

Secretaria Regional do Ambiente e Alterações Climáticas

Serviço de Ambiente e Alterações Climáticas de Santa Maria

Plano de Ação



Maio 2023

Preâmbulo

A história geológica da ilha de Santa Maria teve início há cerca de seis milhões de anos. As diversas etapas de formação da ilha, associadas aos movimentos transgressivos e regressivos do mar, fizeram com que animais e plantas marinhas fossem cobertos por sedimentos, assim os preservando. Por sua vez, um processo de soerguimento da ilha de Santa Maria relativamente aos fundos oceânicos, iniciado há cerca de três milhões e meio de anos e que se prolongou até à atualidade, promoveu a emersão desses sedimentos contendo fósseis marinhos, os quais, por ação da erosão, acabaram expostos.

Assim, a mais oriental e antiga ilha do arquipélago dos Açores possui fósseis marinhos únicos, no contexto regional e nacional, e as suas jazidas fossilíferas constituem um verdadeiro laboratório ao ar livre, com relevância internacional, conforme atestam estudos científicos recentes.

A particularidade e singularidade do património paleontológico da ilha de Santa Maria levaram à sua proteção legal, em 2012, através da alteração e republicação do diploma que cria o Parque Natural de Ilha de Santa Maria, consubstanciado e complementado pela publicação, em 2018, de um diploma que cria o Paleoparque de Santa Maria, classificação que tem o reconhecimento da Associação Internacional de Paleontologia.

A publicação desse Decreto Legislativo Regional impõe a criação de um Plano de Ação, que se apresenta neste documento, pretendendo-se elencar medidas que têm como objetivos a conservação, monitorização, promoção e valorização das jazidas fósseis da ilha de Santa Maria, com o propósito de beneficiar de modo identitário, económico e social, a população residente neste território.

O documento aqui apresentado foi elaborado pela Secretaria Regional do Ambiente e Alterações Climáticas, tendo como base os relatórios técnicos produzidos pela Fundação Gaspar Frutuoso, no âmbito do Contrato n.º 34/DRA/2019 de aquisição de serviços para a "Elaboração do Plano de Ação do Paleoparque de Santa Maria", assim como nos contributos do conselho consultivo do Paleoparque de Santa Maria.

Índice

1.	CONTEXTUALIZAÇÃO1
3.1	Enquadramento geográfico1
3.1	As jazidas fósseis da ilha de Santa Maria – descrição e delimitação geográfica
3.1	Enquadramento legal29
3.1 2	Estrutura de Gestão e coordenação
2.	Resumo das reuniões
2.1	Kesuno das reunides
2.2	Análise SWOT – pontos fortes, pontos fracos, oportunidades e ameaças
3.	ANÁLISE DA SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA42
3.1	Estado de conservação:42
3.2	Ameaças:43
4.	VISÃO, MISSÃO E OBJETIVOS
5.	PLANO DE AÇÃO
5.1	Ações de conservação45
5.2	Ações de monitorização46
5.3	Ações de promoção e comunicação47
5.4	OUTROS
BIBL	IOGRAFIA

Anexos

Anexo I: Descrição detalhada das jazidas fósseis; delimitação geográfica e zonas tampão.

Anexo II: Glossário.

Índice de Figuras:

Figura 1: Arquipélago dos Açores no mundo	1
Figura 2: Arquipélago dos Açores e Ilha de Santa Maria	2
Figura 3: Mapa da ilha de Santa Maria com a localização das 20 jazidas fossilíferas conhecidas	s.3
Figura 4: Localização das Jazidas Fósseis de Santa Maria em relação às áreas protegidas do	
Parque Natural da Ilha de Santa Maria	4
Figura 5 Localização das Jazidas Fósseis de Santa Maria em relação aos geossítios do	
Geoparque Açores, Geoparque Mundial da UNESCO	6
Figura 6: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Ponta dos Frades	9
Figura 7: Delimitação geográfica e zona tampão da jazida fóssil da Cré	10
Figura 8: Delimitação geográfica da jazida fóssil das Lagoínhas	11
Figura 9: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Ponta do Norte	12
Figura 10: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Ponta Negra	13
Figura 11: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Ponta do Cedro	14
Figura 12: Delimitação geográfica e zona tampão da jazida fóssil da Ponta do Castelo	15
Figura 13: Delimitação geográfica da Jazida fóssil da Pedra que Pica	16
Figura 14: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Vinha Velha	17
Figura 15: Delimitação Geográfica da Jazida fóssil da Pedrinha da Cré	18
Figura 16: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Baía de Nossa Senhora	19
Figura 17: Delimitação geográfica da jazida fóssil de Malbusca	20
Figura 18: Delimitação Geográfica da jazida fóssil da Falha Oeste de Malbusca	21
Figura 19: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Gruta dos Icnofósseis	22
Figura 20: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Macela	23
Figura 21: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Praia do Calhau	24
Figura 22: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Praínha	25
Figura 23: Delimitação geográfica e zona tampão da jazida fóssil do Figueiral	26
Figura 24: Delimitação geográfica da jazida Fóssil da Pedreira do Campo	27
Figura 25: Delimitação geográfica da jazida fóssil do Aeroporto	28

Índice de Tabelas

Tabela 1: Relação da localização das jazidas fósseis do Paleoparque com as áreas protegidas	do
Parque Natural da Ilha de Santa Maria	5
Tabela 2: Relação da localização das jazidas fósseis do Paleoparque com os geossítios do	
Geoparque Açores, Geoparque Mundial da UNESCO	7
Tabela 3: Caraterização da jazida fóssil da Ponta dos Frades	9
Tabela 4: caraterização da jazida fóssil da Cré	. 10
Tabela 5: Caraterização da jazida fóssil das Lagoínhas	. 11
Tabela 6: caraterização da jazida fóssil da Ponta do Norte	. 12
Tabela 7: Caraterização da jazida fóssil da Ponta Negra	. 13
Tabela 8: Caraterização da jazida fóssil da Ponta do Cedro	. 14
Tabela 9: Caraterização da jazida fóssil da Ponta do Castelo	. 15
Tabela 10: Caraterização da jazida fóssil da Pedra que Pica	. 16
Tabela 11: Caraterização da jazida fóssil da Vinha Velha	. 17
Tabela 12: caraterização da jazida fóssil da Pedrinha da Cré	. 18
Tabela 13: caraterização da jazida fóssil da Pedrinha da Cré	. 19
Tabela 14: Caracterização da jazida fóssil de Malbusca	. 20
Tabela 15: Caraterização da jazida fóssil da Falha Oeste de Malbusca	.21
Tabela 16: Caraterização da jazida fóssil da Gruta dos Icnofósseis	. 22
Tabela 17: Caraterização da jazida fóssil da Macela	. 23
Tabela 18: caraterização jazida fóssil da Praia do Calhau	. 24
Tabela 19: Caraterização jazida fóssil da Prainha	. 25
Tabela 20: Caraterização da jazida fóssil do Figueiral	. 26
Tabela 21: Caraterização da jazida fóssil da Pedreira do Campo	. 27
Tabela 22: Caraterização da jazida fóssil do Aeroporto	. 28
Tabela 23: Análise SWOT	. 31
Tabela 24: Análise SWOT à jazida fóssil da Ponta dos Frades	. 33
Tabela 25: Análise SWOT à jazida fóssil da Cré	. 33
Tabela 26: Análise SWOT à jazida Fóssil das Lagoínhas	. 34
Tabela 27: Análise SWOT à jazida fóssil da Ponta do Norte	. 34
Tabela 28: Análise SWOT à jazida fóssil da Ponta Negra	. 35
Tabela 29: Análise SWOT à jazida fóssil da Ponta do Cedro	. 35
Tabela 30: Análise SWOT à jazida fóssil da Ponta do Castelo	. 36
Tabela 31: Análise SWOT à jazida fóssil da Pedra que Pica	. 36
Tabela 32: Análise SWOT à jazida fóssil da Vinha Velha	. 37
Tabela 33: Análise SWOT à jazida fóssil da Pedrinha da Cré	. 37
Tabela 34: Análise SWOT à jazida fóssil da Baía de Nossa Senhora	. 37
Tabela 35: Análise SWOT à jazida fóssil de Malbusca	. 38
Tabela 36: Análise SWOT à jazida fóssil da Falha Oeste de Malbusca	. 38
Tabela 37: Análise SWOT à jazida fóssil da gruta dos icnofósseis	. 38
Tabela 38: Análise SWOT à jazida fóssil da Praia do Calhau	. 39
Tabela 39: Análise SWOT à jazida fóssil da Macela	. 39
Tabela 40: Análise SWOT à jazida fóssil do Figueiral	. 40
Tabela 41: Análise SWOT à jazida fóssil da Pedreira do Campo	. 41
Tabela 42: Análise SWOT à jazida fóssil da zona do Aeroporto	. 41
Tabela 43: Proposta de classificação das jazidas fósseis do Paleoparque de Santa Maria	
segundo o seu interesse turístico e científico	. 42
-	

Tabela 44: Objetivos específicos e metas das ações de conservação4	45
Tabela 45: Ações de conservação, orçamento previsto e calendário de implementação	45
Tabela 46: Objetivos específicos e metas das ações de monitorização	46
Tabela 47: Ações de monitorização, orçamento previsto e calendário de implementação	46
Tabela 48: Objetivos específicos e metas das ações de promoção e comunicação	47
Tabela 49: Ações de promoção e comunicação, orçamento previsto e calendário de	
implementação	47
Tabela 50: Ações de promoção e comunicação, orçamento previsto e calendário de	
implementação	49

1. Contextualização

3.1 Enquadramento geográfico

O Arquipélago dos Açores localiza-se no oceano Atlântico norte ocupando uma faixa definida pelas seguintes coordenadas geográficas: 39º 43' 23'' (Ponta Norte – Ilha do Corvo) e 36º 55' 43'' (Ponta do Castelo – Ilha de Santa Maria) de latitude norte; 24º 46' 15'' (Ilhéus das Formigas – Ilha de Santa Maria) e 31º 16' 24'' (Ilhéu de Monchique – Ilha das Flores) de longitude oeste.



Figura 1: Arquipélago dos Açores no mundo

As ilhas encontram-se agrupadas atendendo à proximidade geográfica: Grupo Ocidental (Corvo e Flores); Grupo Central (Terceira, Graciosa, São Jorge, Pico e Faial); Grupo Oriental (São Miguel e Santa Maria). O Grupo Central distancia-se cerca de 150 km e de 240 km dos Grupos Oriental e Ocidental, respetivamente.



Figura 2: Arquipélago dos Açores e Ilha de Santa Maria

Santa Maria é a ilha mais meridional e oriental do arquipélago, separada da ilha de São Miguel por uma distância de 81 km (ou cerca de 44 milhas náuticas) para norte, distância medida entre a Ponta dos Frades em Santa Maria, e a Vila do Povoação, em São Miguel.

A ilha ocupa uma área total de 97 km², com um comprimento da linha de costa de 78 km. A população residente é de 5414 habitantes (Censos 2021) a maioria dos quais reside na freguesia de Vila do Porto, sede do único concelho da ilha, constituído por cinco freguesias: Vila do Porto, São Pedro, Almagreira, Santa Bárbara e Santo Espírito.

O clima é predominantemente temperado, com verão seco, e temperaturas do ar que variam em média entre os 11,5°C de mínima no mês de fevereiro e os 25.3°C de máxima no mês de agosto e uma humidade relativa do ar, em média entre 1131 por m² no mês de novembro e os 221 m² no mês de junho.

3.1 As jazidas fósseis da ilha de Santa Maria – descrição e delimitação geográfica

A história geológica da ilha de Santa Maria teve início há cerca de seis milhões de anos. As diversas etapas de formação da ilha, associadas aos movimentos transgressivos e regressivos do mar, fizeram com que animais e plantas marinhas fossem cobertos por sedimentos, assim os preservando. Por sua vez, um processo de soerguimento da ilha de Santa Maria relativamente aos fundos oceânicos, iniciado há cerca de três milhões e meio de anos e que se prolongou até à atualidade, promoveu a emersão desses sedimentos contendo fósseis marinhos, os quais, por ação da erosão, acabaram expostos.

Assim, a mais oriental e antiga ilha do arquipélago dos Açores possui fósseis marinhos únicos, no contexto regional e nacional, e as suas jazidas fossilíferas constituem um verdadeiro laboratório ao ar livre, com relevância internacional, conforme atestam estudos científicos recentes. Pelas suas particularidades, a história e o património geológico e paleontológico de Santa Maria exigem uma interpretação e divulgação que seja acessível a todos os que vivem ou rumam à ilha.



Figura 3: Mapa da ilha de Santa Maria com a localização das 20 jazidas fossilíferas conhecidas. 1 - Ponta dos Frades, 2 - Cré, 3 - Lagoínhas, 4 - Ponta do Norte, 5 - Ponta Negra, 6 - Ponta do Cedro, 7 - Ponta do Castelo, 8 - Pedraque-pica, 9 - Vinha Velha, 10 - Pedrinha da Cré, 11 - Baía de Nossa Senhora, 12 - Malbusca, 13 – Falha Oeste da Malbusca, 14 – Gruta dos Icnofósseis, 15 - Praia do Calhau, 16 - Macela, 17 - Prainha, 18 - Figueiral, 19 - Pedreira do Campo, 20 - Área do Aeroporto As jazidas fósseis do Paleoparque de Santa Maria sobrepõem-se com outras áreas classificadas, nomeadamente com áreas protegidas do Parque Natural da Ilha de Santa Maria e com geossítios do Geoparque Mundial da UNESCO, Geoparque Açores. Das 20 jazidas fósseis identificadas no Paleoparque de Santa Maria, apenas a jazida da Área do Aeroporto não se insere em Área Protegida do Parque Natural da Ilha de Santa Maria, conforme figura 4 e tabela 1.



SMA13 - Área Protegida de Gestão de Recursos da Costa Sul

Figura 4: Localização das Jazidas Fósseis de Santa Maria em relação às áreas protegidas do Parque Natural da Ilha de Santa Maria

Tabela 1: Relação da localização das jazidas fósseis do Paleoparque com as áreas protegidas do Parque Natural da Ilha de Santa Maria

Jazida Fóssil	Área Protegida do Parque Natural da Ilha de Santa Maria em que se insere
Ponta dos Frades	APP Barreiro da Faneca (SMA08)
Cré	APP Barreiro da Faneca (SMA08)
Lagoínhas	APP Barreiro da Faneca (SMA08)
Ponta do Norte	APP Barreiro da Faneca (SMA08)
Ponta Negra	APP Baía de São Lourenço (SMA09)
Ponta do Cedro	APGHE da Baía do Cura (SMA06)
Ponta do Castelo	APGHE Ponta do Castelo (SMA05)
Pedra que Pica	APGHE Ponta do Castelo (SMA05)
Vinha Velha	APGHE Ponta do Castelo (SMA05)
Pedrinha da Cré	APGHE Ponta do Castelo (SMA05)
Baía de Nossa Senhora	APGHE Ponta do Castelo (SMA05)
Malbusca	APGHE Ponta do Castelo (SMA05)
Falha Oeste de Malbusca	APGHE Ponta do Castelo (SMA05)
Gruta dos Icnofósseis	APGHE Ponta do Castelo (SMA05)
Praia do Calhau	MN Pedreira do Campo, Figueiral e Prainha (SMA03)
Macela	MN Pedreira do Campo, Figueiral e Prainha (SMA03)
Prainha	MN Pedreira do Campo, Figueiral e Prainha (SMA03)
Figueiral	MN Pedreira do Campo, Figueiral e Prainha (SMA03)
Pedreira do Campo	MN Pedreira do Campo, Figueiral e Prainha (SMA03)
Área do Aeroporto	

APP – Área de Paisagem Protegida; APGHE – Área Protegida para Gestão de Habitats e Espécies; APGR – Área Protegida para Gestão de Recursos; MN – Monumento Natural.

Das 20 jazidas fósseis do Paleoparque, 12 localizam-se em geossítios do Geoparque Açores, Geoparque Mundial da UNESCO, conforme figura 5 e tabela 2.



Figura 5 Localização das Jazidas Fósseis de Santa Maria em relação aos geossítios do Geoparque Açores, Geoparque Mundial da UNESCO

Tabela 2: Relação da localização das jazidas fósseis do Paleoparque com os geossítios do Geoparque Açores, Geoparque Mundial da UNESCO

Jazida Fóssil	Geossítio em que se insere
Ponta dos Frades	Baía da Cré
Cré	Baía da Cré
Lagoínhas	Baía do Tagarete e Ponta do Norte
Ponta do Norte	Baía do Tagarete e Ponta do Norte
Ponta Negra	Baía de São Lourenço
Ponta do Cedro	
Ponta do Castelo	Ponta do Castelo
Pedra que Pica	Ponta do Castelo
Vinha Velha	
Pedrinha da Cré	
Baía de Nossa Senhora	
Malbusca	
Falha Oeste de Malbusca	
Gruta dos Icnofósseis	
Praia do Calhau	Praia Formosa e Praínha
Macela	Praia Formosa e Praínha
Prainha	Praia Formosa e Praínha
Figueiral	Figueiral
Pedreira do Campo	Pedreira do Campo
Área do Aeroporto	

Seguidamente são apresentadas as jazidas fósseis de Santa Maria, de modo sucinto, bem como a sua delimitação geográfica e definição de zonas tampão nas jazidas onde se verifica essa pertinência, pela vulnerabilidade da envolvente e acessibilidade a atividades antropogénicas.

É indicada para cada jazida fóssil a sua classificação, conforme definido no n.º 1 do artigo 9.º do Decreto Legislativo Regional n.º 11/2018/A, sendo as jazidas fósseis de classe 1 de relevância internacional; de classe 2, relevância nacional e de classe 3, relevância regional, considerando o valor natural e estético em presença, a raridade e relevância para a comunidade científica do património paleontológico, o potencial educativo e de visitação sustentável desses locais. A metodologia usada para esta classificação trata-se de uma revisão dos critérios de geoconservação usados por anteriores autores (Lima, 2007)¹ a fim

¹ Lima, E.A. (2007) Património geológico dos Açores: valorização de locais com interesse geológico das áreas ambientais, contributo para o ordenamento do território. 108 pp. Tese de Mestrado, Departamento de Biologia, Universidade dos Açores.

de melhor descrever e classificar jazidas fósseis na Ilha de Santa Maria segundo metodologias adaptadas à sua natureza insular oceânica, tendo originado a publicação de um artigo científico com a apresentação e resultados da classificação (Ávila *et al*, 2015)².

No anexo I apresenta-se a descrição detalhada das jazidas fósseis.

² Ávila, S.; Cachão, M.; Ramalho, R.S.; Botelho, A.Z.; Madeira, P.; Rebelo, A.C.; Cordeiro, R.; Melo, C.; Hipólito, A.; Ventura; M.A.; Lipps, J.H. (2015) *The Palaeontological Heritage of Santa Maria Island* (*Azores: NE Atlantic*): a *Re-evaluation of Geosites in GeoPark Azores and Their Use in Geotourism*; The European Association for Conservation of the Geological Heritage.

Jazida Fóssil da Ponta dos Frades:

Tabela 3: Caraterização da jazida fóssil da Ponta dos Frades

Localização	Costa Norte; Freguesia de São Pedro
Classificação	Classe 3 – interesse regional
Acessibilidade	Pedestre; nível de dificuldade médio
Idade geológica	Pliocénica
Biodiversidade fóssil	Icnofósseis de equinodermes; somatofósseis de corais, equinodermes,
	moluscos gastrópodes e peixes



Figura 6: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Ponta dos Frades

Jazida Fóssil da Cré:

Tabela 4: caraterização da jazida fóssil da Cré

Localização	Norte; Freguesia de São Pedro
Classificação	Classe 2 – interesse nacional
Acessibilidade	Pedestre; nível de dificuldade fácil
Idade geológica	Pliocénico (cerca de 4Ma)
Biodiversidade fóssil	Moluscos gastrópodes; moluscos bivalves; rodólitos; ossos de cetáceos;
	dentes de tubarão; equinodermes; briozoários



Figura 7: Delimitação geográfica e zona tampão da jazida fóssil da Cré

Jazida Fóssil das Lagoínhas

Tabela 5: Caraterização da jazida fóssil das Lagoínhas

Localização	Norte; freguesia de Santa Bárbara
Classificação	Classe 2 – interesse nacional
Acessibilidade	Pedestre e marítima; Nível de dificuldade médio
Idade geológica	Plistocénica (130.000 a 120.000 anos)
Biodiversidade fóssil	Algas calcárias; moluscos; briozoários; equinodermes; icnofósseis de
	moluscos bivalves



Figura 8: Delimitação geográfica da jazida fóssil das Lagoínhas

Jazida Fóssil da Ponta do Norte

Tabela 6: caraterização da jazida fóssil da Ponta do Norte

Localização	Norte; freguesia de Santa Bárbara
Classificação	Classe 3 – interesse regional
Acessibilidade	Terrestre e marítima; Nível de dificuldade difícil
Idade geológica	Pliocénico
Biodiversidade fóssil	Moluscos gastrópodes e bivalves



Figura 9: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Ponta do Norte.

Jazida Fóssil da Ponta Negra

Localização	Baía de São Lourenço; costa nordeste; freguesia de Santa Bárbara
Classificação	Classe 3 – interesse regional
Acessibilidade	Terrestre e marítima; Nível de dificuldade fácil
Idade geológica	Pliocénico
Biodiversidade fóssil	Cetáceos; icnofósseis de crustáceos e equinodermes; rodólitos;
	moluscos bivalves e gastrópodes





Jazida Fóssil da Ponta do Cedro

Tabela 8: Caraterização da jazida fóssil da Ponta do Cedro

Localização	Costa leste; freguesia de Santo Espírito
Classificação	Classe 2 – interesse nacional
Acessibilidade	Terrestre e marítima; Nível de dificuldade médio
Idade geológica	Pliocénico (Entre 4,1 e os 3,5 Ma)
Biodiversidade fóssil	Vermes; moluscos gastrópodes e bivalves; corais; briozoários; equinodermes e algas coralinas; icnofósseis de peixes (raias); bioturbação
Outros	Sequências de deltas de lava; progressão geológica



Figura 11: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Ponta do Cedro

Jazida Fóssil da Ponta do Castelo

Tabela 9: Caraterização	da jazida fóssil (da Ponta do Castelo.
-------------------------	--------------------	----------------------

Localização	Costa sudeste; freguesia de Santo Espírito
Classificação	Classe 1 – Interesse Internacional
Acessibilidade	Pedestre e marítima. Nível de dificuldade fácil
Idade geológica	Pliocénico (4.13 \pm 0.19 Ma)
Biodiversidade fóssil	Moluscos gastrópodes e bivalves; rodólitos; equinodermes; briozoários;
	corais
Outros	Mega ondulações



Figura 12: Delimitação geográfica e zona tampão da jazida fóssil da Ponta do Castelo

Jazida Fóssil da Pedra que Pica

Localização	Costa sul; freguesia de Santo Espírito
Classificação	Classe 1 – interesse internacional
Acessibilidade	Pedestre e marítima; Nível de dificuldade médio
Idade geológica	Miocénico
Biodiversidade fóssil	Moluscos gastrópodes e bivalves; equinodermes; cracas; braquiópodes; briozoários; algas calcárias; corais; dentes de peixe; dentes de tubarão; ossos de cetáceos. Icnofósseis de equinodermes
Outros	Coquina

Tabela 10: Caraterização da jazida fóssil da Pedra que Pica



Figura 13: Delimitação geográfica da Jazida fóssil da Pedra que Pica.

