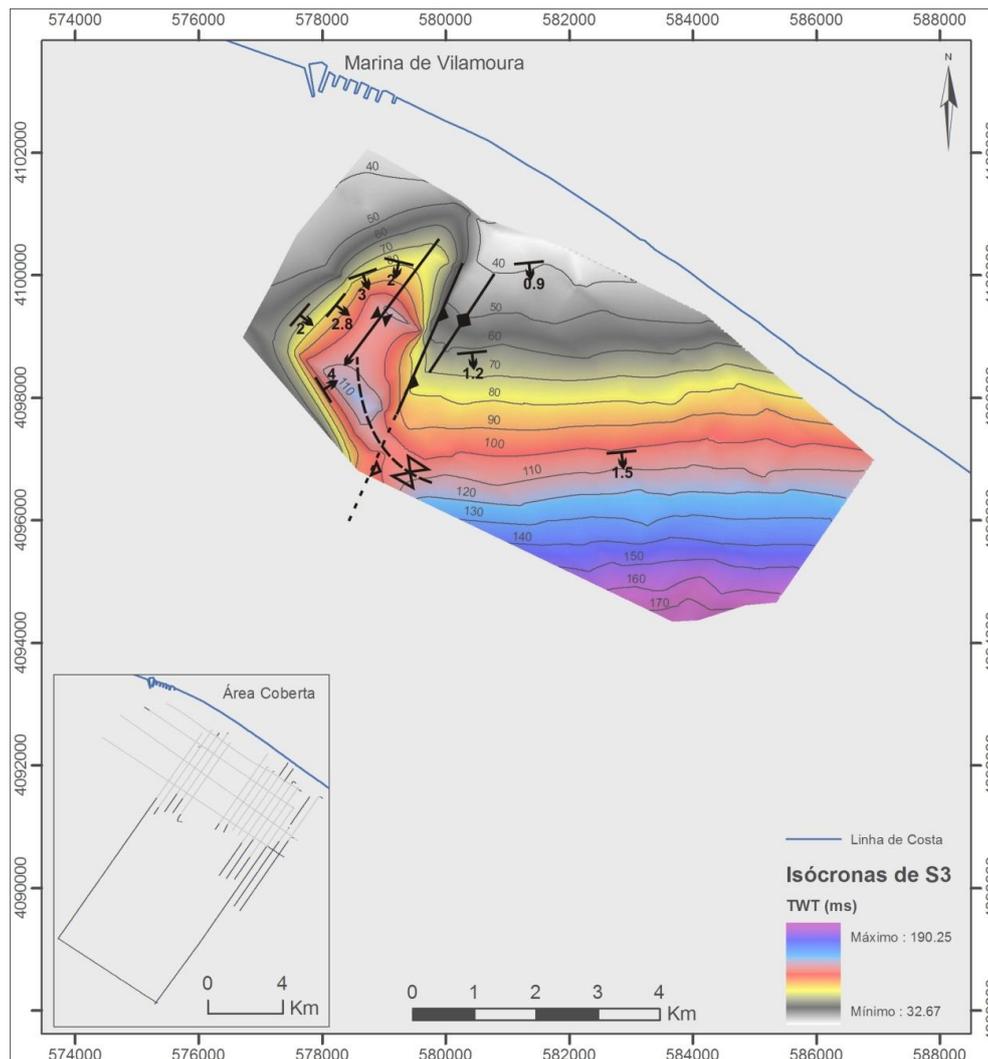


Figura 47. Mapa de isócronas do horizonte S3, onde está implantada a análise estrutural.

## 4.9 Mapas de Isócronas das Unidades

Conforme referido anteriormente estes mapas referem-se às espessuras das unidades identificadas medidas em ms (*TWT*).

### 4.9.1 Unidade U1

O mapa de isócronas da unidade U1 (Figura 48) resulta do cálculo da diferença de profundidade, em milissegundos *TWT*, entre o fundo do mar (FM) e o horizonte S1.

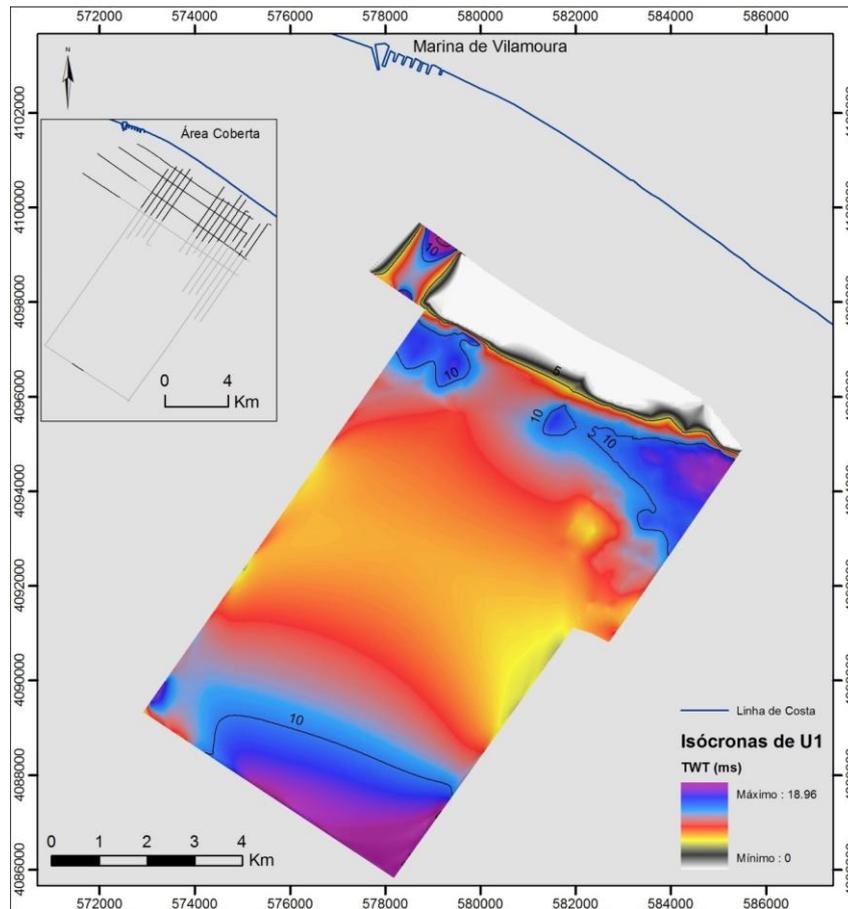


Figura 48. Mapa de isócronas da unidade U1.

Analisando o mapa, verifica-se que, exceção feita à subárea rectangular menor localizada a NW, a unidade U1 diminui de espessura até desaparecer em direcção ao bordo NE, paralelo à linha de costa. Na subárea a NW verifica-se um espessamento de direcção NE-SW com um depocentro de 10 ms na área mais setentrional. Na zona contígua, localizada a sul deste alinhamento, observa-se um espessamento da unidade para valores na ordem 10 ms, o qual é mais pronunciado na zona SE que na zona NW. Note-se que a diminuição de espessura verificada entre as duas zonas indicadas, que embora não seja completamente fidedigna, pois nesta zona a cobertura de dados é menor, representa uma tendência verdadeira.

#### 4.9.2 Unidade U1A

O mapa de isócronas da unidade U1A (Figura 49) resulta do cálculo da diferença de profundidade, em milissegundos *TWT*, entre o fundo do mar (FM) e o horizonte S1A. Analisando o mapa, verifica-se que o padrão de distribuição da espessura reproduz essencialmente o da profundidade (Figura 49). A unidade U1A apresenta um depocentro alongado e circunscrito, de orientação geral paralela à linha de costa, estreito e rectilíneo a ocidente e largo e irregular a oriente, sendo estas duas zonas

separadas por um estrangulamento com redução de espessura da unidade. Este estrangulamento limita o bordo de direcção NE-SW do depocentro localizado a SE e coincide com um alto estrutural responsável pela anomalia batimétrica positiva no fundo do mar visível na Figura 49. A zona depocentral é limitada a SE por um alto estrutural.

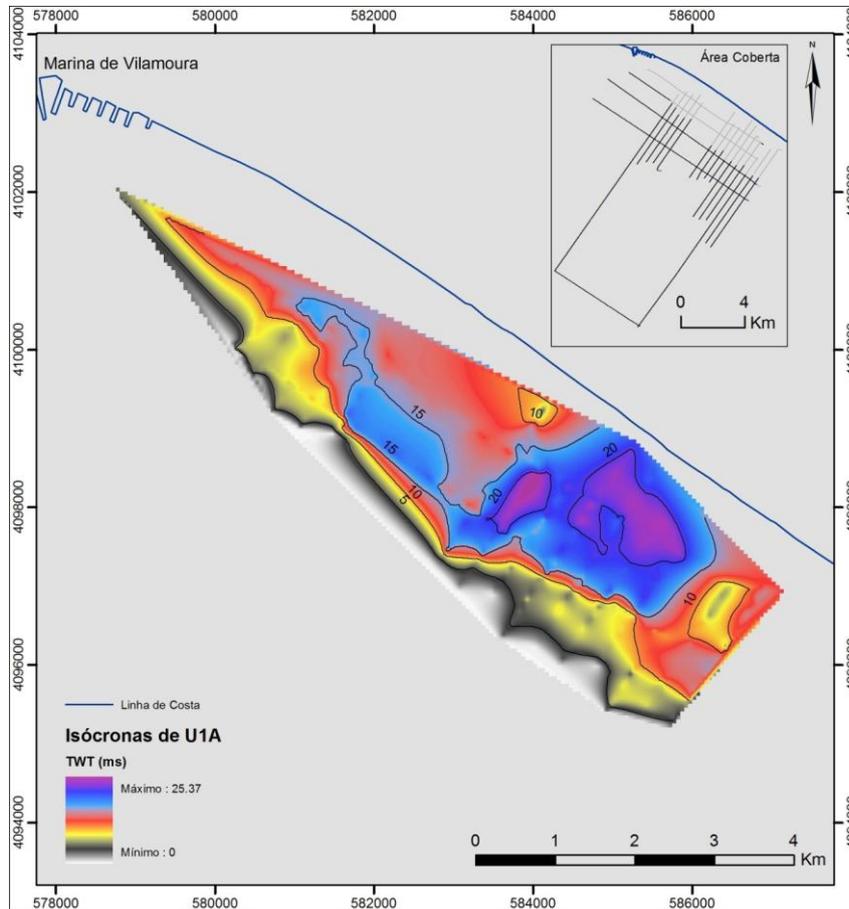


Figura 49. Mapa de isócronas da unidade U1A.