Jazida Fóssil da Vinha Velha

Localização	Costa sul; freguesia de Santo Espírito			
Classificação	Classe 3 – Interesse regional			
Acessibilidade	Terrestre e marítimo; Nível de dificuldade médio			
Idade geológica	Plistocénico			
Biodiversidade fóssil	Moluscos; briozoários; equinodermes; pássaros			

Tabela 11: Caraterização da jazida fóssil da Vinha Velha



Figura 14: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Vinha Velha.

Jazida Fóssil da Pedrinha da Cré

Localização	Costa Sul, freguesia de Santo Espírito			
Classificação	Classe 3 – interesse regional			
Acessibilidade	Marítima; Nível de dificuldade médio			
Idade geológica	~400.000 anos			
Biodiversidade fóssil	Moluscos			

Tabela 12: caraterização da jazida fóssil da Pedrinha da Cré



Figura 15: Delimitação Geográfica da Jazida fóssil da Pedrinha da Cré

Jazida Fóssil da Baía de Nossa Senhora

Localização	Costa Sul, freguesia de Santo Espírito			
Classificação	Classe 3 – interesse regional			
Acessibilidade	Marítima; Nível de dificuldade médio			
Idade geológica	Pliocénico			
Biodiversidade fóssil	Algas calcárias; moluscos gastrópodes e bivalves; equinodermes; icnofósseis			

Tabela 13: caraterização da jazida fóssil da Pedrinha da Cré



Figura 16: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Baía de Nossa Senhora.

Jazida Fóssil de Malbusca

Localização	Costa Sul, freguesia de Santo Espírito
Classificação	Classe 1 – interesse internacional
Acessibilidade	Marítima; Nível de dificuldade difícil
Idade geológica	Pliocénico (4-5 Ma)
Biodiversidade fóssil	Rodólitos; cracas; moluscos bivalves; icnofósseis de raias; briozoários;
	algas calcárias; equinodermes; icnofósseis
Outros	Leito de tempestade

Tabela 14: Caracterização da jazida fóssil de Malbusca



Figura 17: Delimitação geográfica da jazida fóssil de Malbusca

Jazida Fóssil da falha Oeste de Malbusca

Localização	Costa Sul, freguesia de Santo Espírito			
Classificação	Classe 3 – interesse regional			
Acessibilidade	Pedestre e Marítima; Nível de dificuldade difícil			
Idade geológica	Pliocénico (4-5 Ma)			
Biodiversidade fóssil	Rodólitos; icnofósseis e fósseis traço de vermes e peixes			

Tabela 15: Caraterização da jazida fóssil da Falha Oeste de Malbusca



Figura 18: Delimitação Geográfica da jazida fóssil da Falha Oeste de Malbusca

Jazida Fóssil da Gruta dos Icnofósseis

Localização	Costa Sul, freguesia de Santo Espírito
Localização	
Classificação	Classe 3 – interesse regional
Acessibilidade	Marítima; Nível de dificuldade médio
Idade geológica	Pliocénico (4-5 Ma); e plistocénico
Biodiversidade fóssil	Icnofósseis de vermes; equinodermes; Moluscos bivalves; cracas;
	vértebras de peixes; rodólitos

Tabala 16: Caratorizaçã	o da	iazida	fóssil da	Gruta	doc	Icnofóccoic
Tabela 16: Curuterizaçã	o uu	jaziaa	jossii uu	Grutu	uosi	chojosseis



Figura 19: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Gruta dos Icnofósseis.

Jazida Fóssil da Macela

Localização	Costa Sul, freguesia de Almagreira			
Classificação	Classe 3 – interesse regional			
Acessibilidade	Pedestre; Nível de dificuldade fácil			
Idade geológica	liocénico (4-5 Ma)			
Biodiversidade fóssil	Moluscos bivalves e gastrópodes			
Outros	Ripple marks			

Tabela 17: 0	Caraterização	da jazida	fóssil d	a Macela
--------------	---------------	-----------	----------	----------



Figura 20: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Macela

Jazida Fóssil da Praia do Calhau

Localização	Costa Sul, freguesia de Almagreira
Classificação	Classe 2 – interesse nacional
Acessibilidade	Pedestre; Nível de dificuldade fácil
Idade geológica	Plistocénico
Biodiversidade fóssil	Icnofósseis de equinodermes; crosta algal; moluscos bivalves

Tabela 18: caraterização jazida fóssil da Praia do Calhau



Figura 21: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Praia do Calhau

Jazida Fóssil da Praínha

Localização	Costa Sul, freguesia de Almagreira
Classificação	Classe 2 – interesse nacional
Acessibilidade	Pedestre; Nível de dificuldade fácil
Idade geológica	Plistocénico
Biodiversidade fóssil	Crosta algal; moluscos bivalves;

Tabela 19: Caraterização jazida fóssil da Prainha



Figura 22: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Praínha

Jazida Fóssil do Figueiral

Tabela 20:	Caraterização	da jazida	fóssil do	Figueiral
------------	---------------	-----------	-----------	-----------

Localização	Costa Sul, freguesia de Almagreira
Classificação	Classe 2 – interesse nacional
Acessibilidade	Pedestre; Nível de dificuldade fácil
Idade geológica	Pliocénico
Biodiversidade fóssil	Moluscos gastrópodes e bivalves; algas calcárias; rodólitos; briozoários;
	equinodermes; foraminíferos; dentes de tubarão; cracas
Outros	Forno da Cal nas imediações



Figura 23: Delimitação geográfica e zona tampão da jazida fóssil do Figueiral

Jazida Fóssil da Pedreira do Campo

Localização	Facho, freguesia de Vila do Porto
Classificação	Classe 2 – interesse nacional
Acessibilidade	Pedestre; Nível de dificuldade fácil
Idade geológica	Pliocénico
Biodiversidade fóssil	Rodólitos; foraminíferos; corais; moluscos bivalves e gastrópodes;
	briozoários, equinodermes, algas calcárias

Tabela 21: Caraterização da jazida fóssil da Pedreira do Campo



Figura 24: Delimitação geográfica da jazida Fóssil da Pedreira do Campo

Jazida Fóssil do Aeroporto

Localização	Ginjal; freguesia de Vila do Porto
Classificação	Classe 1 – interesse internacional
Acessibilidade	Pedestre; Nível de dificuldade fácil
Idade geológica	Plistocénico
Biodiversidade fóssil	Não registado.



Figura 25: Delimitação geográfica da jazida fóssil do Aeroporto

3.1 Enquadramento legal

Em 2012, foi efetuada a primeira alteração ao Decreto Legislativo Regional n.º 47/2008/A que criou o Parque Natural da Ilha de Santa Maria, com o principal propósito de criar proteção legal para o património paleontológico da ilha de Santa Maria, tendo-se criado regulamentação própria, consagrada nos artigos 24.ºA e seguintes do Decreto Legislativo Regional n.º 39/2012/A que alterou o diploma referido anteriormente.

Não obstante, sendo consensual a singularidade e a consequente pertinência de atribuir visibilidade, de regulamentar os usos e estabelecer uma adequada estratégia de divulgação e promoção do património paleontológico de Santa Maria, o Governo Regional dos Açores criou o Paleoparque de Santa Maria, preconizado no Decreto Legislativo Regional n.º 11/2018/A de 28 de agosto. Conforme artigo 14.º do referido diploma, o Paleoparque de Santa Maria é dotado de um plano de ação, que se consagra no atual documento, aprovado por portaria do membro do Governo Regional com competência em matéria de ambiente, ouvido o conselho consultivo.

3.1 Estrutura de Gestão e coordenação

O Paleoparque de Santa Maria é composto por um diretor e um conselho consultivo. O cargo de diretor é assumido, por inerência e em acumulação não remunerada, pelo diretor do Parque Natural da Ilha de Santa Maria. A gestão, o funcionamento e as atividades do Paleoparque de Santa Maria, incluindo o necessário apoio técnico e administrativo, são assegurados pelo Serviço de Ambiente e Alterações Climáticas de Santa Maria.

Compete ao Diretor do Paleoparque:

- ✓ Representar o Paleoparque de Santa Maria;
- Administrar os interesses específicos, superintender e dirigir a atividade de gestão e o funcionamento do Paleoparque;
- ✓ Exercer o poder de orientação e decisão quanto aos atos e atividades da competência dos órgãos de gestão do Paleoparque, e no plano de ação do Paleoparque;
- Executar as medidas contidas nos instrumentos de gestão aplicáveis e no plano de ação do Paleoparque;

- ✓ Elaborar pareceres, estudos e informações necessárias à atividade de gestão do Paleoparque ou que lhe sejam solicitados pelos departamentos da Secretaria Regional do Ambiente e Alterações Climáticas;
- ✓ Avaliar e promover ações coordenadas com as autarquias locais e outras entidades, sempre que se justifiquem;
- Acompanhar e avaliar sistematicamente a atividade desenvolvida no Paleoparque, bem como elaborar relatórios anuais de atividade;
- Elaborar relatórios periódicos de estado do Paleoparque, submetendo-os à apreciação prévia do conselho consultivo;
- ✓ Exercer as demais funções que lhe forem conferidas por lei ou delegadas.

O conselho consultivo do Paleoparque de Santa Maria é constituído pelas entidades seguintes:

- ✓ Diretor do Paleoparque de Santa Maria, que preside;
- ✓ Um representante da Associação Internacional de Paleontologia;
- Um representante da Câmara Municipal de Vila do Porto;
- ✓ Um representante da Universidade dos Açores;
- ✓ Um representante do Geoparque Açores;
- Um representante das empresas de animação turística que desenvolvam atividades de turismo de natureza com sede ou representação permanente na ilha de Santa Maria;
- ✓ Um representante das organizações não-governamentais de ambiente com sede ou representação permanente na ilha de Santa Maria;
- ✓ Um representante da Escola Básica e Secundária de Santa Maria;

Compete ao Conselho Consultivo do Paleoparque:

- Emitir parecer sobre a proposta de plano de ação do Paleoparque de Santa Maria e avaliar a sua implementação;
- ✓ Apreciar os relatórios anuais de atividades do Paleoparque;
- Apreciar os relatórios periódicos de estado do Paleoparque, precedendo a respetiva submissão à Secretaria Regional do Ambiente e Alterações Climáticas;
- ✓ Dar parecer sobre qualquer assunto com interesse para o Paleoparque de Santa Maria;
- O Paleoparque de Santa Maria dispõe do apoio científico do Departamento de Biologia da Universidade dos Açores.
2. Processo Participativo com *stakeholders*

2.1 Resumo das reuniões

Com o propósito de cumprir com a obrigatoriedade de aprovar um plano de ação para o Paleoparque de Santa Maria, a Direção Regional do Ambiente estabeleceu com a Fundação Gaspar Frutuoso o contrato n.º 34/DRA/2019 de aquisição de serviços para a "Elaboração do Plano de Ação do Paleoparque de Santa Maria", do qual resultaram 4 relatórios, que servem de base e fundamento ao atual documento. Neste processo foram realizadas 2 reuniões de trabalho, ambas a 16 de janeiro de 2020, com os membros do Conselho Consultivo do Paleoparque de Santa Maria que se configuram os *stakeholders* da área em questão. Durante as referidas reuniões efetuaram-se análises SWOT ao Paleoparque de Santa Maria e a cada jazida fóssil em particular, tendo-se recebido contributos e debatido sugestões, cujos consensos se encontram refletidos no presente documento.

Participaram nas referidas reuniões a diretora do Paleoparque à data, que presidiu; o representante da Associação Internacional de Paleontologia, Prof. Dr. Sérgio Ávila; o representante do Município de Vila do Porto, vereador Ricardo Sousa; o representante do Clube de Amigos e Defensores do Património Cultural e Natural, Prof. José de Andrade Melo; o gerente da empresa de animação turística SMATUR, Dr. Miguel Marques; a presidente do Conselho Executivo da Escola Básica e Secundária de Santa Maria, Prof.ª Carla Roque; o gerente da empresa de animação turística Paraíso Radical, Sr. Marco Carvalho; o gerente da empresa de animação turística Paraíso Radical, Sr. Marco Carvalho; o gerente da empresa de animação turística Ilha A Pé, Eng.º Ioannis Rousseaux. Assistiram ainda, como convidadas, a Dr.ª Zita Botelho e a Dr.ª Rita Ávila, representantes da Fundação Gaspar Frutuoso.

2.2 <u>Análise SWOT – pontos fortes, pontos fracos, oportunidades e ameaças</u>

A reunião de trabalho debruçou-se sobre uma análise meticulosa, avaliando o Paleoparque como um todo, bem como cada jazida individualmente, com o intuito de se obter uma caraterização realista e detalhada da situação de referência. Da avaliação efetuada ao Paleoparque em geral, destacam-se os consensos que se elencam na seguinte Tabela.

Tabela 23: Análise SWOT

	Forças (Pontos Fortes)		Fraquezas (Pontos Fracos)
~	Singularidade ao nível da região;	✓	Falta de estudos sobre a capacidade de carga
~	Importância do património paleontológico		das jazidas com potencial turístico;
	para o turismo de natureza;	~	Falta de informação turística adequada;
~	Conhecimento científico dos guias da	✓	Baixo aproveitamento do Passeio Marítimo
	Natureza;		pelas empresas em Santa Maria;
~	Casa dos Fósseis - divulgação do património	~	Falta de homologação dos trilhos da "Rota dos
	paleontológico;		Fósseis" (ex., o Passeio Marítimo e o Trilho das
~	Atividades de educação ambiental e oferta		Lagoínhas);
	educativa ao nível da paleontologia;	~	Falta de livros infantojuvenis acerca dos
~	Legislação relativa à criação do Paleoparque		fósseis;
	de Santa Maria;	✓	Poucos livros de divulgação científica sobre o
~	Utilização de tecnologia de realidade virtual		património paleontológico;
	para educação e sensibilização ambiental.	✓	Falta de legendagem em inglês do filme "Santa
			Maria, a ilha que nasceu duas vezes";
		✓	Falta de um "Código de conduta" para a
			visitação das jazidas fósseis;
		~	Falta de formação específica para professores
			na área da Paleontologia
	Oportunidades		Ameaças
~	Oportunidades Emprego qualificado;	~	Ameaças Sazonalidade turística;
* *	Oportunidades Emprego qualificado; Possibilidade de se criar legislação	~ ~	Ameaças Sazonalidade turística; Degradação da qualidade ambiental, erosão e
* *	Oportunidades Emprego qualificado; Possibilidade de se criar legislação inovadora para a homologação do Passeio	* *	Ameaças Sazonalidade turística; Degradação da qualidade ambiental, erosão e pisoteio nas jazidas pelos visitantes;
*	Oportunidades Emprego qualificado; Possibilidade de se criar legislação inovadora para a homologação do Passeio Marítimo (seria o primeiro em todo o	* * *	Ameaças Sazonalidade turística; Degradação da qualidade ambiental, erosão e pisoteio nas jazidas pelos visitantes; Recolha e o comércio de fósseis;
* *	Oportunidades Emprego qualificado; Possibilidade de se criar legislação inovadora para a homologação do Passeio Marítimo (seria o primeiro em todo o Atlântico e Mediterrâneo);	* * * *	Ameaças Sazonalidade turística; Degradação da qualidade ambiental, erosão e pisoteio nas jazidas pelos visitantes; Recolha e o comércio de fósseis; A inexistência de informação sobre as jazidas
* * *	Oportunidades Emprego qualificado; Possibilidade de se criar legislação inovadora para a homologação do Passeio Marítimo (seria o primeiro em todo o Atlântico e Mediterrâneo); Conceção e publicação de livros de	* * *	Ameaças Sazonalidade turística; Degradação da qualidade ambiental, erosão e pisoteio nas jazidas pelos visitantes; Recolha e o comércio de fósseis; A inexistência de informação sobre as jazidas fósseis;
* *	Oportunidades Emprego qualificado; Possibilidade de se criar legislação inovadora para a homologação do Passeio Marítimo (seria o primeiro em todo o Atlântico e Mediterrâneo); Conceção e publicação de livros de divulgação científica e de materiais	* * * *	Ameaças Sazonalidade turística; Degradação da qualidade ambiental, erosão e pisoteio nas jazidas pelos visitantes; Recolha e o comércio de fósseis; A inexistência de informação sobre as jazidas fósseis; Experiências menos positivas na visitação à
✓ ✓ ✓	Oportunidades Emprego qualificado; Possibilidade de se criar legislação inovadora para a homologação do Passeio Marítimo (seria o primeiro em todo o Atlântico e Mediterrâneo); Conceção e publicação de livros de divulgação científica e de materiais educativos com conteúdos infantojuvenis;	✓ ✓ ✓ ✓	Ameaças Sazonalidade turística; Degradação da qualidade ambiental, erosão e pisoteio nas jazidas pelos visitantes; Recolha e o comércio de fósseis; A inexistência de informação sobre as jazidas fósseis; Experiências menos positivas na visitação à "Casa dos Fósseis".
✓ ✓ ✓	Oportunidades Emprego qualificado; Possibilidade de se criar legislação inovadora para a homologação do Passeio Marítimo (seria o primeiro em todo o Atlântico e Mediterrâneo); Conceção e publicação de livros de divulgação científica e de materiais educativos com conteúdos infantojuvenis; Produção de vídeos/documentários de TV	✓ ✓ ✓ ✓	Ameaças Sazonalidade turística; Degradação da qualidade ambiental, erosão e pisoteio nas jazidas pelos visitantes; Recolha e o comércio de fósseis; A inexistência de informação sobre as jazidas fósseis; Experiências menos positivas na visitação à "Casa dos Fósseis".
✓ ✓ ✓	Oportunidades Emprego qualificado; Possibilidade de se criar legislação inovadora para a homologação do Passeio Marítimo (seria o primeiro em todo o Atlântico e Mediterrâneo); Conceção e publicação de livros de divulgação científica e de materiais educativos com conteúdos infantojuvenis; Produção de vídeos/documentários de TV acerca dos fósseis de Santa Maria;	✓ ✓ ✓	Ameaças Sazonalidade turística; Degradação da qualidade ambiental, erosão e pisoteio nas jazidas pelos visitantes; Recolha e o comércio de fósseis; A inexistência de informação sobre as jazidas fósseis; Experiências menos positivas na visitação à "Casa dos Fósseis".
✓ ✓ ✓	Oportunidades Emprego qualificado; Possibilidade de se criar legislação inovadora para a homologação do Passeio Marítimo (seria o primeiro em todo o Atlântico e Mediterrâneo); Conceção e publicação de livros de divulgação científica e de materiais educativos com conteúdos infantojuvenis; Produção de vídeos/documentários de TV acerca dos fósseis de Santa Maria;	✓ ✓ ✓	Ameaças Sazonalidade turística; Degradação da qualidade ambiental, erosão e pisoteio nas jazidas pelos visitantes; Recolha e o comércio de fósseis; A inexistência de informação sobre as jazidas fósseis; Experiências menos positivas na visitação à "Casa dos Fósseis".
✓ ✓ ✓ ✓	Oportunidades Emprego qualificado; Possibilidade de se criar legislação inovadora para a homologação do Passeio Marítimo (seria o primeiro em todo o Atlântico e Mediterrâneo); Conceção e publicação de livros de divulgação científica e de materiais educativos com conteúdos infantojuvenis; Produção de vídeos/documentários de TV acerca dos fósseis de Santa Maria; Ações de formação específicas para	* * *	Ameaças Sazonalidade turística; Degradação da qualidade ambiental, erosão e pisoteio nas jazidas pelos visitantes; Recolha e o comércio de fósseis; A inexistência de informação sobre as jazidas fósseis; Experiências menos positivas na visitação à "Casa dos Fósseis".
✓ ✓ ✓ ✓	Oportunidades Emprego qualificado; Possibilidade de se criar legislação inovadora para a homologação do Passeio Marítimo (seria o primeiro em todo o Atlântico e Mediterrâneo); Conceção e publicação de livros de divulgação científica e de materiais educativos com conteúdos infantojuvenis; Produção de vídeos/documentários de TV acerca dos fósseis de Santa Maria; Ações de formação específicas para professores, na área da Paleontologia;	* * * *	Ameaças Sazonalidade turística; Degradação da qualidade ambiental, erosão e pisoteio nas jazidas pelos visitantes; Recolha e o comércio de fósseis; A inexistência de informação sobre as jazidas fósseis; Experiências menos positivas na visitação à "Casa dos Fósseis".
✓ ✓ ✓ ✓	Oportunidades Emprego qualificado; Possibilidade de se criar legislação inovadora para a homologação do Passeio Marítimo (seria o primeiro em todo o Atlântico e Mediterrâneo); Conceção e publicação de livros de divulgação científica e de materiais educativos com conteúdos infantojuvenis; Produção de vídeos/documentários de TV acerca dos fósseis de Santa Maria; Ações de formação específicas para professores, na área da Paleontologia; Sinergias decorrentes do crescimento do	* * *	Ameaças Sazonalidade turística; Degradação da qualidade ambiental, erosão e pisoteio nas jazidas pelos visitantes; Recolha e o comércio de fósseis; A inexistência de informação sobre as jazidas fósseis; Experiências menos positivas na visitação à "Casa dos Fósseis".
✓ ✓ ✓ ✓ ✓	Oportunidades Emprego qualificado; Possibilidade de se criar legislação inovadora para a homologação do Passeio Marítimo (seria o primeiro em todo o Atlântico e Mediterrâneo); Conceção e publicação de livros de divulgação científica e de materiais educativos com conteúdos infantojuvenis; Produção de vídeos/documentários de TV acerca dos fósseis de Santa Maria; Ações de formação específicas para professores, na área da Paleontologia; Sinergias decorrentes do crescimento do turismo de Natureza em Santa Maria;	✓ ✓ ✓	Ameaças Sazonalidade turística; Degradação da qualidade ambiental, erosão e pisoteio nas jazidas pelos visitantes; Recolha e o comércio de fósseis; A inexistência de informação sobre as jazidas fósseis; Experiências menos positivas na visitação à "Casa dos Fósseis".

Da análise efetuada individualmente a cada jazida fóssil, obtiveram-se os consensos que se elencam de seguida.

Ponta dos Frades (jazida de interesse regional)

Tabela 24: Análise SWOT à jazida fóssil da Ponta dos Frades

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Paisagem/valor cénico	Acesso perigoso	Necessidade de guia	Destruição dos icnofósseis
Interesse científico	Registo fóssil pouco interessante	Ocorrência de icnofósseis	Erosão
Acesso por terra	Dificuldade de interpretação autónoma	Ponto de observação de aves marinhas	
		Incluído no trilho PR1SMA	
		Erosão	
		Realização de estudos científicos	

Cré (jazida de interesse nacional)

Tabela 25: Análise SWOT à jazida fóssil da Cré

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Fácil acesso	Falta de informação no local	Potencial turístico	Vegetação invasora
Qualidade do registo fóssil	Coberto vegetal excessivo e com infestantes	Interesse das empresas de turismo	Recolha não licenciada de fósseis
Fósseis de cetáceos	Necessidade de limpeza	Potencial pedagógico	Erosão
Interesse pedagógico para as escolas	Falta de sinalética no trilho PR1SMA	Recuperação da Casa da Cré	
Ações de educação ambiental do SAACSMA	Estado de degradação da Casa da Cré	Possibilidade de implementação de um trilho circular	
Paisagem/beleza cénica		Interesse histórico (extração de calcários)	
		Erosão	

Lagoínhas (jazida de interesse nacional)

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Paisagem/beleza cénica	Gado/cavalos no trilho	Moinho de água	Recolha não licenciada de fósseis
Fácil acesso a pé	Subida penosa no regresso	Trilho "fitness"	Erosão
Interesse científico	Semelhante a outras jazidas mais acessíveis (ex: Praia do Calhau)	Erosão	
Trilho pertencente à Rota dos Fósseis	Trilho não homologado		
Falta de capacidade de resposta dos meios de socorro	Falta de informação no local		
	Fraco potencial turístico		

Tabela 26: Análise SWOT à jazida Fóssil das Lagoínhas

Ponta do Norte (jazida de interesse regional)

Tabela 27: Análise SWOT à jazida fóssil da Ponta do Norte

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Interesse científico	Acesso perigoso	Erosão	Erosão
Paisagem/beleza cénica	Fraco potencial turístico		Recolha não licenciada de fósseis

Ponta Negra (jazida de interesse regional)

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameacas
Fácil acesso por terra e por mar	Falta de informação no local	Promoção do turismo em São Lourenço	Erosão
Ocorrência de ossos de cetáceos	Visitação possível somente durante a maré-baixa	Proximidade à Grande Rota e ao trilho PR6SMA	
Visitação pedagógica	Falta de uma escada de acesso	Erosão	
Visitação turística			
Proximidade de zona balnear e de veraneio			
Dificuldade de extração dos fósseis			
Atividades de educação ambiental do SAACSMA			

Tabela 28: Análise SWOT à jazida fóssil da Ponta Negra

Ponta do Cedro (jazida de interesse nacional)

Tabela 29: Análise SWOT à jazida fóssil da Ponta do Cedro

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Paisagem/beleza cénica	Difícil acesso	Interesse histórico (extração de calcários)	Erosão
Interesse científico		Erosão	
Registo fóssil			

Ponta do Castelo (jazida de interesse internacional)

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
SIC-Rede Natura 2000	Estado de abandono da Fábrica da Baleia	Fábrica da Baleia	Erosão
Ocorrência de plantas endémicas costeiras	Dificuldade de interpretação autónoma	PR4SMA e GR1SMA	Recolha não licenciada de fósseis
História geológica com muito interesse científico	Estado degradado do porto de acesso (Portinho)	Erosão	
Registo fóssil			
Jazida de interesse internacional			
Atividades de educação ambiental do SAACSMA			
Paisagem/beleza cénica			
Fábrica da Baleia nas proximidades			

Tabela 30: Análise SWOT à jazida fóssil da Ponta do Castelo

Pedra-que-pica (jazida de interesse internacional)

Tabela 31: Análise SWOT à jazida fóssil da Pedra que Pica

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Jazida de relevância internacional	Dificuldade de acesso	Interesse manifestado pelas empresas marítimo- turísticas	Destruição da jazida por pisoteio
Interesse científico		Erosão	Erosão
Paisagem deslumbrante			Recolha não licenciada de fósseis
Interesse turístico			
Interesse pedagógico			
Passeio Marítimo			

Vinha Velha (jazida de interesse regional)

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Interesse científico	Dificuldade de acesso	Proximidade à Pedra-que-Pica e à Ponta do Castelo	Erosão
Registo fóssil (ossos de aves)	Semelhante a outras jazidas de acesso mais fácil	Erosão	Recolha não licenciada de fósseis
	Fraco potencial turístico		
	Fraco potencial pedagógico		

Tabela 32: Análise SWOT à jazida fóssil da Vinha Velha

Pedrinha da Cré (jazida de interesse regional)

Tabela 33: Análise SWOT à jazida fóssil da Pedrinha da Cré

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Registo fóssil	Dificuldade de acesso	Erosão	Erosão
Interesse científico	Não tem potencial turístico		Recolha não licenciada de fósseis
	Fraco potencial pedagógico		

Baía de Nossa senhora (jazida de interesse regional)

Tabela 34: Análise SWOT à jazida fóssil da Baía de Nossa Senhora

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Interesse científico	Dificuldade de acesso	Interesse histórico (extração de calcários)	Erosão
	Fraco potencial turístico	Turismo científico	Recolha não licenciada de fósseis
	Fraco potencial pedagógico	Erosão	

Malbusca (jazida de interesse internacional)

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Registo fóssil	Dificuldade de acesso	Turismo científico	Erosão
Interesse científico	Perigo para visitação turística	Acesso através de caiaques	Recolha não licenciada de fósseis
Paisagem/beleza cénica		Erosão	

Tabela 35: Análise SWOT à jazida fóssil de Malbusca

Falha oeste da Malbusca (jazida de interesse regional)

Tabela 36: Análise SWOT à jazida fóssil da Falha Oeste de Malbusca

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Interesse científico	Acesso difícil por mar	Turismo científico	Erosão
lcnofósseis de qualidade mundial	Impróprio para pessoas com vertigens	Erosão	Recolha não licenciada de fósseis
Guiness da paleontologia (maior icnofóssil do mundo de <i>Diopatrichnus</i> isp.)	Fraco potencial turístico		
Registo fóssil			
Fácil acesso por terra			

Gruta dos icnofósseis (jazida de interesse regional)

Tabela 37: Análise SWOT à jazida fóssil da gruta dos icnofósseis

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Passeio marítimo	Dificuldade do acesso por mar	Acessível por caiaques	Erosão
Potencial turístico		Erosão	Recolha não licenciada de fósseis
Interesse por parte das empresas marítimo-turísticas			Pisoteio
Interesse científico			
Registo fóssil			

Praia do Calhau/do Castelo (jazida de interesse nacional)

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Jazida incluída na Rota dos Fósseis	Falta de informação	Proximidade ao PR6SMA	Erosão
Classificada como Monumento Natural Regional, juntamente com a Pedreira do Campo e Figueiral	A agitação marítima pode impedir a visitação	Proximidade a zonas de balnear e de veraneio	Recolha não licenciada de fósseis
Interesse científico e pedagógico		Erosão	Pisoteio
Interesse turístico			
Já utilizada para atividades de educação ambiental pelo SAACSMA			
Fácil acesso			
Incluída no PR5SMA e na GR1SMA			

Tabela 38: Análise SWOT à jazida fóssil da Praia do Calhau

Macela (jazida de interesse regional)

Tabela 39: Análise SWOT à jazida fóssil da Macela

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Paisagem/valor cénico	Fraco potencial turístico sem guia	Proximidade PR5SMA, PR6SMA e GR1SMA	Erosão
Interesse científico	Fraco potencial pedagógico	Miradouro	
Acesso fácil		Erosão	

Figueiral (jazida de interesse nacional)

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Interesse científico	Falta de informação	Existência de um Forno de cal	Recolha não licenciada de fósseis
Interesse manifestado por empresas de turismo de Natureza	Acesso interdito ao Forno de cal		
incluído no PR5SMA e na GR1SMA			
Interesse pedagógico e educativo			
Interesse histórico e cultural			
Classificado como Monumento Natural Regional			
Jazida já utilizada para atividades de educação ambiental pelo SAACSMA			
Paisagem/beleza cénica			

Tabela 40: Análise SWOT à jazida fóssil do Figueiral

Pedreira do Campo (jazida de interesse nacional)

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Existência de passadiço com percurso interpretativo	Estado de degradação do "buraco" que possibilita a visitação ao nível dos calcários	Novas atividades ou metodologias de sensibilização ambiental e de literacia científica	Vegetação ameaça tapar as lavas em almofada
Interesse científico, educativo, pedagógico e turístico	Estado de degradação do passadiço, que necessita de manutenção	Erosão	Recolha não licenciada de fósseis
Classificada como Monumento Natural Regional			Erosão
Acesso rodoviário fácil			
Paisagem			
Jazida já utilizada para atividades de educação ambiental pelo SAACSMA			
Incluída no PR5SMA e na GR1SMA			
Local utilizado pelas empresas de turismo de Natureza			

Tabela 41: Análise SWOT à jazida fóssil da Pedreira do Campo

Zona do aeroporto (jazida de interesse internacional)

Tabela 42: Análise SWOT à jazida fóssil da zona do Aeroporto

Pontos Fortes	Pontos fracos	Oportunidades	Ameaças
Interesse científico	Falta de estudos científicos	Realização de estudos científicos	
Acesso fácil			

Nas reuniões com os *stakeholders*, e conselheiros do Conselho Consultivo do Paleoparque de Santa Maria, e após análise individualizada das 20 jazidas, foi efetuada uma distinção entre as jazidas visitáveis, e as que não deverão ser promovidas para esse propósito. O critério para não classificar as jazidas como visitáveis, prenderam-se com razões de falta de segurança nos acessos, necessidades de preservação pela fragilidade da jazida ou pelo reduzido valor cénico ou turístico da jazida.

Jazida Fóssil	Interesse turístico	Interesse científico	Interesse pedagógico
Ponta dos Frades	Х	Х	
Cré	Х	Х	Х
Lagoínhas	Х	Х	
Ponta do Norte		Х	
Ponta Negra	Х	Х	Х
Ponta do Cedro		Х	
Ponta do Castelo	Х	Х	Х
Pedra que Pica	Х	Х	Х
Vinha Velha		Х	
Pedrinha da Cré		Х	
Baía de Nossa Senhora		Х	
Malbusca		Х	
Falha Oeste de Malbusca		Х	
Gruta dos Icnofósseis	Х	Х	Х
Praia do Calhau	Х	Х	Х
Macela	Х	Х	
Prainha	Х	Х	Х
Figueiral	Х	Х	Х
Pedreira do Campo	Х	Х	Х
Área do Aeroporto		Х	

Tabela 43: Proposta de classificação das jazidas fósseis do Paleoparque de Santa Maria segundo o seu interesse turístico e científico

3. Análise da situação de referência

3.1 Estado de conservação:

As jazidas fósseis da ilha de Santa Maria foram expostas por eventos associados à erosão, dado que até à ocorrência de algum fenómeno geológico, estavam recobertas com elementos vulcânicos. A partir do momento que foram expostas pelos referidos eventos geológicos, ficaram vulneráveis à erosão hídrica e eólica, ao avanço da flora, a recolhas, tanto para propósitos científicos como para colecionismo, e ao vandalismo. O nível de conservação das jazidas fósseis é variável, dependendo de fatores diversos, entre os quais, a densidade e dureza dos sedimentos, a acessibilidade e a localização, e respetiva exposição aos elementos erosivos.

Não foi efetuada, anteriormente, uma análise do estado de conservação, ou da situação de referência, pelo que se verifica necessário estabelecer uma métrica que permita graduar o nível de integridade das jazidas, à qual será sucedido um sistema de monitorização que, associado à fiscalização e monitorização periódica efetuada pelo Corpo de Vigilantes da Natureza do SAACSMA, permitirá compreender quais os fatores que mais contribuem para a conservação, bem como para a deterioração das jazidas fósseis.

3.2 <u>Ameaças:</u>

O património paleontológico é um recurso não renovável, formado em situações muito particulares, pelo que qualquer dano aos seus elementos é irreversível. Com esta premissa em consciência, as ameaças à sua integridade devem ser analisadas com rigor e sensatez, pois nesta análise reside a definição de estratégias de conservação e regulamentação do uso das jazidas fósseis.

Os principais fatores que constituem uma ameaça à integridade das jazidas fósseis da ilha de Santa Maria são:

- <u>Erosão natural</u>: a erosão causada por elementos naturais afeta de modo diferenciado a integridade das jazidas fósseis, dependendo da dureza dos sedimentos e da localização da jazida, que contribuirá para a maior ou menor exposição aos elementos. Apesar de a erosão poder ser perspetivada como uma ameaça às jazidas, pode também ser considerada uma oportunidade, dado que pode expor elementos de interesse paleontológico.
- <u>Erosão antrópica</u>: determinadas jazidas, por possuírem riqueza paleontológica no piso,
 são facilmente danificadas pelo pisoteio dos seus visitantes.
- Flora: as espécies de flora podem recobrir os sedimentos e, mais grave ainda, as suas raízes podem introduzir-se nas brechas dos sedimentos, favorecendo e acelerando a erosão das jazidas.
- <u>Recolhas ilegais</u>: O colecionismo, tanto por residentes, como por turistas, contribuiu para a diminuição de elementos de interesse nas jazidas.
- <u>Pressão turística</u>: as atividades turísticas podem ser prejudiciais ao património natural se não forem devidamente regulamentadas, nomeadamente no que concerne ao número de visitantes e áreas de passagem, e se não houver informação disponível (quer aos visitantes quer aos profissionais de turismo).

✓ <u>Alterações Climáticas</u>: sendo as alterações climáticas responsáveis por eventos climáticos extremos são, portanto, um elemento exponencial da erosão natural das jazidas.

4. Visão, missão e objetivos

<u>Visão</u>: Ser reconhecido pelo seu carácter único e inovador, pela comunidade local, regional, nacional e internacional, enquanto promotor da conservação, da valorização e da fruição do património paleontológico da Ilha de Santa Maria.

Missão: O Paleoparque de Santa Maria irá promover a conservação do seu património paleontológico, potenciando o seu valor pedagógico, científico, turístico, social e económico, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da Região.

Objetivos Gerais:

- Conservar e proteger o património paleontológico da Ilha de Santa Maria através do conhecimento, gestão, monitorização e sensibilização da população;
- Promover e consolidar a imagem do Paleoparque através de ações de informação e participação;
- Compatibilizar os valores de conservação do património paleontológico da Ilha de Santa Maria com as atividades económicas,
- Promover a sensibilização e capacitação dos agentes que intervêm nas jazidas fósseis, através de programas formativos, dotando-os de conhecimento e ferramentas para a consecução dos seus objetivos;
- Potenciar o uso científico, pedagógico e recreativo das jazidas fósseis, garantindo a sua sustentabilidade.

5. Plano de Ação

O presente capítulo apresenta a listagem das ações previstas para um período de 3 anos, bem como uma estimativa de orçamento das mesmas, e o ano previsto para a sua implementação. O orçamento previsto para a execução será assegurado pela entidade gestora, a Secretaria Regional do Ambiente e Alterações Climáticas.

As ações deste plano de ação serão articuladas com as ações do Parque Natural da Ilha de Santa Maria e com as do Geoparque Açores, Geoparque Mundial da UNESCO.

5.1 <u>Ações de conservação</u>

Objetivos Específicos	Indicadores	Metas para 2026
Manter ou melhorar o estado de conservação das jazidas fósseis	Número de situações identificadas que degradem as jazidas fósseis (a introduzir na APPSRAAC)	Redução do número de situações a cada ano

Tabela 45: Ações de conservação, orçamento previsto e calendário de implementação

Ações	Orçamento	Implementação
Fiscalização de pressões antropogénicas pelos Vigilantes da Natureza		2024-2026
Delimitação física dos "ripple-marks"	250€	2023
Iniciar o processo de classificação da Pedra que Pica como Monumento Natural		2023
Elaboração de um Código de Conduta para os visitantes das jazidas fósseis		2024
Colocação de câmara de vigilância na Pedra que Pica; Gruta dos Icnofósseis e Pedreira do Campo	10 000€	2024
Controlo de flora invasora nas jazidas fósseis da Cré e Pedreira do Campo	10 000€	2024
Estudo da colocação de passadiço amovível na Pedra que Pica	5 000€	2024
Colocação de passadiço amovível na Pedra que Pica	50 000€	2025

5.2 <u>Ações de monitorização</u>

Objetivos Específicos	Indicadores	Metas para 2026
Aumentar o conhecimento relativo ao estado de conservação	Relatórios anuais de monitorização	3 relatórios
Conhecer o impacto das atividades antropogénicas	Fichas periódicas de monitorização Formulário a introduzir na APP SRAAC de monitorização das jazidas	Submissão de 2 formulários anuais por jazida

Tabela 46: Objetivos específicos e metas das ações de monitorização

Tabela 47: Ações de monitorização, orçamento previsto e calendário de implementação

Ações	Orçamento	Implementação
Avaliação do estado de conservação das jazidas (situação de referência) e implementação de um sistema de monitorização		2024-2026
Colocação de 10 contadores nos acessos às jazidas Ponta dos Frades; Cré; Lagoínhas (caso o percurso pedestre seja homologado); Ponta Negra; Ponta do Castelo; Pedra que Pica (caso seja resistente ao salitre, e apenas depois da colocação do passadiço amovível); gruta dos Icnofósseis (caso seja resistente ao salitre, e apenas depois da colocação do cais acostável); Praia do Calhau; Figueiral e Pedreira do Campo	10 000€	2024
Avaliação da capacidade de carga das jazidas com potencial turístico	5 000€	2024
Monitorização de pressões naturais e antropogénicas	8 000€	2025

5.3 <u>Ações de promoção e comunicação</u>

Objetivos Específicos	Indicadores	Metas para 2026	
Incutir e promover o conhecimento e os valores identitários do Paleoparque junto da comunidade local e visitantes	Inquérito a amostra representativa da população residente e visitantes	Relatório dos resultados	
Criar rede de apoio local ao Paleoparque	Número de parcerias estabelecidas	Estabelecimento de pelo menos 5 parcerias	
Promover o envolvimento da comunidade local e visitantes na salvaguarda do Paleoparque	Número de participantes em ações promovidas	100/ano	
Garantir condições de visitação e interpretação turística em todas as jazidas com potencial turístico	Número de estruturas implementadas	1 estrutura por cada jazida visitável (12)	

Tabela 48: Objetivos específicos e metas das ações de promoção e comunicação

Tabela 49: Ações de promoção e comunicação, orçamento previsto e calendário de implementação

Ações	Orçamento	Implementação
Definição de plano de comunicação do Paleoparque (imagem e identidade)	2 500€	2024
Criação de um programa de parcerias com empresas e entidades locais		2024
Criação de um plano de atividades de educação e sensibilização especificamente vocacionado para o património paleontológico, direcionado para a comunidade escolar e local	4 500€	2024
Colocação na Pedreira do Campo de placa informativa com a distância até à gruta do Figueiral	250€	2024
Melhoramento da sinalética de percurso pedestre entre a Pedreira do Campo e o Figueiral	250€	2024
Colocação de placa informativa e sinalética no desvio para o forno da Cal	250€	2024
Colocação de escada de acesso na Ponta Negra	1 000€	2024
Melhoramento da acessibilidade à depressão da Pedreira do Campo	2 500€	2024
Colocação de defesas que impeçam a queda de pedras na depressão e recobrem os calcários na Pedreira do Campo	1 500€	2024

Elaboração de candidaturas a financiamento para a aquisição, recuperação e conversão da Casa da Cré, como posto de abrigo e de divulgação dos fósseis de Santa Maria		2024
Elaboração de um "Guia dos fósseis de Santa Maria"	20 000€	2024
Colocação de QR Codes para acesso a informação detalhada em todas as jazidas fósseis visitáveis	2 500€	2024
Estudo da possibilidade de colocação de cais amovível para acostagem de embarcações na Pedra que Pica e na Gruta dos Icnofósseis	5 000€	2024
Recuperação do forno da Cal	10 000€	2025
Produção de documentário televisivo sobre o património paleontológico da ilha de Santa Maria	25 000€	2025
Organização de Festival de cinema de documentários relacionados com o património natural	1 500€	2025
Organização de ações de formação para Guias do Paleoparque dirigido a profissionais do turismo e docentes da EBSSMA	5 000€	2025
Reconhecimento do Passeio Marítimo da "Rota dos Fósseis" em articulação com a Secretaria Regional do Turismo, Mobilidade e Infraestruturas		2025
Homologação, marcação e sinalização do percurso pedestre das Lagoínhas em articulação com a Secretaria Regional do Turismo, Mobilidade e Infraestruturas	2 500€	2025
Criação de website para divulgação das jazidas fósseis	2 500€	2025
Colocação de Painéis informativos nas jazidas com potencial turístico	5 000€	2025
Colocação de cais amovível para acostagem de embarcações na Pedra que Pica e na Gruta dos Icnofósseis	100 000€	2026
Produção e seleção dos conteúdos para um audioguia associado aos QR Codes	15 000€	2026
Continuação do trabalho de avaliação do nível de conhecimento e de interesse dos residentes e turistas sobre o património paleontológico existente na ilha de Santa Maria, em curso pela Universidade dos Açores	10 000€	2024-2026
Promoção dos fósseis de Santa Maria nos voos da SATA	2 500€	2024-2026
Promoção dos fósseis de Santa Maria na sala de chegadas do aeroporto de Santa Maria	1 000€	2024-2026
Dinamização de ações nas escolas com técnicos de educação ambiental do SAACSMA e cientistas	1 000€	2024-2026
Promoção de saídas de campo com técnicos de educação ambiental do SAACSMA e cientistas para a comunidade	1 000€	2024-2026
Atualizar periodicamente os conteúdos da Casa dos Fósseis		2024-2026
Promoção do Paleoparque como local privilegiado para investigação científica através do apoio a ações de divulgação científica acerca das jazidas fósseis de Santa Maria	15 000€	2024-2026

5.4 Outros

Ações	Orçamento	Implementação	
Iniciar revisão do Decreto Legislativo Regional n.º			
11/2018/A de 28 de agosto, de modo a incluir alguns		2024	
departamentos do Governo Regional dos Açores no			
Conselho Consultivo do Paleoparque			

De seguida apresenta-se a tabela resumo dos orçamentos previstos, por ano.

Tabela 50: Ações de promoção e comunicação, orçamento previsto e calendário de implementação

Orçamento	2023	2024	2025	2026	TOTAL
Ações de conservação	250€	25 000 €	50 000 €	*	75 250 €
Ações de monitorização		15 000 €	8 000 €	*	23 000 €
Ações de promoção e comunicação		50 417 €	61 667€	125 167 €	237 251 €
Total	250€	90 417 €	119 667 €	125 167 €	335 501 €

* As ações a desenvolver não têm custos.

Bibliografia

- Ávila, S.; Cachão, M.; Ramalho, R.S.; Botelho, A.Z.; Madeira, P.; Rebelo, A.C.; Cordeiro, R.; Melo, C.; Hipólito, A.; Ventura; M.A.; Lipps, J.H. (2015) *The Paleontological Heritage* of Santa Maria Island (Azores: NE Atlantic): a Re-evaluation of Geosites in GeoPark Azores and Their Use in Geotourism; The European Association for Conservation of the Geological Heritage.
- Ávila, S.; Plano de Ação do Paleoparque de Santa Maria; 2.º Relatório; 10 junho 2020. (Não publicado).
- Ávila, S.; Plano de Ação do Paleoparque de Santa Maria; 3.º Relatório; 25 outubro 2020. (Não publicado).
- Ávila, S.; Plano de Ação do Paleoparque de Santa Maria; 4.º Relatório; 17 novembro 2020. (Não publicado).
- > Decreto Legislativo Regional n.º 11/2018/A de 28 de agosto.
- > Decreto Legislativo Regional n.º 39/2012/A de 19 de setembro.
- Lima, E.A. (2007). Património geológico dos Açores: valorização de locais com interesse geológico das áreas ambientais, contributo para o ordenamento do território. 108 pp. Tese de Mestrado, Departamento de Biologia, Universidade dos Açores.
- Plano de Ação do Paleoparque de Santa Maria; 1.º Relatório; 07-outubro-2019; Fundação Gaspar Frutuoso. (Não publicado).
- Plano de Gestão das áreas Protegidas do Parque Natural de Santa Maria; 2020; Direção Regional do Ambiente. (Não publicado).