### 4.9.3 Unidade U2

O mapa de isócronas da unidade U2 (Figura 50) resulta do cálculo da diferença de profundidade, em milissegundos *TWT*, entre os horizontes S1 e S1A com o horizonte S2. Analisando o mapa de isócronas verifica-se que este reproduz o padrão do mapa de isócronas do Horizonte S2, com uma região circunscrita de espessura máxima cerca de 53 ms e dois depocentros menores.

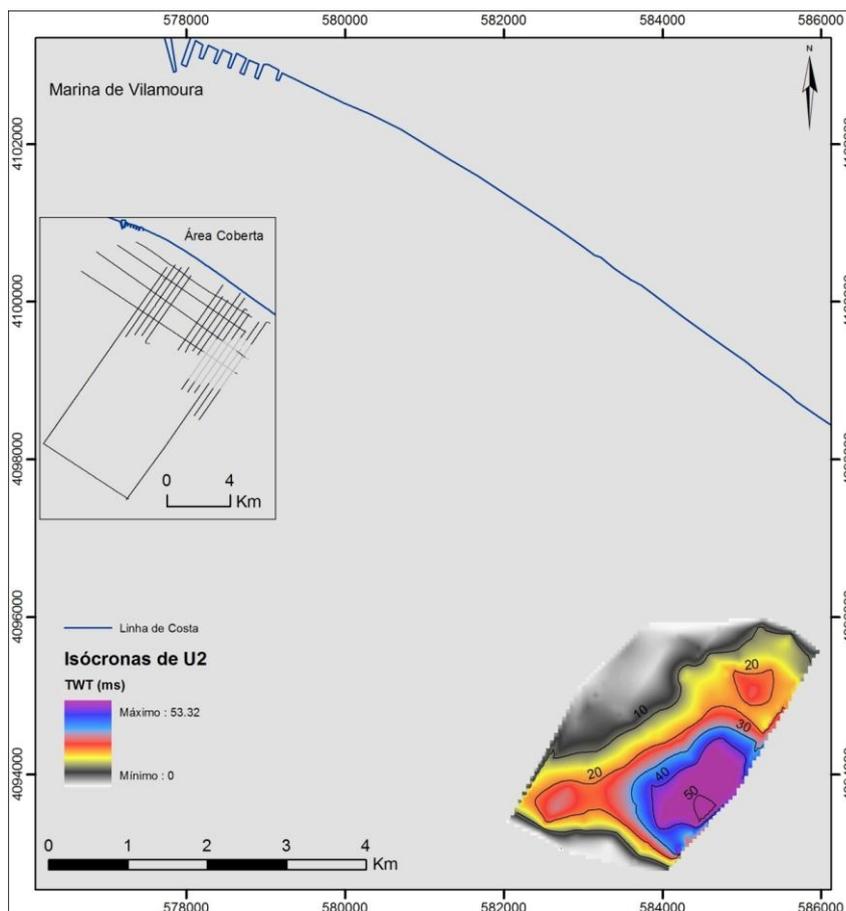


Figura 50. Mapa de isócronas da unidade U2.

#### 4.9.4 Unidade 3

O mapa de isócronas da unidade U3 (Figura 51), resulta do cálculo da diferença de profundidade, em milissegundos *TWT*, entre os horizontes S1, S1A, S2 e fundo do mar (FM) com o horizonte S3. Observando o mapa, verifica-se que o padrão de espessura desta unidade reproduz parcialmente o do mapa de isócronas do Horizonte S3 (Figura 47) e atinge o valor máximo de espessura, cerca de 110 ms, no extremo SE da área levantada. O depocentro localizado a NW corresponde ao sinclinal que afecta a unidade U3. A metade SE do mapa apresenta dois depocentros periféricos no limite SE que não se observam na variação da profundidade do Horizonte S3 (Figura 47). Por outro lado, o arqueamento das isócronas de U3 a norte destes dois depocentros, zona não afectada por dobramento, sugere a existência de uma paleogeografia da linha de costa substancialmente diferente nesta zona da área de estudo em relação à actual ou mesmo em relação à existente na altura da deposição de U1 e U2.

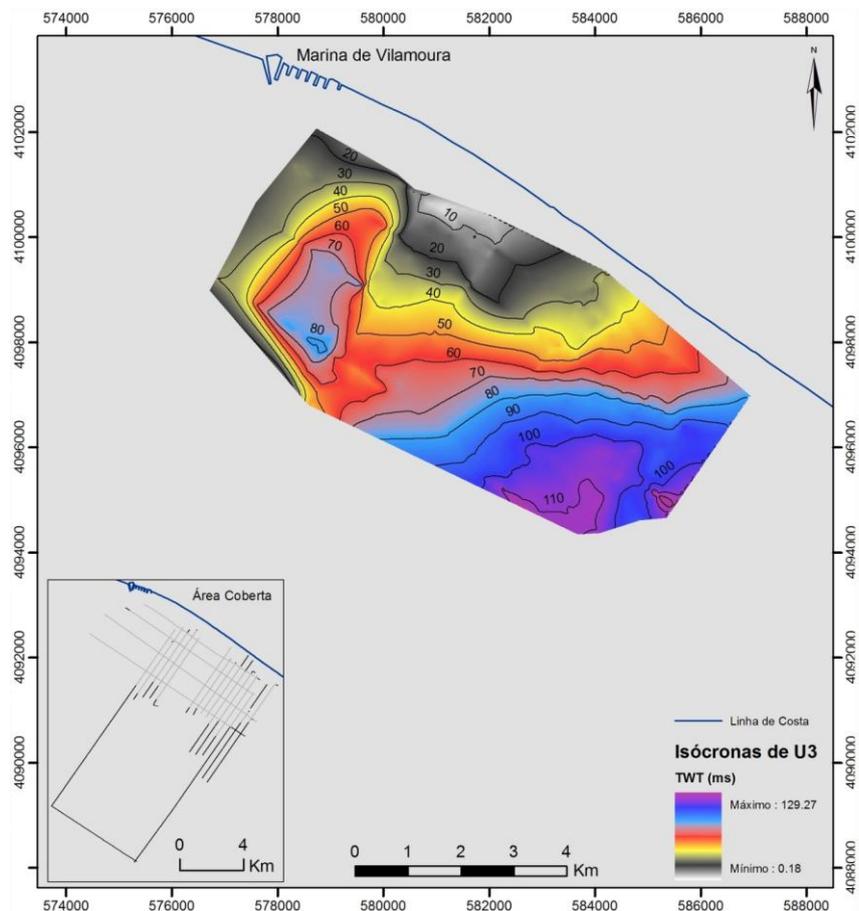


Figura 51. Mapa de isócronas da unidade U3.

#### 4.10 Síntese da Interpretação Efectuada com os Dados da Campanha ERSTA\_SANDEX

Com base na interpretação sismostratigráfica efectuada com os dados da campanha ERSTA\_SANDEX e da análise dos mapas de isócronas produzidos, faz-se uma síntese dos dados interpretados dos fenómenos geológicos registados nesta área de estudo segundo dois pontos de vista: da evolução sedimentar litoral e das implicações neotectónicas. Em primeiro lugar sugere-se uma coluna cronostratigráfica que resulta da correlação da coluna sismostratigráfica elencada no ponto 4.7.2.3 com os dados de estratigrafia descritos no enquadramento geológico (ponto 4.4).

#### 4.10.1 Coluna Cronostratigráfica

Não sendo possível determinar as idades exactas das unidades sísmicas interpretadas, pois a campanha efectuada não contemplou execução de sondagens, nem existem outras efectuadas na área de estudo, opta-se por propor uma coluna cronostratigráfica baseada nos dados disponíveis de estratigrafia da região emersa e imersa referidos no enquadramento estratigráfico (Ponto 4.4) em geral e nos trabalhos de Dias (2000) e Teixeira (2005) no que se refere, particularmente, à época Holocénica.

De acordo com as características da unidade U1, o seu carácter agradante, a forma estratificada, as terminações *onlap* e uma espessura de cerca de 10 ms, esta parece corresponder a depósito preenchimento de superfície de ravinamento marinha, correspondente ao horizonte S1. Assim a unidade U1, terá uma idade compatível com o último período transgressivo ocorrido entre no início do Holocénico, quando o nível do mar estava em cerca de 30 m abaixo do nível actual (Dias, 2000). De facto, da análise da morfologia do fundo marinho (Figura 41), observa-se uma quebra de declive, na batimétrica dos 25 metros, que deverá corresponder a um relevo de dureza constituindo um registo relíquia da paleolinha de costa à época referida, materializada no mapa de isócronas do horizonte S1 pela isócrona dos -35 ms (Figura 44).

As características sísmicas da unidade U1A com reflexões internas descontínuas, irregulares com direcções e inclinações opostas e variações de forma ao longo do seu desenvolvimento espacial e uma espessura máxima de 30 ms (cerca de 25 m de espessura), que assenta no horizonte S1A cuja morfologia parece corresponder a uma paleo-rede de drenagem (Figura 45) são compatíveis com as descrições efectuadas por Teixeira (2005). Estas resultam da consulta de relatórios de furos de sondagem executados na planície de inundação da ribeira da Quarteira e de sondagens de pequena profundidade executadas na planície de inundação das ribeiras de Almargem e Carcavai e indicam sumariamente a presença de um preenchimento sedimentar holocénico que pode atingir os 20 metros, numa sequência tipicamente transgressiva (op. cit.).

Assim, a unidade U1 corresponderá ao Holocénico marinho e a unidade U1A ao seu equivalente lateral, Holocénico fluvial ou lagunar.

Para a unidade U2 não é possível efectuar uma correlação com outros dados levantados. Este facto deve-se essencialmente ao seu posicionamento na área de levantamento, que não permite um enquadramento com os restantes unidades interpretadas. Deste modo, apenas se pode afirmar, à luz do princípio de sobreposição, que esta é anterior ao Holocénico pelo datará provavelmente do Plistocénico.

A unidade U3 pode ser interpretada tendo em conta a continuidade espacial da geologia do litoral da zona emersa contígua à área imersa. Assim, em terra observa-se que a rede de drenagem actual está instalada num substrato datado como Pliocénico-Plistocénico correspondente à Formação do Ludo (Areias e Cascalheiras de Faro-Quarteira) pelo que esta unidade terá uma idade correlativa desta formação, conforme a proposta de Roque (2007). No entanto, a datação da base da unidade U3 permanece indeterminada podendo, corresponder, ao Pliocénico Inferior ou mesmo ao Miocénico superior, facto que só poderá ser determinado com a execução de sondagens.

A unidade U4 de acordo com o acima enunciado, terá que ser de idade anterior às sobrejacentes, inclusivamente de idade pré-Miocénica, ou seja, paleogénica ou cretácica. Na ausência de Paleogénico na região emersa, a idade Cretácico Inferior é mais provável.

Apresenta-se o modelo cronostratigráfico na Figura 52, tendo em consideração que na correlação efectuada a incerteza aumenta em profundidade.

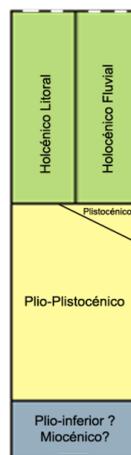


Figura 52. Coluna cronostratigráfica proposta para as unidades sismostratigráficas da Figura 43.

#### 4.10.2 Evolução do Litoral

A interpretação e análise dos mapas de isócronas dos horizontes e das unidades sísmicas permitem identificar evidências de um antigo sistema costeiro composto por três domínios:

- Um correspondente ao limite estuarino holocénico do sistema fluvial materializado pelo limite SE do horizonte S1A (Figura 53-A) e pelas características deposicionais registadas na unidade U1A, construído pelas ribeiras Quarteira-Almargem-Carcavai (Teixeira 2005),
- Outro relativo ao traçado da linha de costa da mesma época, materializada pelo limite NE do horizonte S1 (Figura 53-B), correspondente à superfície de ravinamento marinha e pelas características deposicionais registadas na unidade U1. Note-se a interrupção do traçado

linear antiga de costa na zona NW do seu desenvolvimento espacial (Figura 53-C), causada pela instalação de um paleocanal;

- E finalmente, o domínio constituído pela barreira (península) Plio-pleistocénica, materializada pela unidade U3 (Figura 53-U3), que separava os supra referidos domínios.

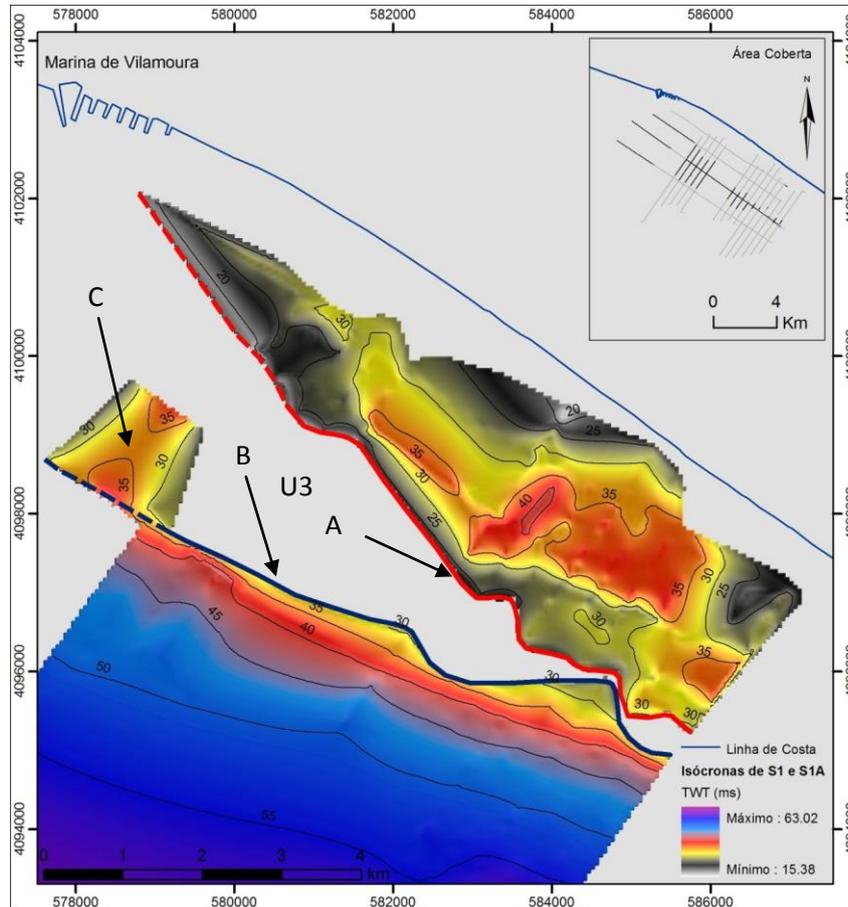


Figura 53. Mapa de isócronas dos horizontes S1 e S1A.

O bloco diagrama da Figura 54 resulta da conjugação dos horizontes S1, S1A e fundo do mar (FM, que materializa o topo da superfície S3) simulando a morfologia do sistema costeiro holocénico acima descrito.

#### 4.10.3 Estruturas Tectónicas Activas

Os mapas apresentados na Figura 47 mostram a existência duma falha inversa de orientação NE-SW que controla a posição dos anticlinal e sinclinal A estrutura sinforme tem uma orientação NE-SW, com flancos assimétricos que fecham na região setentrional e sofrem uma inflexão para E na região mais meridional. O eixo inclina cerca de 1º para SW, verificando-se por um aumento de profundidade da superfície no mesmo sentido que atinge o valor máximo na isócrona dos 110 ms.

Como se pode observar na Figura 47 o flanco SE do sinforme apresenta valores de inclinação que variam entre 4º a norte e 5º a sul (na zona de inflexão para E), registando uma inclinação máxima de 12º na zona intermédia.

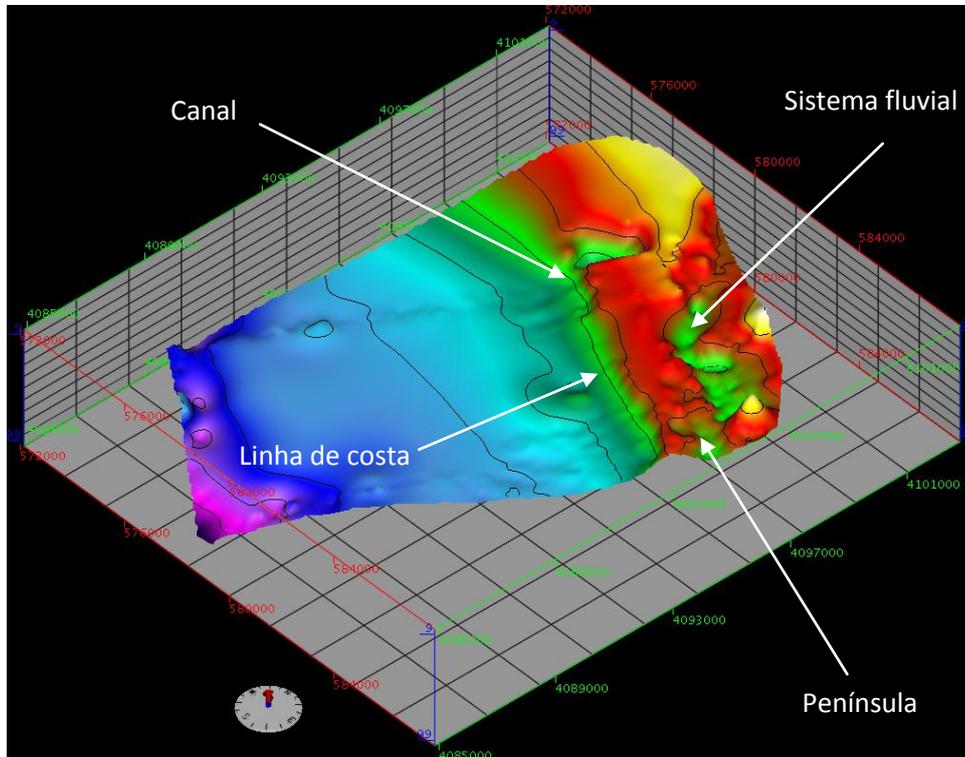


Figura 54. O bloco diagrama (x40), que simula a morfologia do sistema costeiro holocénico.