<u>Anexo I</u> – Descrição Detalhada das Jazidas Fósseis de Santa Maria; delimitação geográfica e definição de zonas tampão

1. Ponta dos Frades

A jazida da Ponta dos Frades ainda não foi formalmente descrita nem estudada em profundidade. Esta jazida Pliocénica tem um acesso estreito e potencialmente perigoso, em particular em condições de vento forte (Fig. 1). Existem icnofósseis ainda não estudados na zona inicial do carreiro que dá acesso à Ponta dos Frades. Os fósseis localizam-se no topo da jazida, numa área de cerca de 20x15 m. O reduzido número de estudos publicados em que esta jazida é referida (somente 3), reflete-se no número de espécies reportadas – somente 5 – das quais citamos a ocorrência de uma espécie de coral não identificada, o gastrópode *Basisulcata simplex* (Bronn, 1831) (= *Solarium simplex* Bronn), o equinoderme *Echinocardium* spec. 2 (Madeira *et al.*, 2011), a craca *Zullobalanus santamariaensis* Buckeridge & Winkelmann, 2010 (Winkelmann *et al.*, 2010) e o peixe *Sparisoma cretense* (Linnaeus, 1758) (cf. Ávila *et al.*, 2020).

Do alto da Ponta dos Frades, olhando para ocidente, vê-se o povoado dos Anjos e a Baía dos Anjos. A depressão entre a Ponta dos Frades e os Anjos corresponde a uma plataforma de abrasão marinha talhada pelo mar aquando do último estádio interglacial, há cerca de 120.000 a 130.000 anos atrás (Fig. 2). Nesta zona desagua uma ribeira, a qual originou um leque aluvionar. É provável que, na margem oriental da ribeira, por volta dos 10-12 m de altitude, existam fósseis do último estádio interglacial.



Figura 1: Jazida da Ponta dos Frades, na costa Norte da ilha de Santa Maria, nas proximidades dos Anjos.



Figura 2: À esquerda: Plataforma de abrasão marinha da Baía dos Anjos. Ao fundo, vê-se o povoado dos Anjos. À direita: a linha vermelha marca a altimétrica dos 10 m. A probabilidade de encontrar fósseis do último estádio interglacial é maior na margem oriental da foz da ribeira.

<figure>

Delimitação Geográfica da Jazida da Ponta dos Frades

Figura 3: Delimitação geográfica da Jazida fóssil da Ponta dos Frades

2. <u>Cré</u>

A jazida da Cré fica perto da enseada da Baía da Cré, na zona nor-noroeste de Santa Maria. Este afloramento foi historicamente conhecido por vários nomes: Boca da Cré, Forno da Cré, Furna da Cré, Casa da Cré, Escarpa da Cré e ainda por Pedreira dos Frades (Madeira *et al.*, 2011). Neste local, os sedimentos do Complexo Touril estão expostos no vale do rio Lemos, que corta os piroclastos que os recobrem, pertencentes ao Complexo Vulcânico do Pico Alto (Ramalho *et al.*, 2017). A maior parte da área é coberta por pastagens e arbustos, mas uma série de pequenos afloramentos estão expostos em cortes de estradas e pedreiras abandonadas, a sul e oeste de uma casa abandonada, conhecida por "Casa da Cré" (GPS N 37°00'04'', W25°08'10''; Fig. 24).



Figura 4. Localização da jazida da Cré, na costa norte de Santa Maria (Janssen *et al.*, 2008; Ávila *et al.*, 2018).

As secções estudadas (Fig. 4) localizam-se ao longo de uma estrada de terra que vai desde a "Casa da Cré" até uma velha pedreira já desativada, no fundo do vale (N 37°00'02'', W25°08'07''), que foi usada para a extração de calcário (Ferreira, 1961), conhecida por Pedreira dos Frades (Fig. 4). Embora não haja um afloramento contínuo, é possível registrar a maior parte da sequência com secções sobrepostas de pequena espessura (Fig. 5).

A base da coluna estratigráfica (fácies 1; Fig. 6) é formada por um conglomerado vulcânico pertencente ao complexo dos Anjos. Uma sequência de arenitos líticos fortemente bioturbados recobre o relevo erosivo no topo do conglomerado (fácies 2; Fig. 6). A ocorrência de sucessivos hiatos erosivos (fácies 3 e 4; Fig. 6), estratos com seixos rolados e com conchas de moluscos documentam retrabalhamento e transporte destes materiais para o largo, muito

provavelmente durante eventos de tempestade. A secção termina com um arenito lítico contendo alguns rodólitos e bioclastos, muito fossilífero (fácies 5), o qual está coberto por uma camada maciça de um conglomerado vulcaniclástico do Complexo do Pico Alto.



Figura 5: Jazida da Cré. A: "Casa da Cré". B: Costa Norte vista da "Casa da Cré" (são visíveis os sedimentos marinhos fossilíferos do Complexo do Touril, de cor amarelo-alaranjado). C,D: floramento da Cré, por baixo da "Casa da Cré". Em D, ao fundo, é visível em corte, a antiga pedreira da Cré/Pedreira dos Frades.

A fácies 5 (Fig. 6) é muito rica em fósseis de moluscos holoplanctónicos, em particular aproximadamente 4 m acima do relevo erosivo da base da seção, conforme se pode ver numa amostra de mão (Fig. 8), acumulando-se estes fósseis em grandes covas de *Thalassinoides* isp. (Fig.7), formando localmente agregações extremamente densas. Fora destas galerias, também se encontraram moluscos pterópodes, mas com menor frequência, preservados sob a forma de moldes internos, compostos de fibras de calcite ou matriz, bem como através de raros moldes externos.

Não é clara a razão para esta densidade tão elevada de pterópodes nestas galerias. Na maioria das jazidas Pliocénicas de Santa Maria por nós já estudadas (com exceção da Cré (16 taxa específicos), Malbusca e Ponta do Norte – estas duas últimas com um único registo), não são conhecidos fósseis de moluscos heterópodes/pterópodes.

A profusa ocorrência de conchas destes moluscos na Cré, bem como a existência abundante de ossos de cetáceos (Estevens & Ávila, 2007; Ávila *et al.*, 2015b, 2018) e de dentes de tubarão (Ávila *et al.*, 2012) (Fig. 29) leva-nos a deduzir um paleoambiente de deposição mais profundo do que os das restantes jazidas de idade similar, provavelmente localizado também a uma maior distância do litoral da ilha ou, mais provavelmente, de pontos de menor profundidade do, então, "guyot" (admitindo, neste último caso, que a primitiva ilha de Santa Maria teria sido completamente arrasada e que a jazida da Cré é contemporânea deste evento).

Duas datações efetuadas por Ramalho *et al.* (2017) na passagem do vulcanismo submarino a subaéreo no Monte Gordo, a uma altitude de 190 m e sobranceiro à jazida da Cré, deram idades de 3.63±0.09 Ma e 3.71±0.08 Ma, logo a jazida da Cré, localizada a uma altitude entre os 108 e os 120 m será mais antiga, provavelmente rondando os cerca de 4 Ma.



Figura 6: Corte estratigráfico da jazida da Cré. As fácies 1 a 5 estão descritas no texto. Os fósseis encontram-se na fácies 5.



Figura 7. Acumulação em massa de *Cavolinia marginata* (Bronn, 1862) numa galeria escavada por crustáceos na jazida da Cré, Santa Maria (DBUAF431- 1). A escala é equivalente a 10 mm (Janssen *et al.*, 2008).



Figura 8. A-C: *Thalassinoides* isp. na jazida da Cré. É no interior de alguns destes icnofósseis que se encontram as acumulações em massa de moluscos holoplanctónicos referidos no texto.

Com base na descrição detalhada de Reiss (1862: 12-13), é evidente que a localização "Bocca da Cré", de onde são reportadas as duas espécies de pterópodes descritos por Bronn (in Reiss,

1862: 36-37) é precisamente a mesma das seções estudadas por Janssen *et al*. (2008) e por Kroh *et al*. (2008). Para mais informações sobre os afloramentos fossilíferos históricos na ilha de Santa Maria e da confusão de nomes existentes na bibliografia mais antiga, consultar Madeira *et al*. (2007).

Neste momento, são conhecidas para a Cré, pelo menos 61 espécies de fósseis: 2 espécies de tubarões (Ávila *et al.*, 2012), 2 espécies de Echinodermata (Madeira *et al.*, 2011; Fig. 30), restos indeterminados de cetáceos (Estevens & Ávila, 2007; Ávila *et al.*, 2015b, 2018; Fig. 9 e Fig. 11), 1 espécie de Brachiopoda (Kroh *et al.*, 2008), 28 espécies de moluscos gastrópodes (Fig. 12), 22 espécies de moluscos bivalves (Fig. 12), 1 espécies de Coelenterata, 1 espécie de Bryozoa, 1 espécie de Annelida, e várias espécies não identificadas de Cnidaria (Ávila, dados não publicados).



Figura 9. À esquerda, dente de tubarão *Cosmopolitodus hastalis* (Agassiz, 1833). À direita, o paleontólogo italiano Fabrizio Cecca observa o osso de cetáceo que foi extraído na jazida da Cré.



Figura 10. Equinoderme *Clypeaster altus* (Leske, 1778), em corte na jazida da Cré (fila de cima). O bivalve *Pecten dunkeri* Mayer, em amostras de mão (em baixo), também na jazida da Cré.



Figura 11. A.B: extração de um fragmento de uma vértebra esquerda de uma espécie de cetáceo não identificada (Balaenopteridae?) na jazida da Cré. Muito provavelmente, outras partes esqueléticas ainda não expostas devem estar ainda preservadas *in situ* neste local. C,D: fragmento da vértebra atrás referida (DBUA-F 401) imediatamente após a recolha, em vista longitudinal (C) e em corte transversal (note-se o osso esponjoso, perfeitamente visível). E,F: aspeto da jazida da Cré após a recolha de fragmentos de ossos de cetáceos.



Figura 12. Desenhos efetuados com câmara-clara dos heterópodes e pterópodes recolhidos na jazida da Cré (Pliocénico Inferior). 1 – Atlanta sp.; vista apical (RGM 541580). 2 – Carinariidae sp.; vista ventral (protoconcha; RGM 541585). 3a-d - Heliconoides inflata (D'Orbigny, 1836); a ventral, b - apical, c - dorsal, d - umbilical (RGM 541586). 4 - Limacina cf. bulimoides (D'Orbigny, 1836); vista ventral (RGM541562). 5 – Limacina trochiformis (D'Orbigny, 1836); vista ventral (RGM 541589). 6 – Limacinidae incertae sedis; vista ventral (RGM 541591). 7a- c, 8a-d – Bowdenatheca jamaicensis Collins, 1934; 7a – vista apertural, 7b – ventral, 7c – vista lateral esquerda; 8a – vista apertural, 8b - dorsal ou ventral, 8c - apical, 8d - vista lateral (RGM 541592). 9a-b, 10 - Styliola subula (Quoy & Gaimard, 1827); 9a – vista ventral, 9b – protoconcha; 10 – dorsal (RGM 541594). 11a-c – Cuvierina (Urceolarica) intermedia (Bellardi, 1873); a – vista apertural, b – ventral, c – vista lateral esquerda (RGM 541597). 12, 13a-b - Clio (Balantium) sp. nov.; 12 e 13a - dorsal, 13b ventral (RGM 541568). 14a-c - Clio (Bellardiclio) braidensis (Bellardi, 1873); a - vista apertural, b dorsal, c - ventral (RGM 541598). 15 - Cavolinia grandis (Bellardi, 1873); dorsal (RGM 541558). 16a-c, 17a-b, 18 – Cavolinia marginata (Brönn, 1862); 16a – dorsal, 16b – lateral esquerda, 16c – ventral ; 17a - dorsal, 17b - vista lateral direita, 18 - dois espécimes, o da esquerda em vista dorsal, o da direita em vista ventral (16 - neótipo, RGM 541561; 17 - RGM 541560; 18 - RGM 541575). 19 - Diacria trispinosa (Blainville, 1821); vista dorsal (RGM 541579).

Delimitação Geográfica da Jazida da Cré



Figura 13: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Cré

Zona tampão da jazida da Cré



Figura 14: Zona tampão da Baía da Cré

3. Lagoínhas

A Baía do Tagarete é um local de beleza singular onde se pode observar a plataforma de abrasão marinha das Lagoínhas, uma das melhores jazidas Plistocénicas da ilha (Fig. 15). Esta plataforma de abrasão com cerca de 100 m de extensão lateral foi entalhada nas lavas subaéreas do Complexo Vulcânico dos Anjos, durante o último estádio interglacial (130-120.000 anos), quando o nível médio das águas do mar esteve mais alto do que está hoje (cerca de 7 m).

A jazida das Lagoínhas está integrada no trilho pedestre 3 da "Rota dos Fósseis" (cf. Fig. 16). Sobrejacente às lavas basais (fácies 1), um conglomerado basal fortemente cimentado com ~ 10 cm de espessura (fácies 2) passa lateralmente e para cima para um biostroma de algas vermelhas calcárias com ~ 30 cm de espessura (fácies 3) rico em conteúdo fossilífero. A estrutura de algas coralinas é semelhante à encontrada na Prainha, e está presentemente em fase de estudo e publicação.

De maneira semelhante ao que sucede na Vinha Velha e Prainha/Praia do Calhau, a assembleia faunística das Lagoínhas é também dominada por moluscos, com briozoários e equinodermes como componentes acessórios. Tal como na Praia do Calhau, estruturas de macrobioerosão no biostroma são atribuídas ao icnogénero *Gastrochaenolites* Leymarie, 1842 e foram produzidas pelo bivalve endolítico *Leiosolenus aristatus* (Ávila *et al.*, 2009, 2015).

As areias branco-amareladas não consolidadas sobrepostas (fácies 4) exibem espessuras de até 0,7 m e são ricas em assembleias fósseis muito bem preservadas, dominadas por moluscos. A distribuição granulométrica dessas areias é dominada pelas frações de 250 e 500 mm. Uma fina crosta de carbonato de origem pedogénica ocorre no topo dessas areias bioclásticas. Essa crosta é coberta por depósitos coluviais (fácies 5).



Figura 15. Jazida das Lagoínhas, na costa Norte da ilha de Santa Maria, vista do mar.



Figura 16. Traçado dos 4 trilhos pedestres e traçado proposto para o percurso marítimo de cariz científicoturístico à volta da Ilha de Santa Maria e respetivas paragens (desembarque previsto nas paragens a azul-claro, assim as condições de mar o permitam).

Delimitação Geográfica da Jazida das Lagoinhas



25°5'W Figura 17: Delimitação geográfica da jazida fóssil das Lagoínhas

4. Ponta do Norte

A jazida da Ponta do Norte só foi visitada por membros da equipa de investigação por uma vez, a 23 de julho de 2010 (Fig. 18). O acesso por terra é muito perigoso e faz-se por um trilho frequentado por pescadores. O depósito fossilífero de idade Pliocénica nunca foi estudado em pormenor, mas é opinião unânime dos investigadores que na altura o visitaram (Sérgio Ávila, Andreas Kroh, Mário Cachão, Carlos Melo, Ricardo Ramalho, Michael Kirby), que o registo fóssil é muito pobre, tendo sido reportadas somente 16 espécies: 9 gastrópodes e 7 bivalves.



Figura 18: Jazida da Ponta do Norte, em Santa Maria.

254W 25'3'45'W

Delimitação geográfica da Jazida da Ponta do Norte

Figura 19: Delimitação geográfica da jazida da Ponta do Norte
5. Ponta Negra

A jazida da Ponta Negra localiza-se na ponta Sul da Baía de São Lourenço (Fig. 20). Este afloramento é pouco conhecido, não existindo ainda um corte estratigráfico da jazida. O principal interesse desta jazida reside na ocorrência de vértebras de cetáceos, as quais são extremamente raras em contexto de ilhas vulcânicas.

Na base da sequência vulcano-sedimentar, está uma escoada submarina do Complexo Vulcânico do Pico-Alto (Fig. 21). Sobre estas lavas submarinas está depositado um tufo palagonítico com a característica cor alaranjada, com uma espessura de cerca de 4 m e uma extensão lateral de aproximadamente 90 m. Nas proximidades do mar, este tufo foi erodido, originando uma bancada que está localizada a uma altitude de cerca de 2 m acima do atual nível das águas do mar (Fig. 21B).

Em determinados locais, este tufo está recoberto por escoadas submarinas com uma baixa taxa de extrusão, as quais formam na base dessa unidade uma brecha com uma matriz hialoclastítica (Fig. 21C-D), resultante da fragmentação e do próprio colapso das lavas submarinas, durante o processo eruptivo; noutros locais, o tufo está recoberto por um depósito sedimentar, formando um calcarenito muito concrecionado e muito rico em fósseis de invertebrados e de vertebrados marinhos (incluindo restos de cetáceos não identificados; cf. Figs. 21H, 22D-E), com uma espessura máxima de cerca de 8 m (Fig. 21E-H), o qual por sua vez é recoberto por escoadas lávicas submarinas do Complexo Vulcânico do Pico Alto.

A zona de transição entre o tufo palagonítico (basal) e o calcarenito fossilífero suprajacente mostra sinais de interpenetração destas duas fácies (Fig. 23A,B).

Marcas de bioturbação (*Thalassinoides* isp.; Fig. 23) bem como de posterior bioerosão (*Circolites* isp.; Fig. 22B) são bem evidentes no tufo vulcânico. No entanto, enquanto que as primeiras são praticamente contemporâneas da idade de deposição das cinzas vulcânicas, durante o Pliocénico, uma vez que foram efetuadas por crustáceos em sedimento não consolidado e em ambiente marinho, já as marcas de bioerosão foram presumivelmente efetuadas por ouriços-do-mar *Paracentrotus lividus*, provavelmente durante o último estádio interglaciar (MIS 5e), há somente 130-120.000 anos atrás.

Estas marcas de bioerosão são um precioso auxiliar paleoambiental, pois indicam que, nessa altura, o nível médio das águas do mar seria de, no máximo, 1 a 2 m acima da cuvete mais alta encontrada no local (cf. Fig. 22B).



Figura 20: No topo: Baía de São Lourenço, com as vinhas subindo ao longo da encosta. Em primeiro plano, está o tufo palagonítico com uma extensão lateral de aproximadamente 90 m, à direita do qual está a jazida da Ponta Negra, com uma extensão lateral de cerca de 70 m. Na sequência fotográfica de baixo, vê-se a sequência sedimentar fossilífera da Ponta Negra, recoberta por escoadas lávicas submarinas do Complexo do Facho-Pico Alto.



Figura 21. A: caminho pedonal de acesso à jazida da Ponta Negra (à esquerda). B: tufo palagonítico da Ponta Negra. C,D: escoadas lávicas submarinas do Complexo Vulcânico do Pico Alto recobrem o tufo, com abundante material hialoclastítico brechóide. E: ao fundo, o nível de coloração mais esbranquiçada corresponde aos sedimentos fossilíferos da jazida da Ponta Negra. F,G: ouriço *Cypeaster altus* antes e após a recolha. Este exemplar foi recolhido em 2002 e encontra-se na coleção particular de Francisco García-Talavera, nas Canárias. H: calcarenito muito consolidado, contendo abundantes restos de rodólitos (Rod), valvas desarticuladas de *Gigantopecten latissimus* (Vd) e um fragmento de um osso de cetáceo (Cet).



Figura 22. A: vista geral de parte do afloramento da jazida da Ponta Negra. B: Covas de ouriços (*Circolites* isp.), provavelmente efetuadas por *Paracentrotus lividus* durante o último estádio interglaciar (MIS 5e). C: icnofóssíl não identificado (raízes de árvores?). D,E: fragmentos de ossos de cetáceo.



Figura 23. A,B: transição entre a fácies de tufo e o calcarenito cimentado e muito fossilífero. C: *Thalassinoides* isp. (Tal) no tufo vulcânico.

A lista de espécies preliminar reporta 10 *taxa* para este afloramento: 1 molusco gastrópode,
7 moluscos bivalves, 1 equinoderme e fragmentos de ossos de cetáceos não identificados
(Ávila, dados não publicados).

Delimitação geográfica da Jazida da Ponta Negra



Figura 24: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Ponta Negra

6. Ponta do Cedro

A Ponta do Cedro está localizada na costa leste da ilha de Santa Maria (cf. Fig. 25), a ilha mais oriental e mais antiga dos Açores (Abdel-Monem *et al.*, 1975; Féraud *et al.*, 1981; Serralheiro e Madeira, 1990; Sibrant *et al.*, 2015; Ramalho *et al.*, 2017). O promontório da Ponta do Cedro-Ponta do Morgado oferece uma das melhores exposições da ilha, compreendendo uma série de sequências de deltas de lava que se sobrepõem a leste e que foram formadas por progradação vulcânica costeira em direção ao leste, durante a extrusão e crescimento do edifício vulcânico do Pico Alto, entre, aproximadamente, os 4,1 e os 3,5 Ma (Ramalho *et al.*, 2017).

Localmente, a zona de passagem entre os mantos subaéreos e as unidades submarinas dos vários deltas de lava varia entre ~ 80 m acima do atual nível do mar na parte interna da sequência dentro da Baía do Cura a ~ 130 m na parte externa, correspondente ao delta de lava mais jovem da Ponta do Morgado (Ramalho *et al.*, 2017). A continuidade das unidades submarinas desde a zona de passagem a 80–130 m de altitude até o nível do mar atual sugere que a progradação vulcânica durante o crescimento do edifício vulcânico do Pico Alto ultrapassou a borda da plataforma insular coeva, estendendo-se pelas encostas submarinas orientais do edifício vulcânico (Ramalho *et al.*, 2017).



Figura 25. Mapas de localização. A - Ilhas dos Açores no Oceano Atlântico. A inserção mostra a localização geral das Ilhas dos Açores (AZO) na junção tripla entre as placas tectónicas da América do Norte (NA), Eurásia (EA) e Núbia (Nu). MAR – Dorsal Média Atlântica, TR – Rift da Terceira. B - Ilha de Santa Maria com localização da secção da Ponta do Cedro (estrela). C - Vista aérea da Ponta do Cedro, com indicação das principais estruturas estudadas. A linha tracejada marca a zona de passagem entre os mantos vulcânicos submarinos e subaéreos (Uchman *et al.*, 2020).