O flanco NW apresenta valores de inclinação mais baixos variando entre 2 a 3º de inclinação que aumenta para 4º na zona de inflexão do sinforme. A falha inversa tem uma direcção NE-SW e uma inclinação de cerca de 15ºSE a norte e de 17ºSE na zona sul, registando uma inclinação máxima de 19ºSE na zona de desenvolvimento intermédia, coincidente com a inclinação máxima do flanco SE do sinforme. A E da falha note-se a ocorrência de uma estrutura antiforme com eixo inclinado 0.6º para SW e paralelo ao eixo sinforme localizado a W mesma.

A partir da análise dos dados da campanha ERSTA\_SANDEX, não é possível identificar indícios directos actividade da falha SMQ nem a sua zona de saída para *offshore*. No entanto, a partir da interpretação sismostratigráfica efectuada, foi identificada uma outra estrutura tectónica, caracterizada geometricamente no ponto 4.8.1.4, que corresponde ao prolongamento da falha do Carcavai para a zona imersa, a qual fornece informações que permitem conjecturar sobre a influência da falha SMQ nesta área de estudo e também sobre o desenvolvimento da mesma para *offshore*.

#### 4.10.3.1 Falha do Carcavai

A falha do Carcavai no seu prolongamento *offshore* tem uma direcção NE-SW, com cerca de 16º de inclinação para SE e apresenta uma componente de movimentação inversa com formação de uma dobra de arrasto anticlinal, com vergência para NW, que limita o flanco SE de uma estrutura sinclinal. Conforme se pode observar nos perfis sísmicos (Figuras A3 a A6 em anexo), a falha rejeita, o horizonte S3 com idade provável que pode variar entre Pliocénico inferior ou Miocénico. O topo da falha assinalado vai sendo cada vez mais superficial à medida que se caminha para NE, passando de uma profundidade de 95 ms no perfil ERSTA\_01 (Figura A3 em anexo) para os 40 ms no perfil SANDEX\_07 (Figura A6 em anexo), este localizado mais perto do litoral e da provável zona de passagem da falha SMQ.

Observando o topo dos perfis ERSTA\_01 e ERSTA\_03 (Figura A3 e A4 em anexo), verifica-se existência de estrutura em preenchimento de canal posicionada no bloco oeste da falha (Figura 44), interpretado como sendo de idade holocénica, que não é visível nos outros perfis situados NE, e uma perturbação assinalável nos sedimentos da unidade U3, com idade provável Plio-pleistocénica, na zona a topo da falha (assinalada a tracejado nos referidos perfis). Tendo em conta que nesta área a cobertura de dados é escassa pode, no entanto, levantar-se a hipótese, de que a instalação deste canal pode estar relacionada com a movimentação da falha do Carcavai, indiciando uma actividade tectónica muito recente, nos últimos 8-10 mil anos, com uma taxa de abatimento do bloco oeste na ordem 0.4-0.5 mm/ano (calculado com base na espessura média dos sedimentos do canal e para uma velocidade propagação do som de 1500 m/s), facto que só pode ser comprovado fazendo um levantamento mais detalhado nesta área.

#### 4.10.3.2 Falha São Marcos-Quarteira

No que respeita à falha SMQ, as conclusões a retirar quanto à sua actividade neotectónica e ao seu prolongamento para *offshore* são muito escassas sendo apenas possível fazer duas referências. A primeira, para o facto da rede de drenagem Quarteira-Almargem-Carcavai, se ter instalado numa direcção NW-SE idêntica à falha SMQ durante o Holocénico, ocorrência já enunciada por Teixeira (2005), controlada por uma península cuja vertente norte tem essa mesma direcção. A segunda referência está ligada com a geometria do sinclinal a muro da falha de Carcavai no mar. Este sinclinal apresenta uma terminação periclinal (Figura 47) indicativa de que o eixo mergulha para o mar, i.e. para SW. Sendo a Falha de Carcavai uma estrutura que se prolonga por mais de vinte quilómetros para terra, é possível que este sinclinal esteja dobrado a muro da falha SMQ, indiciando um fenómeno de interferência entre ambas as falhas que não é possível confirmar com os dados adquiridos.

## 5. CONCLUSÃO

No que concerne à aplicação de ferramentas SIG, da análise efectuada ao desempenho de métodos de interpolação para dados com arranjo espacial irregular, característicos dos levantamentos de dados geofísicos, conclui-se que o desempenho de grande parte dos interpoladores comumente utilizados para estes dados não produzem os melhores resultados quando comparados com os obtidos pelo método de interpolação *Natural Neighbors*. No entanto, este interpolador tem algumas limitações no que respeita ao tipo de dados de entrada, os quais têm que ser, obrigatoriamente, de geometria pontual. No processamento dos dados, comparativamente com outros métodos de interpolação, é muito mais lento. Este facto pode ser relevante, pois por vezes os dados em análise são constituídos por largos milhões de pontos e mesmo com a tecnologia actual as operações de processamento podem levar dias a ser executadas.

No que respeita ao estudo de estruturas tectónicas activas a interpretação dos dados da indústria petrolífera permitiu caracterizar estruturas com orientação NW-SE que correspondem ao prolongamento da falha SMQ na região imersa sendo que a actividade mais recente da falha é observada no seu sector meridional (Figura 39). Por outro lado, a campanha ERSTA\_SANDEX, apesar de não ser conclusiva no que respeita à referida falha, permite reconhecer indícios da sua actividade, nomeadamente, o facto da rede de drenagem Quarteira-Almargem-Carcavai se ter instalado numa direcção NW-SE, idêntica à falha SMQ durante o Holocénico, e de provavelmente condicionar a geometria do sinclinal a muro da falha de Carcavai, indiciando um fenómeno de interferência entre ambas as falhas. A partir dos dados da campanha ERSTA\_SANDEX é possível caracterizar a geometria da falha do Carcavai e cartografar o seu prolongamento para a região imersa num troço com cerca de 10 km de extensão, e ainda, identificar indícios da sua actividade neotectónica pelo menos no Plio-Plistocénico e provavelmente no Holocénico. Finalmente, identificam-se indícios da existência duma paleogeografia da linha de costa substancialmente diferente da actual ou mesmo da de idade holocénica (Figura 47).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABARZUZA, A., 1991. *Sónar de Barrido Lateral y Penetrador de Sedimentos: Aplicación en Hidrografía*. ([S.I.]:Instituto de Hidrografía Marina).
- ANTUNES, M. T., BIZON, G., NASCIMENTO, A., PAIS, J., 1981. Nouvelles Données sur la Datation Dès Dépôts Miocènes de l'Algarve (Portugal), et L'évolution Géologique Regionale. *Ciências da Terra*, **6**, 153-168.
- ANTUNES, M. T., PAIS, J., 1993. The Neogene of Portugal. *Ciências da Terra*, **12**, 7-22.
- ATKINSON P.M., 2002. Surface Modelling: What's the point? *Transactions in GIS*, **6**, 1-4.
- BALDY, P., 1977. *Geologie du Plateau Continental Portugais (au sud du Cap de Sines)*. These 3ème cycle. Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- BALDY, P., BOILLOT, G., DUPEUBLE, P-A., MALOD, J., MOITA, I., MOUGENOT, D., 1977. Carte Géologique du Plateau Continental Sud-Portugais et Sud-Espagnol (Golfe de Cadix). *Bulletin de la Société Géologique de France*, **4**, 703-724.
- BAPTISTA, M., LOPES, C., LOPES, F., MIRANDA, J., 2000. Análise do Sismo e Tsunami de 1722.12.27 (Tavira-Portugal). Resumos, *2ª Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica*, 153-154.
- BUFORN, E., BEZZEGHOUD, M., UDÍAS, A., PRO, C., 2004. Seismic Sources on the Iberia-African Plate Boundary and their Tectonic Implications. *Pure an Applied Geophysics*, **161**, 1-24.
- BURROUGH, P., MCDONNELL, R., 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. (Oxford: Oxford University).
- CARRILHO, F., SENOS, L., FITAS, A., BORGES, F., 1997. Estudo da Sismicidade do Algarve e Zona Atlântica Adjacente. *3ª Encontro de Sismologia e Engenharia Sísmica, Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica*, 59-67.
- CABRAL, J., 1995. Neotectónica em Portugal Continental. *Memória 31 do Instituto Geológico e Mineiro*.
- CABRAL, J., 2003. A Geologia na Avaliação da Perigosidade Sísmica. *Comunicação apresentada no Seminário Riscos Geológicos da Associação Portuguesa de Geólogos*, 29 a 30 de Setembro, Lisboa.
- CACHÃO, M., SILVA, C. M., 2000. The Three Main Marine Depositional Cycles of the Neogene of Portugal. *Ciências da Terra*, **14**, 303-312.