Vista em corte, a sequência vulcano-sedimentar na Ponta do Cedro apresenta quatro corpos sedimentares em forma de cunha, intercalados entre membros submarinos de sequências de delta de lava (Fig. 26A), três dos quais são explorados em detalhe neste relatório (Figs. 26B, 27 e 28). Estas cunhas sedimentares foram depositadas na encosta submarina íngreme do edifício insular, durante um período de rápida progradação vulcânica em direção a leste, como resultado da fase vulcânica de formação e crescimento do Pico Alto e, portanto, foram rapidamente encapsuladas e protegidas da erosão pelos produtos vulcânicos, aquando do crescimento da ilha para leste (Ramalho et al., 2017). As cunhas estão, desta forma, recobertas por produtos vulcânicos dos deltas de lava (ver Fig. 26A). O corpo em forma de cunha 1 (doravante denominada cunha 1) repousa sobre uma encosta íngreme (c. 35°) de um delta de lava de tipo Gilbert, formado por lavas em almofada e hialoclastitos (delta de lava 1). O topo, mais ou menos plano, deste delta de lava está localizado a uma altitude de 58 a 60 m acima do atual nível do mar. A cunha 2 recobre parcialmente a cunha 1, bem como o declive do delta de lava. Ambas as cunhas 1 e 2 e, pelo menos, a parte inferior da face do delta de lava acima da cunha 2, estão cobertas por um manto de tufo de lapilli (Fig. 27A e B), que por sua vez está capeado por produtos vulcânicos submarinos de um novo delta de lava (delta de lava 2; Fig. 26). A cunha 3 está localizada mais acima na sequência vulcano-sedimentar e está recoberta por lavas basálticas do terceiro delta de lava (delta de lava 3) (Uchman et al., 2020).

Delta de lava 1 – sequência basal

A base da secção aqui exposta é formada pelos folhetos de progradação de um delta de lava do tipo Gilbert (para uma revisão sobre os tipos de deltas de lava ver Ramalho *et al.*, 2013), consistindo em lavas em almofada fragmentadas e brechas hialoclastíticas, depositadas aquando do avanço da frente do delta de lava, ao longo de uma superfície íngreme, mergulhando 34 a 36° em direção a leste (Ramalho *et al.*, 2017). A unidade correspondente aos folhetos de progradação do delta tem, pelo menos, 70 m de espessura, e pode ser seguida encosta acima por várias dezenas de metros, até atingir o topo plano da estrutura do delta. O delta de lava 1 está truncado e exposto a 58–60 m de altitude, devido à erosão marinha penecontemporânea com os estágios finais da extrusão do delta. Este conglomerado com cerca de 1 m de espessura que envolve a frente do delta. Este conglomerado contém rochas (sub)arredondadas, com centímetros a metros, de basalto poroso e não poroso, cimentado por uma matriz biocalcarenítica. As rochas estão incrustadas por vermetídeos bem preservados (Fig. 29E), pela craca endémica *Zullobalanus santamariaensis* Buckeridge et Winkelmann, 2010, por bivalves (principalmente ostras e *Chama gryphoides* Linnaeus, 1758) e por octocorais (Fig. 23G-J). As incrustações nas rochas também são ocasionalmente perfuradas

com *Gastrochaenolites* cf. *torpedo* Kelly e Bromley, 1984 (Fig. 29F), produzido pelo bivalve *Leiosolenus* (= *Myoforceps*) *aristatus* (Dillwyn, 1817). Os furos têm entre 5 a 10 mm de diâmetro, até 20 mm de profundidade e, ocasionalmente, contêm ainda as valvas do produtor. A matriz de calcário esbranquiçada e bem cimentada tem poucos grãos líticos, os bioclastos compreendendo bivalves (sob a forma de conchas desarticuladas inteiras e fragmentos de conchas), foraminíferos bentónicos (rotaliídeos e textularióides), briozoários eretos e incrustantes, gastrópodes, espinhos de equinodermes e algas coralinas (Fig. 29C e D). Alguns dos bioclastos apresentam um envelope micrítico e ocasionalmente estão presentes microperfurações.



Figura 26. Relações entre os corpos rochosos vulcânicos e sedimentares. A – Secção transversal através da secção da Ponta do Cedro. B - Relações esquemáticas entre as unidades sedimentares. As setas indicam a direção da progradação das cunhas sedimentares (Uchman *et al.*, 2020).



Figura 27. Arquitetura das unidades litológicas na Ponta do Cedro. A - Vista geral da paisagem com os contornos das várias unidades litológicas. B - Visão mais próxima das cunhas 1 e 2 (Uchman *et al.*, 2020).

Cunha sedimentar 1

A cunha 1 forma um corpo progradante, composto por um tufo calcário. A espessura total da cunha 1 é de, pelo menos, 15 m, cerca de 6 m dos quais estão expostos acima do nível do mar, com os restantes 9 m a estenderem-se debaixo de água, tal como observado através de mergulho (Fig. 27B). A cunha inteira tem cerca de 65 m de comprimento quando medida desde a encosta do delta de lava até onde o último folheto entra abaixo do atual nível do mar. É mais espessa em direção a leste, e mais fina em direção ao oeste e a sul, ao passo que a sua extensão norte não está exposta. É composta principalmente por um tufo calcário acastanhado a verdeacinzentado, finamente laminado e disposto em folhetos que mergulham consistentemente em direção a leste, repousando na superfície irregular da encosta do delta de lava. A camada basal suaviza a superfície áspera da encosta do delta de lava. Na base, as lâminas mostram um ângulo de cerca de 25°, com a inclinação a diminuir na secção superior, mudando para um mínimo de 13° no topo (Fig. 22A). Os folhetos estratigraficamente mais elevados estão cobertos de forma concordante por uma camada de tufos de lapilli laminados (0,5 m), seguidos por grandes massas de lavas em almofada basálticas do delta de lava 2 (Fig. 27A). Certas áreas, na parte superior da cunha 1, não estão expostas devido à presença de embutimentos erosivos preenchidos por conglomerados contendo fósseis marinhos atribuídos ao último estádio interglacial (MIS 5e),

bem como porque estão cobertas, em parte, por depósitos de vertente recentes. Na parte basal da cunha 1, as lâminas têm 3 a 15 mm de espessura e são compostas por grãos piroclásticos porosos e angulares, relativamente bem classificados, com bioclastos raros, incluindo fragmentos de algas coralinas, conchas de bivalves (geralmente micritizadas) e conchas de foraminíferos bentónicos (Fig. 29C-F). Raramente, algumas camadas mostram laminação cruzada em pequena escala. As lâminas diminuem para o topo da encosta, e pequenas descontinuidades ocorrem localmente entre os conjuntos de lâminas (Fig. 29A), marcadas por diferenças na inclinação de até 8°.



Figura 28. Visão mais próxima das cunhas 1 (A) e 2 (B) e configuração destas cunhas na sequência vulcano-sedimentar em diferentes pontos de observação (Uchman *et al.,* 2020).

Na secção superior, as lâminas são mais espessas e menos distintas, enquanto os clastos são geralmente mais grossos, menos bem classificados e contêm mais bioclastos [conchas desarticuladas e fragmentadas de bivalves, por exemplo, *Arca noae* Linnaeus, 1758, pectinídeos, *Spondylus* sp., bem como fragmentos de carapaças do ouriço-do-mar *Clypeaster altus* (Leske, 1778)] e também litoclastos isolados e bioclastos perfurados com vários centímetros de tamanho. Além disso, existem três horizontes bioturbados distintos, que destruíram a laminação e correm paralelos aos folhetos.



Figura 29. Aspeto dos hialoclastitos e das lavas em almofada do delta de lava 1 e sedimentos subjacentes. A - Vista lateral (de sul) do delta de lava 1, face da encosta e depósitos sobrepostos, e lavas em almofada do delta de lava 2. B - Grandes pedregulhos de basalto incrustados, assentes no topo dos hialoclastitos e deltas de lava em almofada do delta de lava 1; régua amarela para escala tem 1 m de comprimento. C - Microfotografia em lâmina delgada da matriz biocalcarenítica do conglomerado repousando sobre o delta de lava 1. D - Microfotografia em lâmina delgada do biocalcarenítico (bf). E - Rocha basáltica incrustada por gastrópodes vermetídeos. F - Incrustações numa rocha basáltica perfurada com *Gastrochaenolites* cf. *torpedo* (Gt). G-J - Fixações de octocorais em rochas basálticas (Uchman *et al.*, 2020).

O horizonte bioturbado mais baixo tem algumas dezenas de centímetros de espessura e possui *Scolicia* isp., ainda que pouco visível (Fig. 30B), e icnofábrica de *Thalassinoides*. *Scolicia* isp. é horizontal, sinuoso, com 30 mm de largura e exibindo uma estrutura trilobada interna. Um intervalo de aproximadamente 20 cm de espessura com *Scolicia* ocorre no horizonte intermediário da cunha onde este icnofóssil é visível, principalmente na secção transversal. Uma toca tubular isolada, com cerca de 10 cm de diâmetro, foi encontrada fora deste segundo horizonte. Os folhetos mais elevados estão bioturbados com *Thalassinoides* isp. e algumas tocas tubulares menores e pouco visíveis, com até 5 mm de diâmetro. Este terceiro horizonte, bem cimentado e bioturbado, marca a camada superior da cunha 1.



Figura 30. Estruturas e litologia da cunha sedimentar 1. A - Folhetos laminados com superfície de reativação materializada por uma pequena inconformidade (marcada pelas linhas tracejadas); régua amarela tem 1 m de comprimento. B - Folhetos na terminação subaquática da cunha 1. C–D - Microfotografia de lâmina delgada do tufo calcário em duas ampliações diferentes; as partículas piroclásticas são acastanhadas e o componente bioclástico é branco; observe a textura vesicular das partículas piroclásticas em D e formas não erodidas. E–F - Microfotografias de lâmina delgada do tufo da cunha 1 contendo fragmentos de valvas de bivalves micritizadas (bi) e conchas do foraminífero bentónico (bf) (Uchman *et al.*, 2020).



Figura 31. Icnofósseis presentes nos sedimentos das cunhas 1 e 2. A - *Bichordites* isp. numa superfície subhorizontal, na parte inferior da cunha 2 (vista superior). B - *Scolicia* isp. (Sc) nos horizontes bioturbados da cunha 1 (vista em secção). C - *Thalassinoides* isp. (vista em corte) na camada basal da cunha 2 e um fragmento de calcarenito bioclástico cinza (parte inferior média). D - Eixos verticais (tocas de crustáceos?) no topo da cunha 1, preenchidos com sedimentos da cunha 2 (vista lateral). E - *Piscichnus waitemata* (Pi) na fronteira entre as cunhas 1 e 2, preenchidas com tufo calcário (vista superior oblíqua). F - Um grande poço vertical no topo da cunha 1, cheio de sedimentos da cunha 2 (vista lateral). G - Um icnofóssil de traço vertical, tubular e alinhado no topo da cunha 1 (vista lateral). H - *Diopatrichnus santamariensis* (vista lateral) num bloco solto da cunha 2 (Uchman *et al.*, 2020).

Na parte mais ocidental do afloramento, o topo da cunha 1 é truncado pela erosão. A superfície erosiva forma uma depressão ampla e rasa. Na parte mais setentrional do afloramento, o limite entre a cunha 1 e a cunha 2 é discordante e marcado por diferentes inclinações de estratos, sem uma superfície erosiva. Abaixo do topo da cunha 1, o meio metro superior do depósito é totalmente bioturbado e contém icnofósseis, incluindo *Bichordites* isp. (Fig. 25A; tocas horizontais de equinóides irregulares), *Thalassinoides* isp. (Fig. 25C; tocas tubulares ramificadas,

feitas por crustáceos e com diâmetro de 17 a 45 mm), *Diopatrichnus santamariensis* Uchman *et al.*, 2017 (eixos de até 50 mm de diâmetro e 100 a 235 mm de comprimento, blindados com bioclastos), bem como tocas finas, tubulares e ocasionalmente ramificadas, produzidas por poliquetas ou artrópodes (Fig. 31H). Os *Thalassinoides* podem ser rastreados até cerca de um metro abaixo do topo da cunha 1, estendendo-se até aos depósitos laminados da cunha 1. Além disso, o icnofóssil *Piscichnus waitemata* Gregory, 1991 em forma de tigela (ver Uchman *et al.*, 2018) ocorre na superfície erosiva (Fig. 30E), podendo ter até 370 mm de largura e 250 mm de profundidade. *Thalassinoides* e *Piscichnus* são preenchidos com depósitos bioclásticos derivados da cunha 2.

Cunha sedimentar 2

A cunha 2 é visível como uma lente levemente inclinada, posicionada em direção a WNW. Possui uma espessura máxima de 7 m, diminuindo em direção a SSW e NNE, e exibe uma extensão transversal de cerca de 50 m. Na parte mais ocidental do afloramento, a cunha 2 repousa diretamente na encosta do delta de lava e na parte proximal da cunha 1 (Fig. 32A). O contato com a parte proximal da cunha 1 revela uma superfície erosiva côncava. A descontinuidade é marcada por uma mudança no tamanho do grão, de depósitos mais finos e com melhor classificação da cunha 1, para depósitos mais grossos, mal classificados e mais calcários, da cunha 2. O topo da cunha 2 está, pelo menos localmente, erodido. Além disso, certas áreas na parte superior da cunha 2 (e da cunha 1) não estão expostas devido à erosão e cobertura por depósitos fossilíferos marinhos atribuídos ao Plistocénico tardio (MIS 5e) ou por depósitos de vertente recentes (Figs. 26 e 27).

Os depósitos (tufos calcários e calcarenitos cinzentos) estão dispostos em leitos indistintos com laminação bruta, descontínua e pavimentos de conchas. Na parte média da cunha, as lâminas mergulham para SE num ângulo de cerca de 10°. O teor de carbonato e o grau de cimentação aumentam para o topo da cunha. Além disso, a cor muda de um castanho enferrujado na base para um bege mais claro na parte superior. O calcarenito cinzento é composto por uma quantidade significativa de grãos vulcaniclásticos porosos, que são relativamente mal classificados e, principalmente, angulares (Fig. 32C-H). O cimento é irregular, localmente em forma de lâmina. O calcarenito cinza desaparece gradualmente para norte.



Figura 32. Aspeto das estruturas sedimentares da cunha 2. A - Fotografia de campo da terminação sul da cunha 2 na entrada da "caverna" (vista para o norte), exibindo a metade inferior conglomerática e a sequência sobreposta de lavas em almofada e do manto de tufo de *lapilli* do delta de lava 2. B - Dique neptuniano (nd) nos hialoclastitos e lavas em almofada do delta de lava 1, preenchido com sedimentos da cunha 2. Originalmente, o dique cruzava uma parte da cunha 1 que foi extraída. C - Superfície intemperizada do biocalcarenito cinza da cunha 2 com os bioclastos maiores em relevo devido à erosão diferencial. D – Valva de bivalve bioerodida com *Entobia* (E) e *Gastrochaenolites* cf. *torpedo* (Gt). E - Microfotografia em lâmina delgada do biocalcarenito acinzentado. F–H – Microfácies do biocalcarenito cinza (microfotografia em lâmina delgada) mostrando grãos piroclásticos dispersos (p), fragmentos de valvas de bivalves micritizadas (bi), conchas de foraminíferos bentónicos (bf), fragmentos de algas coralinas (ca) e de um briozoário ereto ciclostomo (br) (Uchman *et al.*, 2020).



Figura 33. Macrofósseis da cunha sedimentar 2. A – C, E, H, M, Q são fotografias de campo; DBUA-F coleção fóssil do Departamento de Biologia da Universidade dos Açores; INGUJ - Centro de Educação Natural da Universidade Jagiellonian (CEP)/Museu de Geologia, Cracóvia, Polónia. A - Rocha basáltica apresentando incrustações calcárias. B - Detalhe da rocha basáltica mostrando gastrópodes vermetídeos incrustantes. C - Ostra perfurada por esponja (*Entobia*) e por bivalves litófagos (*Gastrochaenolites* cf. *torpedo*), incrustando uma rocha basáltica. D – a craca endémica *Zullobalanus santamariaensis* Buckeridge & Winkelmann, 2010, INGUJ249P115, crescendo numa rocha basáltica. E - *Persististrombus coronatus* Defrance, 1827. F - *Aspa marginata* (Gmelin, 1791), DBUA-F 1428. G - *Chama gryphoides* Linnaeus, 1758, DBUA-F 1428. H - *Scapharca crassissima* Macsotay & Campos, 2001. I - *Pecten dunkeri* Mayer, 1864, DBUA-F 946. J - *Paphia dura* (Gmelin, 1791), DBUA-F 946. K - *Arca noae* Linnaeus, 1758, DBUA-F 946. M - Fragmento de *Clypeaster altus* (Leske, 1778). N - *Cardita calyculata* (Linnaeus, 1758), DBUA-F 946. O, P - *Lutraria lutraria* (Linnaeus, 1758), DBUA-F 939. Q - Rodólito - vista da superfície. R - Rodólito composto por crostas de *Phymatolithon calcareum* (P) e *Lithophyllum prototypum*. Corte marginal em lâmina delgada do conceptáculo e ramos dímeros das células em paliçada (Uchman *et al.*, 2020).



Figura 34. Aspetos da cunha sedimentar 3 e do manto do tufo de *lapilli*. A - Fotografia de campo da cunha 3 e das unidades litológicas subjacentes e sobrepostas. B - Detalhe da cunha 3 com a base e a descontinuidade média marcada por linhas brancas tracejadas. C - Aspeto do tufo de *lapilli* (superfície cortada) recobrindo a cunha 2. D - Aspeto do tufo da cunha 3 numa superfície molhada de laje polida. E - *Macaronichnus segregatis* Clifton & Thompson, 1978 na cunha 3 (vista superior). F - *Macaronichnus segregatis* e *Ophiomorpha* isp. (Oph) na cunha 3 (superfície oblíqua) (Uchman *et al.*, 2020).

O conteúdo fossilífero dos sedimentos da cunha sedimentar 2 compreende bivalves fragmentados e desarticulados, incluindo *Manupecten pesfelis* (Linnaeus, 1958), *Chama gryphoides* Linnaeus, 1758 (Fig. 27G), *Scapharca crassissima* Macsotay & Campos, 2001 (Fig. 27H), *Pecten dunkeri* Mayer, 1864 (Fig. 27I), *Arca noae* Linnaeus, 1758 (Fig. 27K), *Venus verrucosa* Linnaeus, 1758 (Fig. 27L), *Cardita calyculata* (Linnaeus, 1758) (Fig. 27N), *Paphia dura*

(Gmelin, 1791) (Fig. 27J), Lutraria lutraria (Linnaeus, 1758) (Fig. 27O,P), Spondylus sp., Lopha plicatuloides (Mayer, 1864) e ostras, bem como gastrópodes, tais como Persististrombus coronatus Defrance, 1827 (Fig. 33E), vários Conus spp., Aspa marginata (Gmelin, 1791) (= Bufonaria marginata) (Fig. 33F), Eocypraea miobadensis (Sacco, 1894) e representantes de Vermetidae. Destas, 3 espécies de bivalves são novos registos para o Pliocénico dos Açores: Venus verrucosa, Paphia dura e Lutraria lutraria (Uchman et al., 2020). Outros somatofósseis incluem equinodermes Clypeaster altus (Leske, 1778) (Fig. 27M), foraminíferos bentónicos, raramente foraminíferos pelágicos, briozoários eretos, bem como rodólitos dispersos e fragmentos de algas coralinas. Alguns dos bioclastos mostram envelopes micríticos, micro- e macro-perfurações, principalmente Entobia isp. e Gastrochaenolites cf. torpedo, raramente Caulostrepsis isp.

Os rodólitos (diâmetro máximo de 3,5–10 cm) mostram uma forma esferoidal a elipsoidal e possuem núcleos formados por clastos vulcânicos, briozoários e corais (Fig. 33R). Alguns estão incrustados por cracas e serpulídeos, ao passo que outros estão perfurados com *Gastrochaenolites* cf. *torpedo*. A maioria dos rodólitos é formada por finas crostas de *Lithophyllum* sp. (Fig. 33S) ou *Phymatolithon calcareum* (Pallas) Adey & McKibbin ex Woelkerling & Irvine, intercalados com briozoários e/ou foraminíferos, crescendo ao redor do núcleo. Em alguns rodólitos, o *Lithophyllum prototypum* (Foslie) Foslie cresce entre os talos de *P. calcareum* (Fig. 33R). Mais raramente, os rodólitos são formados por *Lithophyllum* sp. e *P. calcareum*.

No extremo oeste da secção exposta, onde a cunha 2 se comprime, blocos arredondados com até 1 m de largura de rochas basálticas e piroclásticas com diferentes litologias estão intercalados nos depósitos bioclásticos (Fig. 32A). Os blocos estão incrustados principalmente por gastrópodes vermetídeos (Fig. 27A e B), pela craca *Zullobalanus santamariaensis* (Fig. 33D) e pelo bivalve *Chama gryphoides* (Fig. 33C). O bivalve litófago *Leiosolenus aristatus* está presente nas suas perfurações (*Gastrochaenolites* cf. *torpedo*) nas incrustações de algumas rochas (Fig. 33B).

Delta de lava 2 - manto de tufo de lapilli e encapsulamento pelas lavas em almofada

A cunha 2 e a cunha 1 (a última quando não coberta pela cunha 2) estão truncadas na parte superior e recobertas por uma camada de tufo de *lapilli* laminado e enferrujado, com até 1,3 m de espessura no meio da secção, tornando-se mais fino e desaparecendo na direção leste. O tufo é composto por grãos piroclásticos angulares, porosos e raramente não porosos, com 2 a 5 mm de largura até 7 mm, e é cimentado por calcite e por alguns cristais fibrosos aciculares (zeólitos?). Também recobre a inclinação dos folhetos de lava em almofada acima das

terminações superiores de ambas as cunhas. As lâminas são paralelas à paleo-topografia, o que é típico de depósitos de queda piroclásticos.

A superfície do tufo é revestida por uma sequência bem preservada de lavas em almofada basálticas com uma espessura total de cerca de 20 m. Algumas das lavas em almofada deixaram leves formas de impressão no tufo. Esta sequência corresponde ao membro submarino de um delta de lava (lava delta 2) extruído sob taxas de efusão intermédias (como atestado pela prevalência de lavas em almofada sobre hialoclastitos; Ramalho *et al.*, 2013).

Cunha sedimentar 3

A cunha 3 é inacessível, uma vez que está localizada na face alta do penhasco, mas pode ser observada à distância, tendo a sua descrição sido obtida a partir de blocos caídos. Esta cunha forma uma lente com cerca de 10 m de espessura e com uma largura de 35 m, estreitando em direção ao NE e SW, com uma base convexa e um topo plano, estendendo-se sobre as lavas em almofada subjacentes, sem nenhum sinal de erosão significativa. O tufo possui um tom cinza esverdeado nas superfícies desgastadas e um tom acastanhado em superfícies frescas, sendo composto por uma matriz de cinzas de grão muito fino a fino com *lapilli* porosos e bioclastos dispersos (Fig. 28D).

É totalmente bioturbado. Na base da cunha, existem grandes blocos de basalto incrustados por ostras. O conjunto de icnofósseis do depósito é dominado por *Macaronichnus segregatis* Clifton & Thompson, 1978 com orientação aleatória. Além disso, *Ophiomorpha* isp., *Palaeophycus* isp. e *Piscichnus waitemata* também estão presentes. No meio deste corpo sedimentar, uma superfície de descontinuidade é vista à distância, marcada por tocas tubulares (provavelmente *Ophiomorpha*). A macrofauna compreende *Manupecten pesfelis*, *Spondylus* sp. e *Chlamys* sp.

Delta de lava 3

A cunha 3 é revestida por outra sequência vulcânica submarina (o membro submarino do delta de lava 3; Figs. 26A e 27A) compreendendo lavas em almofada basálticas bem compactadas (sem hialoclastitos intersticiais), mergulhando para leste, com uma espessura estratigráfica de até 50 m. Este pacote foi provavelmente extruído durante duas erupções consecutivas de volume elevado, sob taxas de efusão intermédias a altas, uma vez que uma descontinuidade fraca separa dois conjuntos contínuos de lavas em almofada. Esta sequência é truncada no topo por uma inconformidade horizontal, extensa e plana, localizada a aproximadamente 80 m de altitude. Os folhetos subaéreos deste delta não são visíveis devido à erosão.

Delta de lava 4

A sequência final superior corresponde a outro delta de lava basáltico, mostrando uma clara zona de passagem entre os seus membros subaéreos e submarinos por volta dos 120–130 m de altitude (Figs. 26A e 27A). Esta sequência compreende um membro submarino basal composto de lavas em almofada e fluxos submarinos que mergulham suavemente no sentido ENE, os quais passam lateralmente para lavas em almofada e brechas submarinas que mergulham acentuadamente (30–35°) no mesmo sentido ENE, com as lavas a cair em cascata sobre a encosta íngreme subjacente do delta de lava 3. Um pouco além, para NE, outra cunha sedimentar ocorre entre as sequências do delta de lava 3 e 4 (cunha 4, Fig. 26A), mas o acesso a esta cunha 4 é difícil.

Finalmente, o membro mais alto do delta de lava 4 corresponde a uma sequência de mantos subaéreos de lavas a'a, com mais de 50 m de espessura, correspondendo à superfície topográfica mais alta do promontório da Ponta do Cedro.

Construção dos deltas de lava e o seu significado na evolução da ilha de Santa Maria

Os elementos arquitetónicos da secção da Ponta do Cedro revelam uma história deposicional que faz parte de um cenário maior, responsável pelo crescimento por acreção lateral da ilha (Fig. 35). Diversas fases eruptivas levaram à formação de deltas de lava ao longo da costa leste da ilha, cobrindo a plataforma submarina e as encostas do edifício vulcânico insular com sequências efusivas submarinas. A primeira dessas sequências corresponde aos folhetos com uma inclinação acentuada e pertencentes a um delta de lava do tipo Gilbert, composto principalmente por brechas hialoclastíticas com fragmentos de lavas em almofada.

A prevalência de hialoclastitos sugere que o delta foi extruído sob baixas taxas de efusão sobre uma base íngreme, com os hialoclastitos a resultarem do rápido esfriamento e fragmentação das lavas subaéreas, à medida que estas entravam lentamente no mar. Os fragmentos maiores da brecha, por sua vez, resultaram da fragmentação das lavas em almofada, à medida que estas rolavam ao longo do declive inclinado da encosta e se estilhaçavam umas contra as outras (Gregg & Fink, 2000; Gregg & Smith, 2003). Após o término da progradação do delta de lava, os organismos marinhos colonizarem a superfície inclinada da vertente submarina litoral. Na costa, junto ao litoral e a baixa profundidade, grandes rochas basálticas foram erodidas por ação marinha, arredondadas, estabilizadas e depois colonizadas por vermetídeos de águas litorais, pela craca *Zullobalanus santamariaensis* e por ostras. As incrustações foram posteriormente perfuradas com *Gastrochaenolites* cf. *torpedo*. A produção dessa perfuração pelo bivalve *Leiosolenus aristatus* requer vários anos de exposição no fundo do mar (cf. Bromley, 1992). Estes blocos rochosos foram então transportados para maiores profundidades, ao longo da encosta do delta, juntamente com uma matriz de calcário relativamente pura que consiste em areia bioclástica, bem como conchas desarticuladas de bivalves, mas muitas vezes inteiras, gastrópodes, equinodermes e outros bioclastos. Como resultado, blocos rochosos incrustados e não incrustados coexistem no topo dos últimos folhetos do delta de lava, atualmente expostos perto do nível do mar.

Alguns dos blocos de maior dimensão exibem cracas na parte inferior, indicando capotamento dos blocos durante o transporte descendente. Alguns dos blocos transportados, que permaneceram parcialmente expostos e, assim, se projetavam para fora da matriz de calcário, foram colonizados por octocorais de, pelo menos, duas espécies, cujas bases têm diâmetros de 21 a 24 mm na base. As cicatrizes no topo, representando aproximadamente o diâmetro axial da porção da colónia ereta, medem cerca de 7 mm.

Como os taxa que produzem estas bases são impossíveis de determinar, é difícil estimar a idade das colónias. As espécies de octocorais modernas têm um crescimento radial entre 0,05 e 0,44 mm por ano (Watling *et al.*, 2011). Dado que o topo da cunha 1 (Fig. 29, estádio 1) estava, na época, a aproximadamente 30-40 m de profundidade, e como a maioria das colónias estudadas por Watling *et al.* (2011) são de águas significativamente mais profundas, consideramos que exposições mais curtas são mais prováveis. Levando em consideração aquelas taxas de crescimento, os diâmetros observados para as bases dos octocorais implicariam uma exposição ininterrupta das superfícies do bloco entre os 16 a 140 anos.

Desenvolvimento de um primeiro corpo sedimentar em forma de cunha

A próxima etapa do processo sedimentar é marcada por uma mudança total na fonte de sedimentos, causada pelo fornecimento de cinzas vulcânicas. Isto resultou na formação da cunha 1, através do transporte e deposição de cinzas vulcânicas de grão fino (Fig. 35A) fornecidas pela ocorrência de erupções nas proximidades do local. As cinzas foram depositadas em águas litorais e depois transportadas encosta abaixo sobre a superfície estabilizada do delta de lava. O tempo de permanência na zona de ação das ondas foi muito curto, porque os grãos quase não estão desgastados. Finalmente, as cinzas acumularam-se presumivelmente a profundidades da ordem dos 30 a 40 m, formando a cunha 1, e progredindo para leste, para o offshore. O ambiente deposicional era calmo, como atestado pela laminação fina nos folhetos da cunha; as superfícies de reativação são muito pouco desenvolvidas e a laminação ondulada é rara. A sedimentação não foi contínua, permitindo o estabelecimento de organismos

invertebrados escavadores, responsáveis pela formação dos três horizontes de bioturbação, durante períodos de diminuição significativa da taxa de sedimentação. Os clinoformes calcareníticos do Pliocénico-Plistocénico na região do Mediterrâneo desenvolveram-se de maneira semelhante (cf. Massari & Chiocci, 2006). A inclinação dos folhetos diminui para o topo, sugerindo o preenchimento de uma depressão semelhante a uma tigela, no delta de lava. Caso contrário, o sedimento estaria sujeito a derrapagens em reação aos menores distúrbios, como a atividade sísmica. De facto, o piso do substrato próximo ao término da cunha 1 é apenas ligeiramente inclinado ou quase plano, como foi observado durante mergulho. Provavelmente, esta paleotopografia corresponde a um terraço marinho inundado muito parecido com os da plataforma insular externa da Ilha de Santa Maria (Fig. 36 e Ricchi *et al.*, 2018, 2020).

Folhetos mais altos na secção contêm mais bioclastos, sugerindo que uma "fábrica de carbonato" de águas litorais foi iniciada mais uma vez. Além disso, os folhetos mais elevados contêm grãos ligeiramente mais grossos, provavelmente devido à remoção sucessiva de grãos finos das áreas de origem. No término deposicional da cunha 1, algumas áreas do topo (topset) foram erodidas durante tempestades, estabilizadas e colonizadas por equinodermes e crustáceos escavadores.

Deposição da cunha 2

A deposição da cunha 2 é explicada por um aumento relativo do nível do mar, que aumentou o espaço de acomodação e deslocou a base da onda de tempestade para cima (Fig. 29B). O aumento do espaço de acomodação aumentou a estabilidade dos sedimentos no topo da cunha 1, o que possibilitou a produção de sistemas relacionados com a atividade de escavação por crustáceos (*Thalassinoides* isp.) no topo desse corpo sedimentar. Estas tocas foram preenchidas com sedimentos da cunha 2 durante a fase inicial da sua acumulação. A rápida transição para uma deposição dominada por carbonatos que é observada na cunha 2 sugere que esta área estava fora da influência da atividade vulcânica ou de materiais terrígenos. A abundância de rodólitos e de materiais carbonatados mais grossos aumenta em direção ao topo, e a classificação dos sedimentos diminui.

A laminação é bruta ou ausente. Os carbonatos, principalmente bioclastos, foram produzidos numa zona litoral no topo do delta de lava e transportados encosta abaixo, depositando-se abaixo do novo e mais alto nível de base das ondas de tempestade. A produção da "fábrica de carbonatos" incrementou a sua produção durante este intervalo. Devido ao aumento no espaço de acomodação, a cunha 2 sobrepõe-se à cunha 1 em direção à encosta do delta de lava. A cunha 2 foi depositada numa depressão rasa, resultante da erosão marinha, e cuja secção transversal

é (em parte) visível no afloramento. A cunha 2 progrediu obliquamente em relação à direção da progradação da cunha 1. Isto deve estar relacionado com uma alteração na configuração da inclinação.

Grandes blocos angulares de basalto ocorrem apenas na parte inferior oeste da base da cunha 2, podendo representar uma queda local de rochas provenientes da encosta do delta de lava 1. Mais uma vez, os blocos foram incrustados por organismos de águas litorais, estando os seus interstícios preenchidos por material biogénico da cunha 2. Muito provavelmente, os blocos foram aqui depositados durante uma tempestade que erodiu o topo da cunha 1, transportados por correntes de refluxo perpendiculares à linha de costa e correndo junto ao fundo. No entanto, não excluímos a possibilidade de tal ter sucedido em resultado de terremotos ou por pequenos deslizamentos. Os primeiros podem ter sido responsáveis pela geração de diques neptunianos que penetram nos depósitos hialoclastíticos do delta da lava (Fig. 35B); no entanto, fissuras abertas também podem resultar de descompressão devido à instabilidade da inclinação. Estes diques estão preenchidos com sedimentos derivados da cunha 2, possivelmente parcialmente cimentada, nos quais alguns blocos basálticos parecem ter uma borda de carbonato.

Os icnofósseis das cunhas 1 e 2 são pouco diversificados e compostos principalmente de tocas de equinodermes (*Bichordites* isp., *Scolicia* isp.) e tocas de crustáceos (*Thalassinoides* isp.). Outros icnotaxa (*Diopatrichnus, Piscichnus, Planolites*) são raros. Esta icnoassembéia corresponde a uma icnofácies *Cruziana* empobrecida. Tipicamente, as icnofácies *Cruziana* em ambientes de alta energia estendem-se desde o circalitoral até profundidade da ordem dos 60-80 m (Pemberton *et al.*, 2001). No entanto, em plataformas insulares e declives submarinos despojados de sedimentos, como no caso da Ilha de Santa Maria (ver Ricchi *et al.*, 2018, 2020), um ambiente mais profundo, situado logo abaixo do nível de base das ondas de tempestades, não pode ser excluído como explicação para estas icnoassembléias empobrecidas, uma vez que estes habitats limitados e, até certo ponto efémeros, podem ser colonizados pelos produtores dos icnofósseis que são transportados/exportados de zonas litorais para zonas mais profundas, juntamente com os sedimentos, aquando de tempestades/furacões.

xl



Figura 35 - Modelo de desenvolvimento e encapsulamento das cunhas 1, 2 e 3.

Mantos volcaniclásticos, cunha 3 e encapsulamento por lavas em almofada

O desenvolvimento adicional da cunha 2 foi interrompido pela erosão em algumas partes e pela repentina deposição dos tufos de *lapilli* laminados (Fig. 34A e B). A queda dos *lapilli* ocorreu através da coluna de água e deve ter assentado sem movimento de massa significativo, pois a sequência da laminação não foi perturbada. A espessura deste manto de *lapilli* não muda muito, em geral. Imediatamente a sequir, o sedimento foi coberto por lavas em almofada basálticas que encapsularam as cunhas sedimentares 1 e 2. O tufo de *lapilli* ainda estava macio, pois algumas almofadas produziram estruturas/moldes de carga no sedimento. A acumulação resultante da extrusão destas lavas em almofada reduziu o espaço de acomodação (Fig. 35C). Lavas em almofada localmente bem desenvolvidas sugerem taxas de derrame de lava relativamente altas, formando um delta com uma inclinação frontal muito menos inclinada em comparação com o delta de lava 1. A deposição do tufo e das lavas em almofada pertencem à

mesma fase vulcânica, a qual pode ter incluído eventos vulcânicos subaéreos e submarinos de baixa profundidade (típicos de erupções surtsianas).

A cunha 3 parece ter sido depositada no delta de lava parcialmente erodido 2 (Fig. 35D) em condições mais litorais do que as cunhas 1 e 2 anteriores, com os seus sedimentos a derivarem, provavelmente, de uma fonte diferente, pois são dominados por cinzas vulcânicas muito finas a finas. A geometria exposta da cunha (Figs. 25 e 26) sugere uma localização da fonte para noroeste. Os icnofósseis *Macaronichnus, Ophiomorpha* e *Piscichnus*, e a bioturbação completa do arenito observada nos blocos caídos, indicam um ambiente de transição entre a praia ("shoreface", que inclui a zona de espraio e de surfe) e a ante-praia ou zona de rebentação ("foreshore") (Fig. 30).



Figura 36. Terminologia do perfil de praia e da zona submersa adjacente (Ávila *et al.,* 2010).

A composição dos icnofósseis e o grau de bioturbação fazem lembrar a secção exposta na jazida da Malbusca (parte sul da ilha de Santa Maria) e podem ser interpretadas de maneira comparável (Rebelo *et al.*, 2016; Uchman *et al.*, 2016, 2018). A deposição da cunha foi interrompida a meio, como indica uma superfície de descontinuidade com tocas descendo dessa superfície. A cunha 3 é interpretada como tendo sido depositada numa depressão litoral (Fig.34A), cuja secção transversal côncava é visível na face da arriba. A cunha 3 e todos os depósitos anteriores foram encapsulados por lavas em almofada e por mantos lávicos submarinos dos deltas de lava 3 e 4 (Fig. 35F).

Interpretação da sequência vulcano-sedimentar

O desenvolvimento, em sucessão, de cunhas sedimentares, é condicionado pela interação entre um maior espaço de acomodação (causado por um aumento relativo do nível do mar), atividade vulcânica, processos erosivos e produção de carbonatos. Como a datação das cunhas é imprecisa, é difícil relacionar o aumento relativo do nível do mar com mudanças eustáticas específicas no nível das águas do mar durante o Pliocénico (Dumitru *et al.*, 2019). De qualquer forma, a sequência descrita inclui as unidades vulcano-sedimentares relacionadas com os primeiros estádios da fase de rejuvenescimento da Ilha de Santa Maria (4,1 a 3,5 Ma), durante a qual um novo edifício insular foi construído, descentrado para leste do antigo edifício formado pelo vulcão em escudo do Complexo Anjos (Ramalho *et al.*, 2017). Nesta altura, vários estudos registam uma tendência acentuada de subsidência a acompanhar a construção vulcânica (Rebelo *et al.*, 2016b; Ramalho *et al.*, 2017; Ricchi *et al.*, 2018).

A produção de carbonato foi condicionada pela profundidade da água, clima tropical (Ávila *et al.*, 2016) e baixo aporte de sedimentos não carbonatados. Os sedimentos carbonatados fornecidos às cunhas foram produzidos a baixas profundidades, num fundo do mar geralmente plano que se estendia desde o topo plano do delta de lava para o interior na direção do litoral da ilha/zona de mais baixa profundidade do monte submarino. A formação de uma área marinha litoral e de fundo plano, produzida pelo crescimento do delta de lava seguido de erosão durante um declínio temporário da atividade vulcânica, permitiu uma maior produção de carbonato. Um aquecimento climático não é excluído, mas não é necessário para o desenvolvimento da "fábrica de carbonatos" porque, ainda hoje, uma produção significativa de carbonatos nos Açores está a ocorrer sob um clima temperado (Wisshak *et al.*, 2015).

A presença dos gastrópodes *Persististrombus coronatus* e *Conus* spp. sugere temperaturas tropicais do mar (ver Ávila *et al.*, 2016), portanto bem mais elevadas do que as atuais, as quais se estimam terem durado até cerca de 3,6 a 3,3 Ma (Ávila *et al.*, 2020a).

Não há rochas sedimentares visíveis a qualquer distância acima da superfície plana. Portanto, parece que quase todos os sedimentos carbonatados desta fábrica de carbonatos e outros sedimentos soltos (por exemplo, areias piroclásticas) foram exportados para as encostas, principalmente como resultado de tempestades, ao longo de um modelo deposicional semelhante ao sugerido para a formação da coquina da Pedra -que-pica e para a formação dos tempestitos de águas profundas na Ponta do Castelo, também na ilha de Santa Maria (Meireles *et al.*, 2013; Ávila *et al.*, 2015). Uma vez nas encostas, os carbonatos foram submetidos a uma nova redeposição a maior profundidade. O único cenário para a preservação destes sedimentos

foi o enterro por sequências piroclásticas e efusivas, como resultado de atividade vulcânica contínua, mas intermitente.

A elevação subsequente da ilha desde o Pliocénico resultou na exposição atual da sequência vulcano-sedimentar, tornando-a acessível para estudo em terra.

Uma pesquisa de reflexão batimétrica e sísmica de alta resolução demonstra a ocorrência hoje em dia de cunhas sedimentares em torno da ilha de Santa Maria (Ricchi *et al.,* 2018, 2020). Estes sedimentos são interpretados como provenientes da erosão da ilha, mas também de uma acumulação diversificada de restos de organismos heterozoários que vivem na plataforma insular.

As partículas vulcaniclásticas erodidas, bem como os esqueletos de heterozoários, são provavelmente transportados para o largo durante eventos de tempestade, formando cunhas sedimentares. Essas cunhas foram provavelmente formadas durante o atual estádio interglacial (Quartau *et al.*, 2012; Ramalho *et al.*, 2013; Ricchi *et al.*, 2020) e estão depositadas na zona intermédia da plataforma insular ou em terraços cortados na plataforma externa (Fig. 31).



Figura 37. Localização dos perfis sísmicos e das suas seções transversais na plataforma leste da ilha de Santa Maria, mostrando as atuais cunhas de sedimentos. Os perfis sísmicos foram interpretados e apresentados de outra forma em Ricchi *et al.* (2018). A linha vermelha representa a base das cunhas mapeadas e as linhas azuis, os folhetos anteriores de um antigo delta de lava (agora erodido).

Existem poucos exemplos conhecidos de cunhas sedimentares noutros lugares, porque os estudos sobre as plataformas de ilhas vulcânicas são raros. No entanto, clinoformes semelhantes foram relatados para a zona externa ao recife fronteiro à ilha de Oahu por Grossman *et al.* (2006). Também em Oahu, Tsutsui *et al.* (1987) relataram o transporte marítimo de areia da plataforma durante a passagem de um furacão. Da mesma forma, a presença de corpos de areia espessa nas margens do Little e Great Bahama Bank é explicada pelo transporte marítimo de areias carbonatadas durante tempestades (Hine *et al.*, 1981; Chabaud *et al.*, 2016).

Os clinoformes calcareníticos do Plistocénico Inferior em Rhodes, Grécia, são imputados a tempestades num regime regressivo durante um estádio interglacial ou a uma regressão forçada (Hanken *et al.*, 1996; Hansen, 1999). Na região do Mediterrâneo, calcarenitos Pliocénico-Plistocénicos são comuns em margens com gradientes acentuados e sujeitas a tempestades (Massari & Chiocci, 2006). No arquipélago das Ilhas Eólias (ou Ilhas Lipárias), localizado no Mar Tirreno, ao norte da Sicília, foram relatados clinoformes em todas as ilhas, provavelmente resultantes de correntes marítimas ocidentais formadas aquando de tempestades (Chiocci & Romagnoli, 2004; Casalbore *et al.*, 2018). Todos estes exemplos mostram depósitos semelhantes às cunhas deste estudo.

A acumulação de sedimentos e o seu posterior enterro por sequências efusivas submarinas leva à acreção lateral ao redor das ilhas vulcânicas. As rochas sedimentares preservam fósseis, possibilitando desta forma o estudo das alterações paleobiológicas que ocorreram nesses ambientes. O registo é interrompido por fases nas quais os sedimentos não são preservados. Normalmente, estas são fases de inatividade vulcânica. É difícil determinar o intervalo de tempo entre as adições de fatias sucessivas. Somente a geocronologia isotópica, juntamente com uma reconstrução muito mais detalhada da sucessão estratigráfica geral da ilha, poderiam ajudar a reconstruir uma história biótica e sedimentar mais completa da ilha de Santa Maria.

Conclusões

A deposição de cunhas sedimentares ao redor de ilhas vulcânicas oceânicas e o seu enterro protetor e preservação por sequências vulcânicas posteriores representam o processo dinâmico de acréscimo lateral que ocorre, de forma natural, ao longo da evolução geológica destas ilhas. Os fósseis assim preservados nestas cunhas sedimentares fornecem instantâneos paleoecológicos raros dos biota marinhos que atingiram ilhas isoladas, longe da fonte colonizadora mais próxima. Dependendo de variáveis como mudanças climáticas e do nível do mar, a produtividade da "fábrica de carbonatos" e a formação de uma orla sedimentar ao redor de ilhas vulcânicas oceânicas pode ser considerada uma constante.

É contra-intuitivo, mas o encapsulamento de cunhas sedimentares ricas em fósseis é mais episódico e totalmente dependente de intervalos em que se regista um aumento da atividade vulcânica. Nestas circunstâncias, aumenta a probabilidade de acesso a faunas recuadas, que assim têm uma oportunidade de ficarem preservadas para a posteridade.