- CHOFFAT, P., 1907. Notice sur la Carte Hypsométrique du Portugal (avec une Carte Tectonique). *Comunicação dos Serviços Geológicos de Portugal*, Tomo 7.
- CLAVIJO, A., VALADARES, V., 2003. O Maciço Alcalino de Monchique (SW Português): Estrutura e Modelo de Instalação na Crosta Superior. *Comunicação do Instituto Geológico e Mineiro*, Tomo 90.
- DEWEY, J., HELMAN, M., TURCO, E., HUTTON, D., KNOTT, S., 1989. Kinematics of the Western Mediterranean, in: Coward, P., Dietrich, D., Park, R., *Alpine Tectonics*, **45**, 265-283.
- DIAS, J., BOSKI, T., RODRIGUES, A., MAGALHÃES, F., 2000. Coastline Evolution in Portugal since the Last Glacial Maximum until Present - a Synthesis. *Marine Geology*, **170**, 177-186.
- DIAS, R., 2001. *Neotectónica da Região do Algarve*. Dissertação de doutoramento, Universidade de Lisboa.
- DIEZ, S., GRÀCIA E., GUTSCHER M., MATIAS L., MULDER T., TERRINHA P., SOMOZA L., ZITELLINI N., DE ALTERIIS, G., HENRIET, J., DAÑOBEITIA, J., 2005. *Bathymetric Map of the Gulf of Cadiz, NE Atlantic Ocean: The SWIM Multibeam Compilation*. 250<sup>o</sup> Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake.
- EMERY, D., MYERS, K.J., 1996. *Sequence Stratigraphy*. ([S.I.]:Blackwell Science).
- EWING, J., 1963. Elementary Theory of Seismic Refraction and Reflection Measurements In The Sea. *Wiley-Interscience*, **3**, 3-46.
- FACCENA, C., BECKER, T., LUCENTE, F., JOLIVET, L., ROSSETI, F., 2001. History of Subduction and Back-Arc Extension in the Central Mediterranean. *Geophysics International Journal*, **145**, 809-820.
- FUKAO, Y., 1973. Thrust Faulting at a Lithospheric Plate Boundary, The Portugal Earthquake of 1969. *Earth and Planetary Science Letters*, **18**, 205-216.
- HENGL, T., 2006. Finding the Right Pixel Size. *Computers & Geosciences* **32**, **9**, 1283-1298.
- HÉRNANDEZ-MOLINA, J., LLAVE, E., STOW, D., GARCÍA, M., SOMOZA, L., VÁZQUEZ, J., LOBO, F., MAESTRO, A., DÍAZ DEL RÍO, V., LÉON, R., MEDIALDEA, T., GARDNER, J., 2006. The Contourite Depositional System of the Gulf of Cadiz : a Sedimentary Model Related to the Bottom Current Activity of the Mediterranean Outflow Water and its Interaction with the Continental Margin. *Deep Sea Research* **2**, **53**, 1420-1463.
- HERRAIZ, M., DE VINCENTE, G., LINDO, R., GINER, J., SIMÓN, L., GONZÁLEZ, M., VADILLO, O., RODRÍGUEZ-PASCUA, A., CICUÉNDEZ, J., CASAS, A., CABAÑAS, L., RINCÓN, P., CORTES, A., RAMÍREZ, M., LUCINI, M., 2000. The Recent (upper Miocene to Quaternary) and Present Tectonic Stress Distributions in the Iberian Peninsula. *Tectonics*, **19**, 762-786.

- HUTCHINSON, M., GALLANT J., 2000. *Terrain Analysis: Principles and Applications* (New York:John Wiley and Sons).
- JONHSTON, K., VEER, J., KRIVORUCHKO, K., LUCAS, N., 2001. *Using ArcGis Geostatistical Analyst*. (USA:ESRI).
- JONES, E., 1999. *Marine Geophysics*. (West Sussex :John Wiley and Sons).
- KENNIE, T., PETRIE, G., 1990. *Introduction To Terrain Modeling: Application Fields and Terminology*. (New York:McGraw-Hill).
- KULBERG, J., PAIS, J., MANUPPELLA, G., 1992. Aspectos Gerais da Tectónica Alpina no Algarve. *Ciências da Terra*, **11**, 293-302.
- LI, Z., ZHU, Q., 2005. *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*. (Boca Raton:CRC Press).
- LI, J., HEAP, A., 2008. *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*. (Australia:Geoscience Record).
- LONGLEY, P., GOODCHILD, M., MAGUIRE, D., RHIND, D., 2005. *Geographic Information Systems and Science* (2ª ed.) (Chichester:Jonh Wiley and Sons).
- LOPES, F., CUNHA, P., LE GALL, B., 2006. Cenozoic Seismic Stratigraphy and Tectonic Evolution of the Algarve Margin (Offshore Portugal, Southwestern Iberian Peninsula). *Marine Geology*, **231**, 1-36.
- MALDONADO, A., SOMOZA, L., PALLARÉS, L., 1999. The Betic Orogen and the Iberian–African Boundary in the Gulf of Cádiz: Geological Evolution (Central North Atlantic). *Marine Geology*, **155**, 9–43.
- MALOD, J., MOUGENOT, D., 1979. Le Historie Géologique du Neogène du Golfe de Cadiz. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **21**, 317-331.
- MANUPPELLA, G., PAIS, J., ANTUNES, A., 1986. Controlo Estrutural da Sedimentação Neogénica no Algarve. *Maleo* 2, **13**, 26.
- MANUPPELLA, G., RAMALHO, M., ANTUNES, M., PAIS, J., 1987a. *Notícia Explicativa da folha 53-A, Faro*, dos Serviços Geológicos de Portugal.
- MANUPPELLA, G., RAMALHO, M., ANTUNES, M., PAIS, J., 1987b. *Notícia Explicativa da folha 53-B, Tavira*, dos Serviços Geológicos de Portugal.
- MANUPPELLA, G. 1988. Litoestratigrafia e Tectónica da Bacia Algarvia. *Geonovas*, **10**, 67-71.

- MANUPELLA, G., 1992. *Notícia Explicativa da Carta geológica da região do Algarve (escala 1/100000)*, dos Serviços Geológicos de Portugal.
- FEIO, M., 1951. A Evolução do Relevo do Baixo Alentejo e Algarve. *Comunicação dos Serviços Geológicos de Portugal*, **32**, 303-477.
- MCQUILLIN, R., BACON, M., BARCLAY, W., 1979. *An Introduction to Seismic Interpretation*. (London: Graham and Trotman).
- MIRANDA, R., VALADARES, V., TERRINHA, P., MATA, J., AZEVEDO, M., GASPAR, M., KULLBERG, J., RIBEIRO, C., 2009. Age Constraints on the Late Cretaceous Alkaline Magmatism on the West Iberian Margin. *Cretaceous Research*, **30**, 575-586.
- MOUGENOT, D., MONTEIRO, J., DUPEUBLE, P., MALOD, J., 1979. La Marge Continentale Sud-Portugaise: Evolution Structural et Sédimentaire. *Ciências da Terra*, **5**, 223-246.
- MOUGENOT, D. 1988. *Geologie de la Marge Portugaise*. Thèse 3ème cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- MUSSET, A. KHAN, A. 2000. *Looking Into the Earth: an Introduction to Geological Geophysics*. (Cambridge:Cambridge University).
- OLIVEIRA, J., ANDRADE, A., ANTUNES, M., CARVALHO, D., CELHO, A., FEIO, M., GONÇALVES, F., MANUPELLA, G., MARQUES, B., MONTEIRO, J., MUNHÁ, J., RAMALHO, M., REY, J., RIBEIRO, A., ROCHA, R., ZBYSZEWSKI, G., 1984. *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal, Folha 7 (escala 1/200 000)*, dos Serviços Geológicos de Portugal.
- OLIVET, J., BONNIN, J., BEUZART, P., AUZENDA, J., 1984. *Cinématique de l'Atlantique Nord et Central. Rapports Scientifiques et Techniques n° 54* (Brest:Centre Nationale pour l'Exploration des Oceans).
- PALAIN, 1979. Connaissances Stratigraphiques sur la Base du Mésozoïque Portugais. *Ciências da Terra*, **5**, 11-28.
- RABAÇA, T. 2004. Geological Mapping of the Penamacor - Idanha-a-Nova Zone (Central Portugal) by Digital Classification. In *Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium*. ([S.I.]:IEEE International), **2**, 1310-1313.
- RAMALHO, M., 1985. Considerations sur la Biostratigraphie du Jurassique Superior de l'Algarve Oriental (Portugal). *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, **71**, 451-470.

- RESSURREIÇÃO, R., (2009) – *Estudos de Neotectónica na Falha de Carcavai (Algarve): Contribuição para a Caracterização Desta Estrutura e de Paleossismos Prováveis Associados*. Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa.
- REY, J., 1983. Le Cretacé de l'Algarve: Éssai de Synthèse. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, **69**, 87-54.
- RIBEIRO, A., CABRAL, J., BAPTISTA, R., MATIAS, L., 1996. Stress Pattern in Portugal Mainland and the Adjacent Atlantic Region, West Iberia. *Tectonophysics*, **15**, 641-659.
- ROCHA, R., RAMALHO, M., MANUPELLA, G., ZBYSZEWSKI, G., 1979. *Notícia Explicativa da Folha 51-B, Vila do Bispo*, dos Serviços Geológicos de Portugal.
- ROQUE, C., 1998. *Análise Morfo-Sedimentar da Sequência Depositional do Quaternário Superior da Plataforma Continental Algarvia entre Faro e a Foz do Rio Guadiana*. Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa.
- ROQUE, C., 2007. *Tectonostratigrafia do Cenozóico das Margens Continentais Sul e Sudoeste Portuguesas: um Modelo de Correlação Sismostratigráfica*. Dissertação de doutoramento, Universidade de Lisboa.
- ROSAS, F., DUARTE, J., TERRINHA, P., VALADARES, V., MATIAS, L., 2009. Morphotectonic Characterization of Major Bathymetric Lineaments in NW Gulf of Cadiz (Africa-Iberia Plate Boundary): Insights From Analogue Modelling Experiments. *Marine Geology* **261**, 33–47.
- ROSENBAUM, G., LISTER, G., DUBOZ, C., 2002. Reconstruction of the Tectonic Evolution of the Western Mediterranean Since the Oligocene. *Journal of the Virtual Explorer*, **8**, 107-126.
- SAMBRIDGE, M., BRAUN, J., MCQUEEN, H., 1995, Geophysical Parameterization and Interpolation of Irregular Data Using Natural Neighbours. *Geophysical Journal International*, **122**, 837–857.
- SANGREE, J., WIDMER, J., 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, part 9: Seismic Interpretation of Clastic Depositional Facies. *Memoires of American Association of Petroleum Geologists*, **26**, 165-184.
- SANZ DE GALDEANO, C., 2000. Evolution of Iberia during the Cenozoic with Special Emphasis on the Formation of the Betic Cordillera and its Relation with the Western Mediterranean. *Ciências da Terra*, **14**, 9-24.
- SILVA, S., ROMSDORF, M., MATIAS, L., GEISLER, W., TERRINHA, P., NEAREST WORKING GROUP, 2009. Characterization of the Seismicity of the Gulf of Cadiz Area Based on Nearest OBS Network Data: Preliminary results, Libro de resúmenes 6º Simposio sobre el Margen Ibérico Atlántico.