As conclusões a seguir derivam da nossa investigação detalhada de uma excelente secção estratigráfica na Ponta do Cedro, na ilha de Santa Maria, no arquipélago dos Açores (Uchman *et al.*, 2020):

- Os depósitos sedimentares na secção da Ponta do Cedro exibem quatro cunhas que se formaram em sucessão, nas superfícies frontais de deltas de lava progradantes. A superfície de basalto exposta foi colonizada e incrustada por uma infinidade de invertebrados, tanto em águas litorais no topo do delta de lava como a maior profundidade, nos seus taludes inclinados. Contudo, a deposição de sedimentos bioclásticos ocorreu apenas em partes da encosta, como indicado por restos de organismos de águas litorais que, ocasionalmente, cobrem os de ambientes mais profundos, por exemplo, as bases de octocorais observadas *in situ*. Estas observações revelam uma relação complexa entre os processos vulcânicos de construção, erosão e deposição ao longo da plataforma e das vertentes submarinas de uma ilha vulcânica ativa;
- Não é possível medir o intervalo de tempo entre as fases vulcânicas de quiescência, durante o qual os sedimentos foram removidos pela ação normal de tempestades. No entanto, o encapsulamento de cunhas sedimentares individuais por sobreposição de deltas de lava progradantes representa eventos à escala ecológica, que fornecem informações preciosas sobre o ambiente deposicional dentro do contexto maior de crescimento de ilhas e acreção lateral;
- A biodiversidade encontrada nas três cunhas sedimentares estudadas é variável, mas a cunha 2 é a que preservou uma maior biodiversidade, incluindo quase uma dúzia de espécies de bivalves e quatro gastrópodes, além de representantes de Vermetidae, bem como pelo menos um ouriço-do-mar, rodólitos com precipitações de algas vermelhas de dois tipos, intercalados com incrustações por briozoários e/ou foraminíferos;
- A sucessão na Ponta do Cedro só é acessível para estudo hoje em dia, porque a história geológica da Ilha de Santa Maria envolve um longo período de soerguimento (uplift) e erosão costeira limitada. Exemplos comparáveis de cunhas sedimentares ricas em fósseis, enterradas por atividade vulcânica e subsequentemente expostas noutras ilhas, raramente são relatadas a partir do registo geológico, mas a dinâmica específica da ilha de Santa Maria em relação ao clima, mudanças no nível do mar e vulcanismo fornece um modelo que pode ser aplicado a estudos em andamento noutras partes do mundo.

Delimitação Geográfica da Jazida da Ponta do Cedro



Figura 38: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Ponta do Cedro

7. Ponta do Castelo

A Ponta do Castelo é um promontório elevado na ponta sudeste da ilha de Santa Maria (Fig. 37). Neste local, a sequência sedimentar compreende, a partir da base para o topo: a) sedimentos marinhos fossilíferos com alto teor vulcaniclástico, b) uma sequência típica de delta de lava constituída por uma unidade inclinada de lavas em almofada basálticas e hialoclastitos ("foreset"), que mergulham de forma íngreme (25-35°) com uma orientação para leste, e por uma unidade de lavas subaéreas horizontais ("topset"); e c) lavas em almofada basálticas (onde está localizado o farol), as quais são parte da sequência de outro delta de lava, empilhadas em cima do primeiro e cuja unidade "topset" foi localmente removida por erosão.



Figura 39. A: Ponta do Castelo, com o Farol de Gonçalo Velho no topo. B,D: a jazida da Ponta do Castelo. C: Partida de barco do portinho da antiga Fábrica da Baleia, na Ponta do Castelo.

A frente das escoadas lávicas da sequência principal do delta de lava, formada por lavas em almofada e hialoclastitos sugere progradação do litoral contemporâneo nesta direção, com taxas moderadas de extrusão, e sobre a plataforma insular onde os sedimentos estariam depositados. A exposição contínua ao longo da costa em direção a oeste mostra que os sedimentos na Ponta do Castelo correspondem parcialmente à remobilização de tufos e tufitos depositados em ambiente submarino, resultantes de erupções surtseianas de um cone vulcânico cujos vestígios ainda podem ser vistos mais a oeste, na Rocha Alta. Meireles *et al.* (2013) atribuem a totalidade desta sequência da Ponta do Castelo ao Complexo Vulcânico do Pico Alto e Ramalho *et al.* (2017) dataram as lavas em almofada que recobrem os sedimentos fossilíferos em 4.13 ± 0.19 Ma.

A sequência da Ponta do Castelo é notável pelas suas características, nomeadamente as mega-ondulações (elevações) que podem ser vistas nos sedimentos basais e a estrutura claramente marcada de um delta de lava que recobre os sedimentos (ver Figs. 40 a 43). O afloramento é parcialmente truncado por (em sequência vertical) uma plataforma de abrasão marinha, uma praia e uma antiga falésia do final do Plistocénico, com uma idade que provavelmente corresponde ao último interglacial (MIS 5e, Subestádio Isotópico Marinho 5e, ~120.000-130.000 anos) (Ávila *et al.*, 2008), os quais foram posteriormente recobertos por depósitos de vertente (constituindo o coluvião onde a antiga Fábrica da Baleia está localizada).



Figura 40. Secção transversal geral da sequência vulcano-sedimentar da Ponta do Castelo, mostrando a configuração vulcano-estratigráfica da sequência sedimentar basal (depósito de tempestito) e localização da zona de passagem entre os fluxos subaéreo e submarino (representando o nível do mar coevo) na sequência sobrejacente do delta de lava; d representa a paleo-profundidade da água do mar, contemporânea da parte superior dos sedimentos fossilíferos, conforme inferido a partir da estrutura do delta de lava sobrejacente; a.p.s.l. = acima do atual nível das águas do mar (Meireles *et al.*, 2013).

A geometria do corpo sedimentar parece ser sigmoidal ou em forma de cunha, com a parte superior inclinando cerca de 15° para ENE, e situado numa elevação máxima de aproximadamente 9 m acima do atual nível médio das águas do mar. Não obstante a base da sequência estar enterrada na praia moderna, a proximidade de afloramentos próximos de lavas subjacentes, bem como a geometria da sequência, sugerem que a base da sequência não está

muito longe da superfície. O delta de lava sobrejacente apresenta uma zona de passagem a cerca de 55 m de altitude, sugerindo uma paleo-profundidade de 45-55 m para o depósito (*d* na Fig. 38). A sequência sedimentar é inteiramente composta por arenitos fossilíferos que resultaram da remobilização de tufos hidromagmáticos.

A composição dos grãos é, consequentemente, dominada por clastos vulcânicos não vesiculares e palagonitizados (~ 58%), angulares ou mal arredondados, vítreos, com uma quantidade reduzida de clastos minerais (olivina, piroxena, plagióclase, pequenos óxidos cúbicos, e calcite), fragmentos de conchas de gastrópodes e de bivalves fósseis, fragmentos de rodólitos, equinóides, briozoários, corais e balanídeos, e microfósseis (foraminíferos e ostrácodes), todos cimentados por calcite (sparite).



Figura 41. Depósito sedimentar/tempestito na Ponta do Castelo, SE Santa Maria: A - fotografia do afloramento principal (secção ocidental), com as pessoas a servirem de escala e com os principais contactos erosivos marcados sob a forma de linhas tracejadas. B - secção transversal simplificada dos sedimentos estudados, representando as principais litologias e estruturas sedimentares, contactos, conteúdo fossilífero e localização dos "logs" efetuados. As principais inconformidades erosivas estão representadas por linhas pretas sólidas espessas e a numeração corresponde às fácies deposicionais descritas no texto principal (Meireles *et al.*, 2013).

No entanto, apesar da litologia homogénea, o depósito mostra grandes variações laterais e verticais da estrutura sedimentar. A parte inferior exposta da sequência (fácies 1) é composta por arenitos com até 1 m de espessura, com grão grosso a médio, quase desprovidos de

macrofósseis e com estratificação entrecruzada, com subunidades sedimentares ligeiramente onduladas e de espessura variável entre alguns centímetros a decímetros formando valas baixas, mas largas e, possivelmente "hummocks" (elevações) (ver Figs. 41, 43A e 43B).

A base do depósito não está exposta e a pequena extensão do afloramento impede uma melhor reconstrução geométrica a grande escala. No entanto, é possível que as características observadas sejam realmente parte de um "hummocki" maior. A fácies 1 é composta principalmente por fragmentos vítreos arredondados a angulares, com alguns líticos de lava subarredondados. Tanto os clastos minerais soltos como os fósseis, são raros nesta fácies (Fig. 42).



Figura 42. "Logs" efetuados ao longo da sequência, nas localizações identificadas na Fig. 39 (Meireles et al., 2013).

Acima dos sedimentos anteriores localiza-se um pacote de sedimentos em forma de cunha (fácies 2), que diminui gradualmente de espessura no sentido ENE, passando de cerca de 1,20 m para cerca de 50 cm. Esta fácies 2 apresenta uma variação vertical pronunciada nas estruturas sedimentares e no tamanho do grão e está delimitada por descontinuidades erosivas: a discordância basal é irregular, formando um paleo-relevo com entre alguns centímetros a alguns decímetros de espessura, ao passo que a discordância superior é mais regular e horizontal, com a exceção de um pequeno (em altura), mas largo paleocanal (Fig. 43C). A fácies 2 passa
gradualmente de arenitos micro-conglomeráticos de grão grosseiro na base, para arenitos de grão médio (Fig. 43B), com estratos caóticos/difusos no meio (ambos muito ricos em detritos de conchas); a seguir surgem arenitos de granulação média a fina, com estratificação planoparalela/laminação no topo, compostos por uma alternância de lâminas ricas em bioclastos e ricas em vulcaniclastos. Duas espécies de Ostracoda foram encontrados dentro das lâminas ricas em bioclastos: *Pachycaudites* cf. *armilla* Ciampo, 1986 e *Neonesidea rochae* Nascimento, 1989. Bioturbação em pequena escala (*Diplocraterion* isp.) interrompe os estratos/lâminas superiores.

A subunidade média aumenta de espessura para WSW e a subunidade superior está ausente nessa direção, tendo sido provavelmente removida pela erosão subsequente que criou a discordância superior. Observações em lâmina delgada demonstram que os constituintes são ligeiramente diferentes daqueles presentes na fácies 1. Os fragmentos vítreos de origem vulcânica são menos abundantes do que os líticos de lava, mas clastos palagoníticos muito grandes (até 0,5 centímetros de diâmetro) estão presentes. O material lítico é representado por pequenas vesículas arredondadas e por piroclastos porfiríticos. Clastos minerais soltos e fósseis também são mais abundantes nesta camada. É evidente a presença de uma primeira sparite formando um anel fino em torno de todos os clastos, e de um segundo cimento de sparite preenchendo todos os poros, o que sugere a ocorrência de dois eventos de deposição de cimento caracterizados por diferentes níveis de energia cinética (Fig. 43C).

A fácies 3 é composta por um arenito fossilífero de grão médio, mal classificado, com estratificação caótica/difusa, atingindo até 1,5 m de espessura (ver Figs. 39 e 40). Esta unidade assenta de forma discordante na fácies anterior e preenche o paleo-canal atrás referido; numa das orlas deste paleo-canal, estruturas flamejantes, caudas de sedimento arrastado a partir da sequência anterior e um grande intraclasto estão presentes (ver Figs. 41C e 41D), sugerindo erosão forte e rápida deposição.

De forma semelhante, restos de colónias de briozoários incrustadores de rochas que foram arrancadas do seu substrato rochoso são encontrados "flutuando" nos arenitos – provavelmente correspondentes a *Ellisina* sp., *Onychocella* sp., *Hemicyclopora* sp. e *Reteporella* sp. – bem como restos esqueléticos de corais isolados. Fósseis e restos de conchas estão geralmente dispersos em posições aleatórias/caóticas.

Não é possível fazer corresponder com confiança as fácies observadas ao longo da secção ocidental do afloramento com a secção oriental (ver Figs. 39 e 40). No entanto, parece que os sedimentos existentes na base do log 3" podem estar heterópicos com a fácies descrita acima. Se for esse o caso, há uma variação lateral, passando a estratificação de caótica/difusa na secção ocidental do afloramento, para uma estratificação cruzada fraca na secção oriental.

A análise petrográfica mostra que os constituintes são representados principalmente por fragmentos de palagonite e uma reduzida quantidade de material lítico (piroclastos com pequenas vesículas arredondadas e fragmentos de lava angulares), todos aleatoriamente distribuídos e com um tamanho de grão muito heterogéneo (Fig. 43D). A presença de dois tipos de cimento de sparite é também confirmada aqui.

O evento seguinte produziu uma discordância erosiva profunda que atravessa todas as unidades anteriores, formando uma paleo-topografia irregular, com depressões bruscas, até 3-4 m de profundidade e quase tão largas como profundas. Esta paleo-topografia foi, por sua vez, preenchida pela fácies 4 com uma espessura de cerca de 4 a 5 m, fossilífera, formada por arenitos de grão médio, exibindo uma estrutura "hummocky" de escala métrica. Esta estratificação é geralmente caracterizada por elevações ligeiramente assimétricas e valas que grosseiramente seguem a topografia subjacente, com 1 a 3 m de largura e 0,3 a 1,5 m de altura. As superfícies de truncamento interno são raras, e as elevações estão muito bem preservadas.

A pequena extensão do afloramento e a falta de uma vista 3D apropriada impede, infelizmente, a observação de uma direção preferencial de mergulho ao longo da terceira dimensão, tornando-se muito difícil para verificar se a estratificação existente é isotrópica ou anisotrópica. Os sedimentos são geralmente mal classificados e, tipicamente, estão em relevo positivo ao longo da face do afloramento, como resultado da erosão diferencial. Os sedimentos tendem a ser mais grosseiros e mais ricos em resíduos de conchas no fundo das valas, ou na base de depressões mais profundas. Aos poucos, no topo, o depósito torna-se quase plano-paralelo, com ocasionais ondulações de menor escala. Na secção ocidental do afloramento, a sequência sedimentar está incompleta, pois foi truncada no topo pela plataforma de abrasão marinha correspondente a um depósito Plistocénico do último interglacial (MIS 5e), localizada cerca de 4,5 m acima do atual nível das águas do mar, e contemporâneo de outros depósitos conhecidos do MIS 5e, encontrados ao redor da ilha e a altitudes semelhantes (Callapez & Soares, 2000; Ávila *et al*., 2009, 2010, 2015c). No lado oriental, no entanto, a sequência é completa e o topo pode ser observado, apesar da má acessibilidade e do intemperismo mais intenso. O conteúdo fossilífero é composto por componentes alóctones de uma fauna típica de águas de pouca profundidade.

A presença de microgastrópodos tais como *Anachis avaroides* Nordsieck, 1975 e *Alvania sleursi* Amati, 1987 (vivendo atualmente em torno dos 3-6 m e dos 10-20 m de profundidade, respetivamente; Ávila, 2003) (Fig. 43G), juntamente com a craca *Zullobalanus santamariaensis* (já extinta mas também de águas de pequena profundidade), e vários equinóides sublitorais – por exemplo, espinhos e fragmentos de *Eucidaris tribuloides* (Lamarck, 1816), endoesqueletos

calcários completos de Echinoneus cf. cyclostomus Leske, 1778 e Echinocyamus pusillus (Müller, 1776) (Madeira et al., 2011) –, bem como de colónias de briozoários incrustantes que foram arrancadas do seu substrato rochoso no intertidal para níveis subtidais, mais uma vez confirma a remoção energética e o transporte de sedimentos e de organismos das zonas litorais para zonas mais profundas. Isto é também apoiado pela presença de outros restos fósseis de espécies epipelágicas usualmente arrojadas à costa, como Janthina typica (Bronn, 1861) e ainda por faunas típicas do litoral (por exemplo Arca noae Linnaeus, 1758, Crassadoma multistriata (Poli, 1795), Gari depressa (Pennant, 1777) [= Psammobia aequilateralis]), que pode ser encontrada misturada dentro do sedimento. Organismos fósseis completos e fragmentos de conchas estão geralmente dispersos no sedimento e em posições aleatórias/caóticas. As valvas desarticuladas de conchas de bivalves são frequentemente encontradas em posições praticamente verticais. A parte restante da sequência só é visível na porção oriental do afloramento. Acima dos sedimentos anteriores (somente visível no "log 3"), e limitada por duas superfícies erosivas fracas de menor importância, segue-se a fácies 4b, com cerca de 0,5 m de espessura, rica em conteúdo fóssil, formada por um arenito de granulometria média a grossa, sem estratificação definida. Esta fácies é muito rica em microgastrópodes, bivalves, fragmentos de Zullobalanus santamariaensis (Winkelmann et al., 2010), várias espécies de briozoários, equinóides e rodólitos. Os fragmentos de conchas estão distribuídos de forma aleatória/caótica no interior desta unidade, sem arranjo geométrico preferencial.

Finalmente, a sequência sedimentar termina com uma fácies 4c, formada por arenito maciço, com cerca de 3,7 m de espessura total (ver Figs. 39 e 40). Os primeiros 1,2 m desta unidade 4c correspondem a arenitos de grão médio exibindo uma leve estratificação cruzada, e com alguma bioturbação (tocas) em direção ao topo. Os arenitos passam gradualmente de grão médio a arenitos de granulação fina; esta transição é gradual e marcada apenas pela presença de bioturbação e pela mudança de uma estratificação cruzada fraca a uma estratificação plano paralela, esparsa e quase impercetível. Os detritos de bioclastos diminuem de abundância em direção ao topo da sequência, onde existem algumas (poucas e isoladas) valvas desarticuladas de bivalves, com uma ligeira imbricação vertical (Fig. 43F). Os últimos 1,5 m desta sequência estão intensamente bioturbados por organismos escavadores (*Crossopodia* isp., *Thalassinoides* isp., *Ophiomorpha* isp., *Rhizocorallium* isp. e *Diplocraterion* isp.). Esta turbação intensa provocou a destruição das estruturas sedimentares originais. Lavas em almofada basálticas do delta de lava sobrejacente tapam a sequência, imprimindo figuras de carga nos sedimentos outrora moles, mostrando sem qualquer dúvida que a sequência vulcânica, datada de 4.13 ± 0.19 Ma (Ramalho *et al.*, 2017) é penecontemporânea dos sedimentos subjacentes (ver Fig. 43E).

lv



Figura 43. Fotografias de aspetos detalhados do afloramento, dos fósseis e das estruturas sedimentares existentes. A - Vista do afloramento, mostrando a discordância erosiva entre a unidade 4a e uma crista localizada inferiormente, compreendendo as unidades 1, 2 e 3. Localização da faixa do Log 1; B - detalhe do contacto erosivo entre o tempestito massivo da unidade 4a (exibindo valas preservadas e "hummocks") e a sequência subjacente, que compreende as unidades 1, 2 e 3. Localização da faixa correspondente ao Log 2; C - detalhe da discordância erosiva entre as unidades 2 e 3, mostrando o paleocanal e grandes clastos arrancados da unidade 2, e flutuando na unidade 3; D - detalhe de um dos lados do paleocanal, que mostra estruturas de escape de fluidos de sedimentos ricos em bioclastos da unidade 2 para a unidade 3; E - contacto entre o topo da sequência sedimentar e a ca-mada sobrejacente de lavas submarinas (lavas em almofada e hialoclastitos), com figuras de carga evidentes; F - detalhe de imbricação de uma valva de um bivalve no arenito fossilífero; G - exemplos de gastrópodes fósseis alóctones encontradas no afloramento: *Alvania sleursi* (em cima), *Anachis avaroides* (em baixo), típicos de águas marinhas litorais (tamanho comum 2-4 mm) (Meireles *et al.*, 2013. Atualmente, *Anachis avaroides* é abundante nos primeiros 5 m de água (Ávila, 2003).



Figura 44. Corte transversal do perfil da plataforma costeira. A: Condições de tempestade. A subida do nível das águas é contrabalançada por fortes correntes de profundidade, oblíquas à linha de costa (DC). Estas resultam da soma (seta vermelha) de um forte gradiente de pressão, do excesso de peso dos sedimentos (P/E), da forte força de atrito (F) e da pequena força de Coriolis (C). B: Condições de bom tempo. O sedimento litoral foi transportado e depositado na plataforma insular, abaixo dos 50 m de profundidade. "Hummocky" com estratificação cruzada formam-se acima do nível de base da ondulação em períodos de tempestade, ao passo que depósitos turbidíticos são encontrados abaixo desse nível de base.

Em resumo:

1) De acordo com Meireles *et al.* (2013), os depósitos sedimentares da sequência da Ponta do Castelo são interpretados como tempestitos e as tempestades são indicadas como sendo o principal agente de transporte e de deposição de sedimentos e de material biogénico na plataforma insular de Santa Maria durante o Neogénico;

2) A sequência sedimentar descrita foi provavelmente depositada muito rapidamente, durante décadas ou séculos e só foi preservada porque foi, entretanto, recoberta por um delta de lava, assim ficando protegidos os sedimentos fossilíferos. Estes só ficaram visíveis devido ao posterior soerguimento (*uplift*) da ilha, e subsequente erosão;

3) A rápida deposição inferida para a sequência sedimentar e o delta de lava existente por cima dela foram utilizados para estimar com muita precisão a paleoprofundidade da água, coeva da deposição dos sedimentos do topo da fácies 4c, e estimada em 50-55 m;

4) As tempestades são muito frequentes nos Açores, com ondas muito altas e ventos fortes que produzem sobre-elevação das águas. Gradientes de alta pressão de encontro ao litoral são contrabalançados por correntes de retorno para o mar alto (por vezes em profundidade). Assim, os sedimentos costeiros são facilmente arrastados e mantidos em suspensão por ondas de tempestade e por correntes marinhas. O elevado peso dos sedimentos em suspensão, relativamente elevados gradientes do declive da plataforma insular, conjugado com as fortes correntes de vazante, fornecem o mecanismo

para o transporte de sedimentos arenosos e de material biogénico litoral para profundidades de 50 m ou mais;

Assim, os principais processos de transporte e deposição de sedimentos em plataformas insulares são as fortes correntes de fluxo de retorno, que são formadas durante eventos de tempestade. A estratificação "hummocky" e as ondulações encontradas dentro da sequência são depositadas acima do nível basal de ondas de tempestade, ao passo que os depósitos de turbiditos são depositados abaixo do nível basal de ondas de tempestade (Meireles *et al.*, 2013).

Delimitação geográfica da jazida da Ponta do Castelo



25°1'W

Figura 45: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Ponta do Castelo

Zona Tampão da jazida da Ponta do Castelo



25°1'W

Figura 46: Zona tampão da jazida fóssil da Ponta do Castelo

8. <u>Pedra que Pica</u>

A coquina da Pedra-que-pica (jazida nº 8 da Fig. 1) é um afloramento de grandes dimensões localizado na costa sudeste da Ilha de Santa Maria, na Baixa do Sul, cerca de 0,75 km a oeste da Ponta do Castelo. Por definição, uma coquina é um tipo de rocha sedimentar composta por fragmentos e conchas inteiras de moluscos ou outros bioclastos, os quais sofreram transporte, e em que os elementos de origem biogénica constituem mais de 50% dos elementos sedimentares da rocha.

Sedimentos formando coquinas são abundantes ao longo das costas continentais, e exemplos de coquinas são conhecidos no sudeste da Carolina do Norte e na costa leste da Flórida (EUA; Fallaw, 1973), na Bacia do Guadalquivir, em Cadiz e na parte sul da província de Sevilha, Espanha (Aguirre, 1995) mas em ilhas vulcânicas oceânicas, estas coquinas são muito raras, sendo conhecidas no Oceano Atlântico somente na ilha de Santiago (Baía de Nossa Senhora da Luz, em Cabo Verde; Serralheiro, 1976; Ramalho, 2011) e na ilha de Santa Maria, nos Açores (Serralheiro *et al.*, 1987; Serralheiro & Madeira, 1990; Serralheiro, 2003; Kirby *et al.*, 2007; Ávila *et al.*, 2015a, 2018; Fig. 47).



Figura 47. A - Mapa geológico simplificado da ilha de Santa Maria (Serralheiro *et al.,* 1987; Serralheiro, 2003). B – Perfil da ilha de Santa Maria (ampliação vertical = 3x). C – Localização da Pedra-que-pica (retângulo branco).