- SRIVASTAVA, S., ROEST W., KOVACS, L., OAKEY, G., LÉVESQUE, S., VERHOEF, J., MACNAB, R., 1990. Motion of Ibéria since the Late Jurassic: Results from Detailed Aeromagnetic Measurements in the Newfoundland Basin. *Tectonophysics*, **184**, 229-260.
- STICH, D., SERPELLONI, E., MANCILLA, F., MORALES, J., 2006. Kinematics of the Iberia–Maghreb Plate Contact from Seismic Moment Tensors and GPS Observations. *Tectonophysics*, **426**, 295-317.
- SHERIFF, R., GELDART, L., 1983. *Exploration Seismology: Data Processing and Interpretation*. Volume 2. (Cambridge:Cambridge University).
- TEIXEIRA, S.B., 2005. Evolução Holocénica do Litoral em Regime Transgressivo: o Caso da Costa de Quarteira (Algarve, Portugal). Apresentação no *Seminário Iberian Coastal Holocene Paleoenviromental Evolution*, Lisboa.
- TELFORD, W., GELDART, L., SHERIFF, R., 1990. *Applied Geophysics* (2ª ed) (Cambridge:Cambridge University).
- TERRINHA, P., 1998. *Structural Geology and Tectonic Evolution of the Algarve Basin, South Portugal*. Phd thesis, Department of Geology, University of London.
- TERRINHA, P., RIBEIRO, C., KULLBERG, J., ROCHA, R., RIBEIRO, A., 2002. Compression Episodes During Rifting and Faunal Isolation in the Algarve Basins, SW Iberia. *Journal of Geology*, **110**, 101-113.
- TERRINHA, P., ROCHA, R., REY, J., CACHÃO, M., MOURA, D., ROQUE, C., MARTINS, L., VALADARES, V., CABRAL, J., AZEVEDO, M., BARBERO, L., CLAVIJO, E., DIAS, R., GAFEIRA, J., MATIAS, L., MADEIRA, J., SILVA, C., MUNHÁ, J., REBELO, L., RIBEIRO, C., VICENTE, J., YOUNI, N., 2006. *A Bacia do Algarve: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. Geologia de Portugal no Contexto da Ibéria*. (Évora:Universidade de Évora).
- TERRINHA, P., MATIAS, L., VICENTE, J., DUARTE, J., LUÍS, J., PINHEIRO, L., LOURENÇO, N., DIEZ, S., ROSAS, F., MAGALHÃES, V., VALADARES, V., ZITELLINI, N., MENDES VÍCTOR, L., MATESPRO TEAM, in press. Morphotectonics and Strain Partitioning at the Iberia-Africa Plate Boundary from Multibeam and Seismic Reflection Data. *Marine Geology*.
- VAIL, P., MITCHUM, R., THOMPSON, M., 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, part 4: Global Cycles of Relative Changes of Sea Level. In: *Seismic Stratigraphy Applications to Hydrocarbon Exploration. Memoires of American Association of Petroleum Geologist*, **26**, 83-97.
- VALADARES, 2004. *Complexo Alcalino de Monchique: Novos Dados de Cartografia, Geoquímica e Geocronologia*. Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa.

WATERS, K., 1981. *Reflection Seismology – A Tool for Energy Resource Exploration* (2<sup>a</sup> ed). ([S.I]:Wiley-Interscience).

WINTER, H., 1984. Tectonostratigraphy, as Applied to the Analysis of the South African Phanerozoic Basins. *Transactions of Geological Society of South Africa*, **87**, 169-179.

ZIEGLER, P., 1988. Post-Hercynian Plate Reorganization in the Tethys and Arctic-North Atlantic Domains. In: Triassic-Jurassic Rifting Continental Breakup and the Origin of the Atlantic Ocean and Passive Margins. *Developments in Geotectonics*, **22**, 711-754

ZITELLINI, N., ROVERE, M., TERRINHA, P., CHIERICI, F., MATIAS, L., BIGSETS TEAM, 2004. Neogene Through Quaternary Tectonic Reactivation of SW Iberian Passive Margin. *Pure and Applied Geophysics*, **161**, 565-587.

ZITELLINI, N., GRACIA, E., MATIAS, L., TERRINHA, P., ABREU, M., DEALTERIIS, G., HENRIET, J., DAÑOBEITIA, J., MASSON, D., MULDER, T., RAMELLA, R., SOMOZA, L., DIEZ, S., 2009. The Quest for the Africa-Eurasia Plate Boundary West of the Strait of Gibraltar. *Earth and Planetary Science Letters* **280**, **1-4**, 13-50.

# ANEXO 1

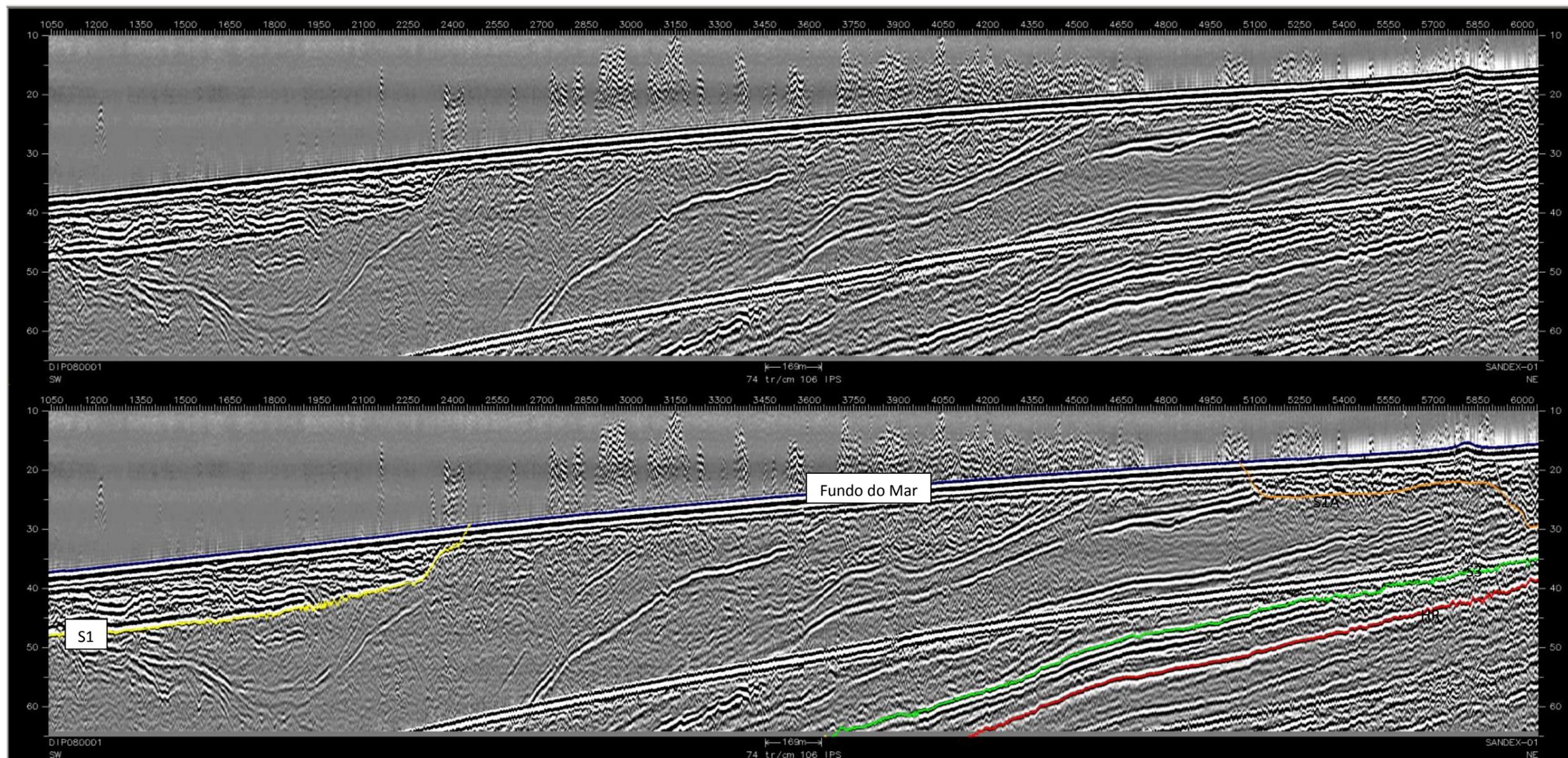


Figura A1. Perfil Sísmico Sandex\_01. Sobrelevação 10X.

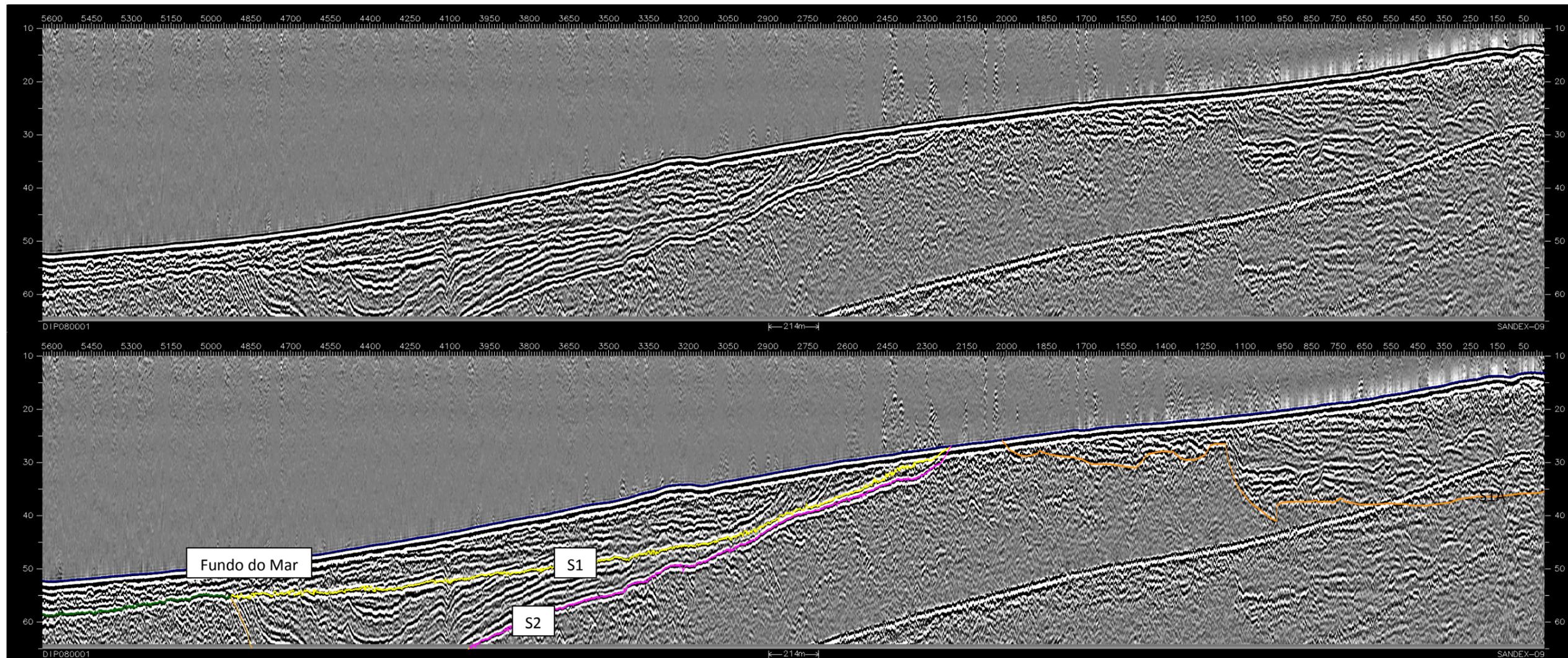


Figura A2. Perfil Sísmico Sandex\_09. Sobre elevação 15X.

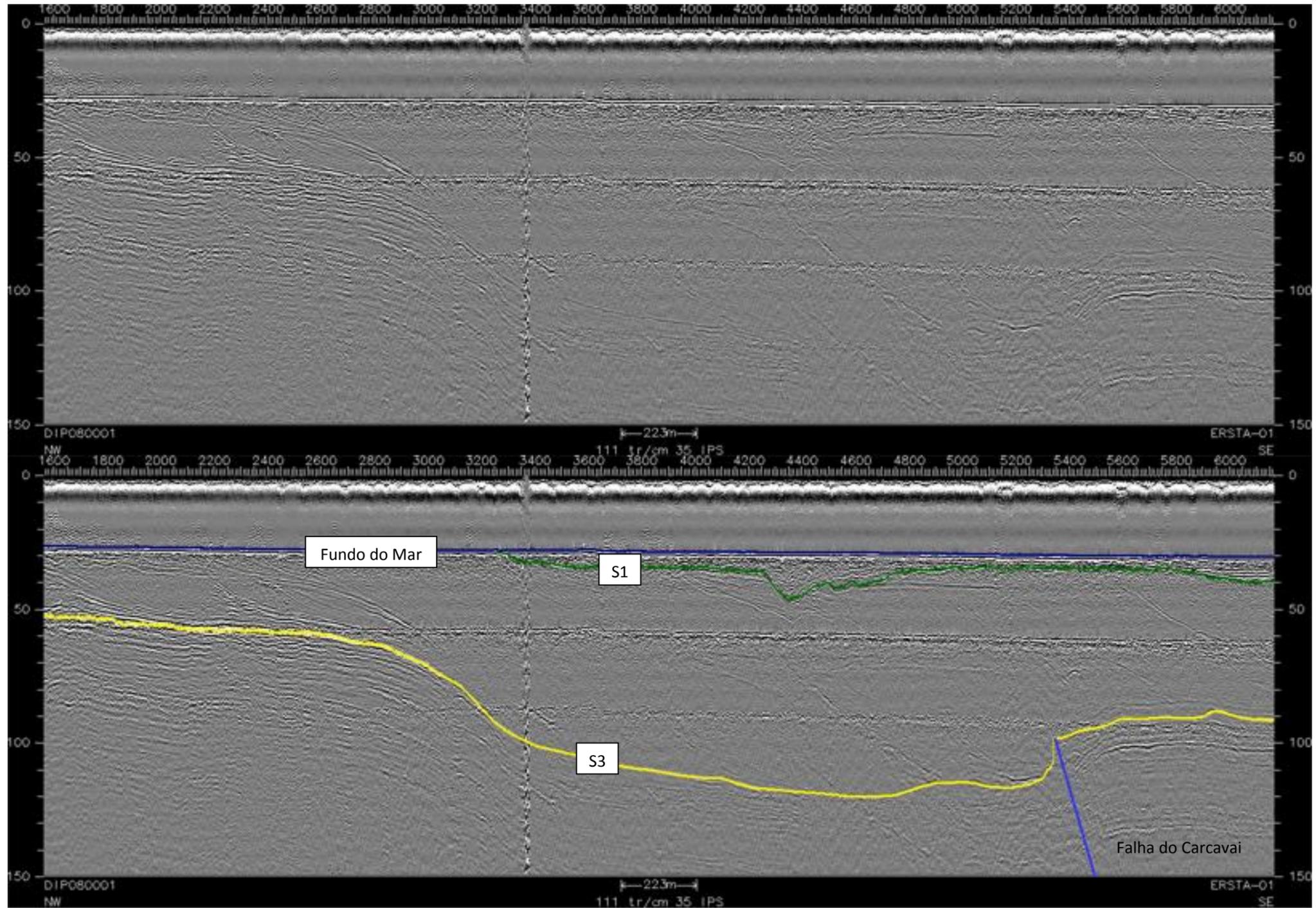


Figura A3. Perfil Sísmico ERSTA-01. Sobrelevação 12X.

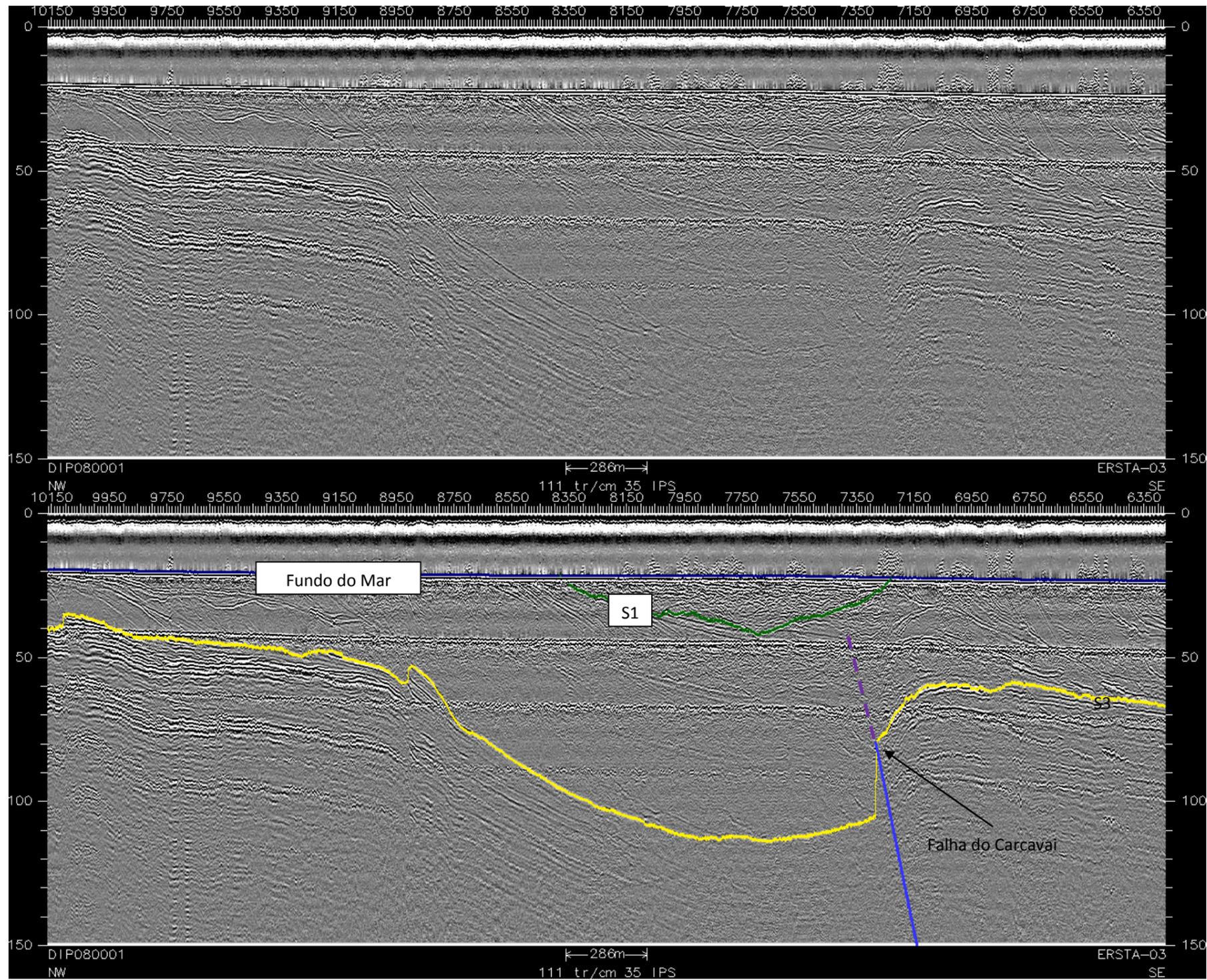


Figura A4. Perfil Sísmico ERSTA-03. Sobrelevação 12X.

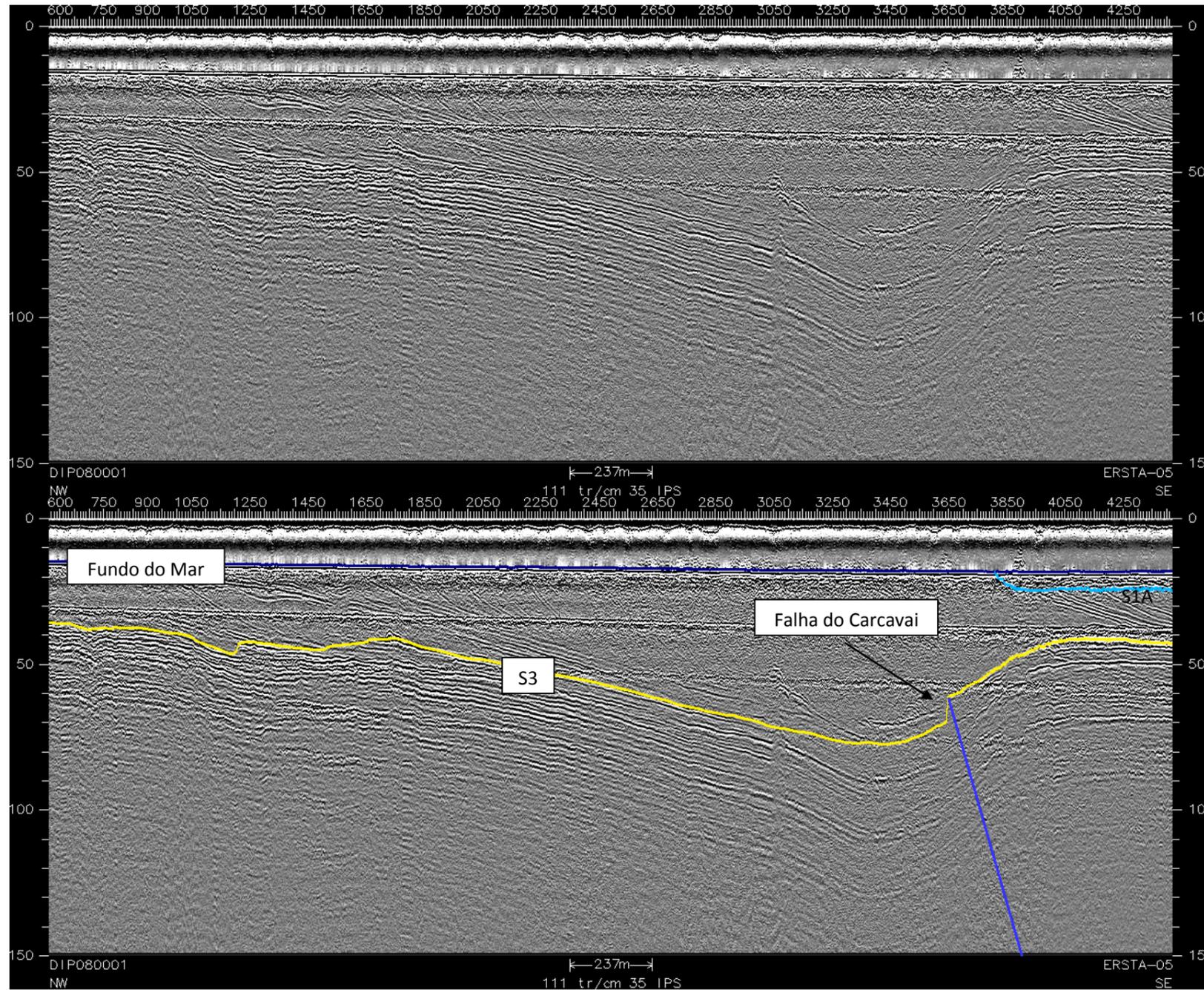


Figura A5. Perfil Sísmico ERSTA-05. Sobrelevação 12X.

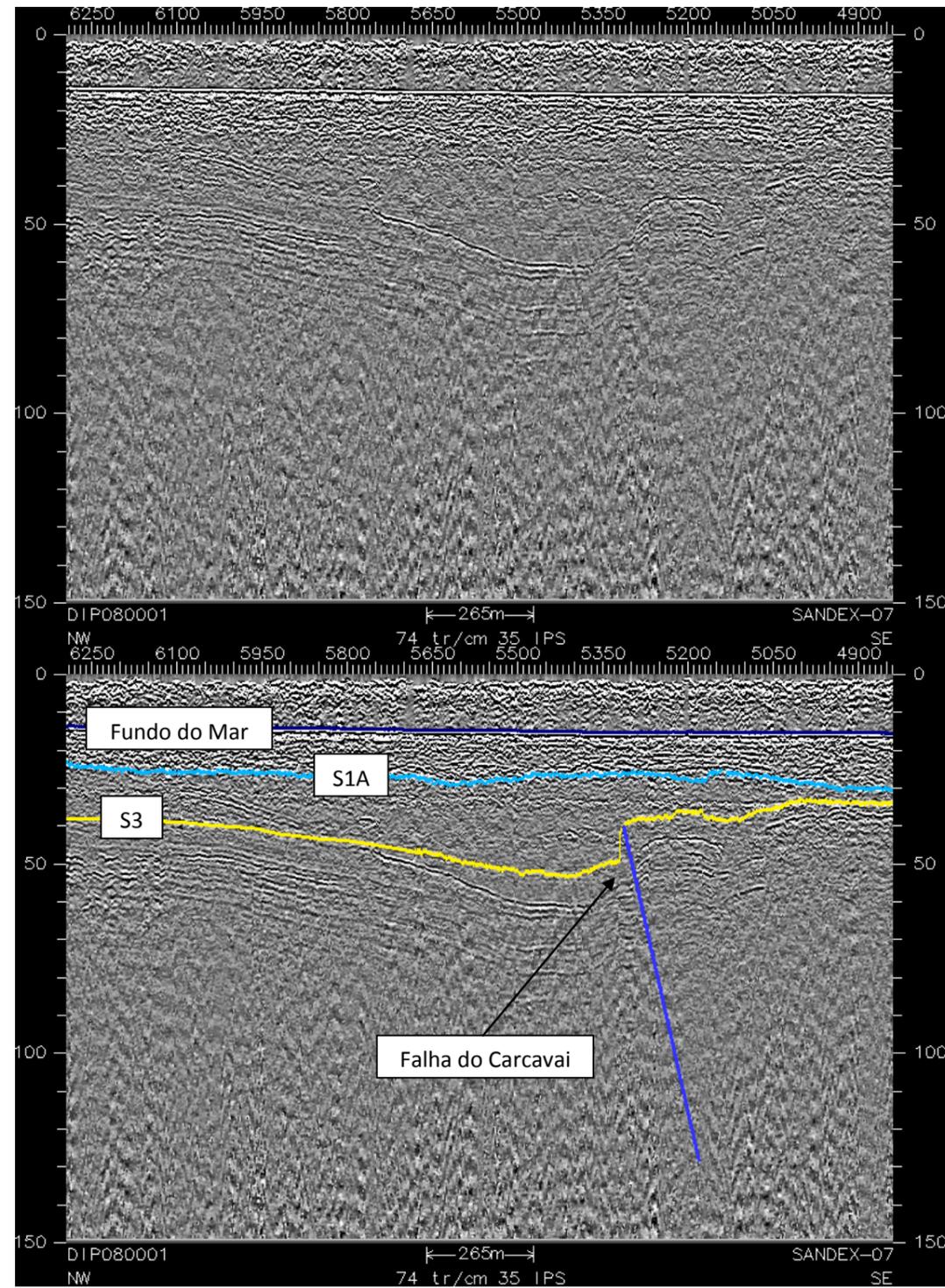


Figura A6. Perfil Sísmico ERSTA-07. Sobrelevação 12X.