Um sistema de dois esporões rochosos proeminentes, agora expostos subaereamente, compostos por lavas em almofada maciças, projetam-se perpendicularmente à linha de costa, ao longo de uma distância de 115 m, adjacentes ao extremo oeste do afloramento da Pedra-que-pica (Fig. 48).



Figura 48. A – B. Posição dos esporões rochosos em relação aos sedimentos fossilíferos da Pedraque-pica. A. Os asteriscos brancos marcam a posição das inclusões de areia calcária, algumas das quais apresentam exemplos do icnofóssil *Macaronichnus segregatis*, nos esporões rochosos. As quatro bandeiras vermelhas indicam a localização dos mergulhos onde foram coletadas amostras de rochas. A linha branca a tracejado representa a área exposta atual da coquina. A linha branca dura contínua representa a área total inferida da coquina. B. Pedra-que-pica vista de leste para oeste (vista lateral).

Este sistema de esporões rochosos atinge uma altitude máxima acima do atual nível do mar no lado oeste (2º esporão rochoso Fig. 48A, B) e é flanqueado por uma superfície irregular contígua,

localizada a leste, com lavas em almofadas erodidas (1º esporão rochoso da Fig. 48A, B). A sequência sedimentar repousa em inconformidade nesta superfície e confina contra o primeiro esporão rochoso. A não conformidade entre as lavas em almofada erodidas e os sedimentos sobrepostos é visível na atual amplitude de marés, sendo particularmente visíveis durante a maré baixa, em torno das margens do afloramento da coquina, e em várias aberturas ("sopradores" ou "blow-holes"), formados pela erosão das ondas.



Figura 49. Estratigrafia e estruturas sedimentológicas na jazida da Pedra-que-pica. A. Seção geral da sequência vulcano-sedimentar, mostrando o cenário vulcano-estratigráfico da sequência sedimentar basal e a localização da zona de passagem entre os fluxos subaéreos e submarinos (representando o nível do mar coevo) dentro do delta de lava que recobre a sequência. B. Estrutura estratigráfica e interpretação da sucessão litológica na jazida da Pedra-que-pica. Os números representados em círculos pretos correspondem às fácies 1 a 8, descritas no texto. A barra de escala indica a localização do perfil composto detalhado (ver Fig. 5).

O afloramento principal da Pedra-que-pica consiste numa sucessão de sedimentos fossilíferos marinhos com 10 a 11 m de espessura, dos quais apenas os últimos 3 a 4 m, localizados a maior

altitude, estão atualmente expostos acima do nível do mar. Estes sedimentos estão intercalados entre uma sequência vulcânica subjacente e uma sequência vulcano-sedimentar a topo (Fig. 4A, B). A base da seção é formada por lavas em almofada (fácies 1), que são truncadas por uma superfície erosiva mergulhando em direção a ENE, até uma profundidade de 6 a 7 m abaixo do nível médio do mar. Localmente, restos limitados de estratos que antecedem a deposição da coquina podem ser encontrados em espaços entre as lavas em almofada, formando bolsas compostas por calcarenitos cinza-claro e de granulação fina (fácies 2; Fig. 50). Estes calcarenitos ocupam um canto da plataforma erosiva, na zona de junção desta com o sistema de esporões rochosos. Não há somatofósseis de grandes dimensões nestes calcarenitos, mas ocorrem abundantes vestígios de icnofósseis pertencentes a Macaronichnus segregatis Clifton e Thompson, 1978 (Uchman et al., 2016; Figs. 48A, 51A, B), com raros Ophiomorpha isp. [identificado erroneamente como Thalassinoides isp. por Kirby et al.(2007)]. Aqui e ali, acima deste nível e localizados nos flancos do sistema de esporões, a uma altura atual de 9 m (estrelas brancas na Fig. 48A), encontram-se pequenos bolsões de areia calcária entre as estruturas das lavas em almofada, os quais também apresentam exemplos adicionais de M. segregatis. Finos diques neptunianos cheios de areia calcária são uma característica proeminente em todo o esporão adjacente aos sedimentos fossilíferos. M. segregatis ocupa os sedimentos desses diques, os quais podem ser seguidos ao longo de uma distância vertical contínua de cerca de 4 m (Fig. 51C, D). O calcarenito (fácies 2; Fig. 50) é truncado em não conformidade por uma superfície de erosão irregular e coberta por uma coquina não estruturada de 3 a 4 m de espessura (fácies 3a-c; figs. 50, 52A-E, 53A-B) (Ávila et al., 2015a).

A parte inferior da coquina está submersa. Através de mergulho com escafandro, Ávila *et al*. (2015a) estimaram a sua área total em 23.463 m² (linha branca dura contínua na Fig. 48A). A parte intermediária da sequência fica exposta na zona entre-marés como uma plataforma de abrasão marinha, com uma área de cerca de 3.179 m², enquanto a parte superior só é recoberta pelo mar aquando de tempestades, continuando por debaixo dos depósitos de vertente, na base do atual penhasco (Figs. 49A, B). O topo da coquina pode ser seguido lateralmente até uma posição próxima do esporão adjacente (cf. Fig. 48), onde fica encostado ao corte abrupto que é visível nos calcarenitos subjacentes. Cerca de 1 m acima da base da coquina, no lado oeste do depósito, é possível observar um leito descontínuo de 30 a 60 cm de espessura, formado por blocos e pedregulhos basálticos subangulares a sub-circulares (fácies 3b; Figs. 50, 52A, D), seguidos por outra camada maciça não estruturada de coquina, com até 2,6 m de espessura (fácies 3c; Fig. 50). As camadas de coquina estão muito mal classificadas (fácies 3a e 3c; Fig. 54A, B), sendo ricas em bivalves de grandes dimensões, mais de 99% deles desarticulados (dominados por ostreídeos, pectinídeos e espondilídeos; Ávila et al., 2015a). Também contém, embora em muito menor quantidade, restos de equinóides (Madeira et al., 2011; Fig. 53C), cracas, braquiópodes, briozoários, algas calcárias (rodólitos) e pequenos corais. Dentes de peixes e de tubarões ósseos (Ávila *et al.,* 2012), bem como moldes de grandes gastrópodes (ex.,

Persististrombus coronatus; Ávila *et al.*, 2016b) são raros, sendo extremamente raros os ossos de cetáceos (Ávila *et al.*, 2015b).



Figura 50. Coluna estratigráfica composta, detalhada, da Pedra-que-pica (N36 ° 55.806 ", W25 ° 01.482"). Os números representados em círculos pretos correspondem às fácies 1 a 6, descritas no texto.



Figura 51. Sedimentos remanescentes e seus vestígios fósseis na topografia pré-existente, abaixo da coquina. A-B. Calcarenitos cinza-claros, formando bolsas de arenito com até 1 m de espessura, bioturbados com abundantes icnofósseis de *Macaronichnus segregatis* e raros *Ophiomorpha* isp., repousando diretamente no leito rochoso. Observe que parte dos sedimentos (as partes ricas em conchas de moluscos) pertencem à coquina sobreposta. C-D. Diques neptunianos cheios de areia calcária e bioturbados por *Macaronichnus segregatis*.

Perto do topo, a coquina contém rodólitos (Fig. 53D) e briólitos abundantes (isto é, nódulos compostos de briozoários; Fig. 53E), bem como colónias de briozoários com uma forma de crescimento rígido ereto; estes podem ser encontrados num calcarenito fino, desprovido de grandes clastos (fácies 3d; Figs. 50, 53F). Estes calcarenitos têm entre 10 e 60 cm de espessura, mostram um topo sub-horizontal, muito regular e são bioturbados. *Asterosoma* isp. é o icnofóssil mais comum (Fig. 53H). Menos comum é uma estrutura tubular com uma haste central, atribuída a *Bichordites* isp., que ocorre na parte oriental do afloramento, a 1–2 cm do topo do calcarenito (Fig. 53G). Os 10 cm superiores contêm abundantes espinhos dos equinóides *Eucidaris tribuloides* (Lamarck, 1816) (Madeira *et al.*, 2011) e fragmentos do coral *Porites* sp. O topo do calcarenito é localmente polido e alguns icnofósseis estão truncados (Ávila *et al.*, 2015a).



Figura 52. Características sedimentares selecionadas da coquina e depósitos associados. A. Vista geral da coquina da Pedra-que-pica vista de oeste. B. Coquina repousando diretamente em cima das lavas em almofada basais do Complexo do Touril (secção leste do afloramento). C. Vista geral da primeira camada de coquina (fácies 3a) vista de leste. Observe a disposição caótica das conchas de ostreídeos menores e a valva de um grande bivalve *Gigantopecten latissimus* em posição vertical (centro da foto). D. Visão mais próxima da camada de conglomerado que separa os depósitos de coquina formados por dois eventos de movimento de vertente em ambiente submarino. O conglomerado é formado por seixos e calhaus vulcaniclásticos (fácies 3b) e está localizado a cerca de 1m da base da sucessão sedimentar do Complexo do Touril, na Pedra-que-Pica. Este conglomerado intermediário contém uma matriz vulcaniclástica de calcarenito, semelhante à matriz da coquina sobrejacente. E. Vista geral da segunda camada de coquina (fácies 3c) vista de oeste.



Figura 53. Características sedimentares selecionadas da coquina e depósitos associados. A. Equinoderme *Clypeaster altus*. B. Rodólito. C. Briólito bioerodido pelo bivalve *Myoforceps aristatus*. D. A coquina vista de cima. E. Um dos muito raros *Gigantopecten latissimus* com as duas válvulas ainda articuladas. F. Calcarenito (secção superior da coquina). G. *Bichordites* isp., um icnofóssil produzido pela escavação efetuada por equinóides espatangóides. H. Arenitos bioturbados por *Asterosoma* isp. (secção leste da Pedra-que-pica).

Sobrepondo-se abruptamente ao calcarenito bioturbado (fácies 3d), está uma unidade de cerca de 36 m de espessura de cinzas vítricas a tufo de lapilli, bem estratificadas, geradas por uma erupção oceânica próxima (fácies 4a; Figs. 49, 55A; Kirby *et al.*, 2007), eventualmente na baía adjacente, onde se localiza a Rocha Alta (Fig. 54). O limite entre as duas unidades é nítido.



Figura 54. Rocha Alta, a presumível fonte emissora dos materiais vulcânicos que recobriram a Pedra-que-pica, na altura localizada sensivelmente no centro da baía a oeste da jazida.

Os 20–30 cm da base dos tufos são caracterizados por tamanhos de grão relativamente finos (cinza fina) e pela presença de estruturas de escape de fluidos (fácies 4, Fig. 50 e Fig. 55B). Nenhum material do calcarenito está incorporado nas camadas basais do tufo. O material tufítico, no entanto, preenche as condutas canaliculadas da bioturbação abertas no topo do calcarenito. Os tufos são recobertos por um horizonte formado por um conglomerado com 0,5 m de espessura (fácies 4b; Fig. 49B), o qual é seguido por uma espessa sequência de um delta de lava, formada essencialmente por lavas em almofada e hialoclastitos (fácies 4c) e a topo, por fluxos lávicos subaéreos planos (fácies 4d). A zona de passagem entre os fluxos subaéreo e submarino marca o nível do mar coevo e presentemente está localizada cerca de 50 m acima do atual nível das águas. Em direção ao topo do penhasco, a sequência é principalmente efusiva e subaérea, com exceção de camadas ocasionais de tufos (fácies 4e e 4 g) e um pequeno conjunto de fluxos de lava submarinos (fácies 4f; Fig. 49B).



Figura 55. A. Coquina (amarelo claro, unidade inferior) sobreposta por cinzas vítricas bem estratificadas e de grão fino a grosso. B. Estrutura de escape de fluidos (fácies 4) na base dos tufos. C. Molde externo de um bivalve (fácies 4). D. Clasto depositado de forma não balística (fácies 4).

Reconstrução paleoambiental da jazida da Pedra-que-pica

Ávila *et al.* (2015a) atribuíram particular importância à topografia preexistente. À semelhança do que atualmente sucede, existia um proeminente sistema de esporão, formado por lavas em almofada emitidas no final do Miocénico e que avançavam para o sul, numa direção perpendicular à costa atual (cf. Figs. 47, 48). Uma plataforma erosiva foi entalhada nas lavas em almofada, que agia como uma zona de acumulação. Desse modo, o sistema de esporões agia como uma armadilha eficaz capaz de acomodar e reter um volume considerável de materiais bioclásticos no ambiente litoral (Fig. 48A). Esta característica costeira proeminente desempenhou um papel fundamental ao impedir a deriva litoral e consequente transporte de sedimentos ao longo da linha de costa, assim permitindo a acumulação de sedimentos.

Uma redução do nível das águas do mar deve ter ocorrido após a escorrência das lavas submarinas, com o ângulo entre a plataforma na primitiva costa e o esporão proximal a definir uma paleomorfologia, com orientação norte-sul. Posteriormente, aquando de nova subida das águas do mar, este paleossistema ficou submerso. A largura original da superfície erodida abrange toda a plataforma de lavas submarinas, situada sob o depósito de coquina adjacente, imediatamente a leste.

Os remanescentes da fase inicial de sedimentação que cobre a margem da plataforma são representados por bolsas de calcarenito bioturbado que incluem o fóssil *Macaronichnus segregatis* (Fig. 51A-D). Arenitos altamente bioturbados com *Macaronichnus* e principalmente galerias esparsas e verticais atribuídas a crustáceos, ocorrem normalmente em ambientes litorais de baixa profundidade (Pemberton *et al.*, 2001). Sabe-se que traços incipientes de *Macaronichnus* são produzidos hoje em praias arenosas por alguns poliquetas ofelídeos, como os pertencentes ao género *Euzonus* (Nara e Seike, 2004; Seike, 2007).

Assim, as ocorrências em massa deste icnofóssil são geralmente consideradas como um excelente indicador de condições ambientais intertidais. *Macaronichnus* isp. está reportado para o arquipélago de Cabo Verde (Mayoral *et al.*, 2013), mas, tanto quanto se sabe, a sua ocorrência dentro de sedimentos de calcarenito em diques neptunianos como os que dissecam o esporão rochoso adjacente à Pedra-que-pica são únicos (cf. Fig. 51C, D; Ávila *et al.*, 2015a). A representação contínua desses vestígios fósseis ao longo de um espaço vertical de 4 m sugere uma elevação do nível do mar. Além disso, como bolsões de arenito carbonatado semelhante estão retidos nos flancos do esporão rochoso, que atualmente sobe 9 m acima do atual nível das águas do mar, infere-se que uma mudança mínima no nível do mar local foi de, pelo menos, 9 m durante os estágios iniciais da sucessão. Desta forma, Ávila *et al.* (2015a) referem um aumento coevo da profundidade da água superior a 9 m acima da plataforma costeira adjacente, para esta se tornar inteiramente subtidal. O facto de a borda oeste da coquina parcialmente truncar e cortar os calcarenitos anteriores (Fig. 6A), é interpretado precisamente como sendo o resultado desse regime transgressivo.

A coquina parece ter sido formada por, pelo menos, três eventos, como indicado pela ocorrência de duas camadas (fácies 3a e 3c), separadas por uma camada semi-contínua de cascalho basáltico (fácies 3b; figs. 50, 52D). Este depósito é, assim, interpretado como sendo o resultado de pulsos discretos de material depositado em condições de alta energia, apesar da falta de estratificação ou estrutura interna óbvia. Por último, é de realçar que o local de descanso final para este depósito tripartido (leito de conchas, conglomerado e leito de conchas) foi efetivamente restringido por uma configuração submarina natural (uma depressão de grandes dimensões) onde os materiais ficaram aprisionados.

A abundante ocorrência de valvas internas de ostreídeos e de pectinídeos incrustadas com briozoários e, no exterior, com marcas de bioerosão argumenta a favor de uma origem primária

(bivalves vivos) e secundária (quando ocorreu bioerosão e incrustação post mortem) dos constituintes da coquina da Pedra-que-pica, antes da deposição final. Enquanto a bioerosão ocorre principalmente em superfícies voltadas para cima na zona eufótica (Wisshak *et al.*, 2010, 2011), a maioria dos briozoários são criptobiontes e instalam-se preferencialmente no interior côncavo das conchas, que, na sua posição energeticamente mais estável, estão voltadas para baixo. No entanto, na Pedra-que-pica, o lado côncavo, incrustado com briozoários, de muitas das pequenas valvas de ostreídeos e pectinídeos fica voltado para cima, o que contrasta com a posição energeticamente estável adotada pela maioria das grandes valvas de *Gigantopecten latissimus* (cf. Fig. 56).

Esta distribuição bimodal ocorre em toda a seção vertical do depósito e deve estar relacionada com as características intrínsecas do processo de deposição a essa profundidade (Ávila *et al.*, 2015a). A bimodalidade pode ser explicada por uma queda de detritos sensu Titschack *et al.* (2005), com diferentes comportamentos hidrodinâmicos das conchas, de acordo com o seu tamanho e forma.

As conchas menores e mais convexas (como os ostreídeos) podem depositar-se numa posição côncava, exibindo uma maior proporção de sustentação/arrasto do que as conchas maiores e mais planas (como o *Gigantopecten*) e, portanto, podem ser mais propensas ao movimento por rolagem, enquanto as valvas maiores e mais planas são transportadas por um processo de deslizamento ao longo da encosta, o que pode favorecer uma deposição em posições mais estáveis (ver Oliveira e Wood, 1997).

Uma explicação alternativa é que as velocidades das correntes marinhas junto ao substrato durante os eventos de tempestade foram suficientemente elevadas para derrubar as conchas grandes e pesadas de *Gigantopecten* recentemente depositadas na sua posição mais estável (com a concavidade para baixo) e que essas altas velocidades induziram uma deposição caótica das conchas das ostras, mais pequenas e muito mais abundantes, que foram rapidamente cobertas e, portanto, travadas em posições instáveis, por sucessivas camadas de novas conchas (Ávila *et al.*, 2015a).

O mecanismo que despoletou o transporte e deposição das conchas nas condições energéticas atrás referidas, não é totalmente claro. Mecanismos plausíveis são a ocorrência de terramotos e de grandes tempestades, os quais podem ser responsáveis por desencadear estes eventos redeposicionais. Como os terramotos são muito menos frequentes do que as grandes tempestades na região, Ávila *et al.* (2015a) referem as tempestades com tendo sido os iniciadores mais prováveis dos eventos atrás referidos. A paleocomunidade fóssil que ocorre na Pedra-que-pica indica uma fonte marinha num ambiente de pouca profundidade. Os balanídeos *Zullobalanus santamariaensis* (Buckeridge & Winkelmann *et al.*, 2010) e o bivalve *Gigantopecten latissimus* terão ocorrido em ambientes de águas rasas e sujeitas a algum hidrodinamismo; os rodólitos requerem habitats dentro da zona fótica, bem como, pelo menos periodicamente, condições de alta energia prevalecentes (Piller e Rasser, 1996); os ouriços *Clypeaster altus* (Leske, 1778) e *Eucidaris tribuloides* (Lamarck, 1816) são habitantes típicos de águas litorais, sendo mais comuns em profundidades inferiores a 50 m (Madeira *et al.*, 2011); O *Myoforceps aristatus* é um bivalve que vive em substratos calcários geralmente logo abaixo da marca da maré-baixa.

Este bivalve não ocorre hoje nos Açores devido à falta de substrato apropriado (Ávila *et al.,* 2010), pois não é capaz de perfurar lavas e, atualmente, a produção de carbonatos é muito limitada na zona litoral entre-marés.

As perfurações efetuadas pelos produtores dos icnogéneros *Gastrochaenolites*, *Entobia* e *Caulostrepsis*, são típicas das icnofácies de *Entobia*, cuja formação requer exposição do substrato por meses, se não anos (Bromley, 1992).

Estas perfurações ocorrem principalmente nas zonas litorais de baixa profundidade (Ekdale *et al.*, 1984), geralmente nas superfícies de conchas viradas para cima (Wisshak *et al.*, 2010).



Figura 56. Cortes estratigráficos efetuados nos locais indicados da coquina. Uma distribuição bimodal é claramente visível, a maioria das grandes valvas de bivalves *Gigantopecten* em posição concordante (orientadas com a concavidade para baixo) e as pequenas valvas de *Ostrea* spp. e de outras espécies de bivalves depositadas em posição principalmente concordante, mas com um elevado número de valvas também em posições instáveis (perpendiculares e oblíquas). A-C. Diagramas em rosa para as 1.482 valvas de ostreídeos (contadas nos três transetos verticais). D. Diagrama em rosa para as 389 valvas de *Gigantopecten latissimus* (contadas ao longo de todo o afloramento; canto superior direito). Os ângulos das conchas para a construção dos diagramas em rosa foram medidos de acordo com a figura. A pessoa mais alta (em cinza) tem cerca de 1,80 m de altura.

A maioria dos fósseis (especialmente as conchas de bivalves e os seus briozoários incrustantes) exibe um baixo grau de fragmentação (principalmente limitada às bordas da concha), abrasão e/ou retrabalhamento, indicando uma proveniência proximal, seguida por transporte e deposição da coquina em águas um pouco mais profundas, abaixo do nível da agitação marinha provocada pelas ondas em períodos de bom tempo, onde as condições de baixa energia impediram o retrabalhamento e a fragmentação do material das conchas. Assim, a assembleia fóssil da Pedra-que-pica representa uma fauna alóctone gerada numa fábrica de carbonatos altamente produtiva e localizada em níveis litorais pouco profundos, que foi posteriormente transportada (como discutido acima) para um local mais calmo e profundo.

A ocorrência de apenas cinco valvas de *Gigantopecten* ainda unidas (1,3%), juntamente com o grau de fragmentação e classificação das conchas, também indica uma remoção rápida seguida de um rápido transporte e acumulação destas conchas, provenientes de uma fonte próxima. Em latitudes temperadas, a desarticulação pós-morte das valvas de pectinídeos devido à deterioração dos ligamentos orgânicos ocorre numa questão de meses a anos (Best, 2008). No momento da deposição, as condições paleoclimáticas na ilha de Santa Maria teriam sido típicas de um ambiente tropical, portanto a degradação dos tecidos moles e a consequente desarticulação das valvas dos pectinídeos teriam sido mais rápidas (semanas a meses) do que num clima mais temperado (Best et al., 2004). De acordo com Ávila et al. (2015a), no momento da deposição da coquina da Pedra-que-pica, prevaleciam em Santa Maria condições tropicais, com temperaturas mínimas das águas à superfície do mar (SST's – "Sea-Surface Temperatures") acima dos 19° C, ou seja, cinco graus mais altas do que atualmente. Estes cálculos baseiam-se na ocorrência no registo fóssil da Pedra-que-pica de Gigantopecten latissimus e Clypeaster altus, bem como na presença de Persististrombus coronatus, Ficus sp., Conus spp., Xenophora sp. e Porites sp. A ocorrência comum de espécimes de Persististrombus na Pedra-que-pica aponta para SST's muito mais elevadas do que as atuais, com temperaturas mínimas da superfície do mar nos Açores à volta dos 14° C durante o inverno (Wisshak et al., 2010). De fato, de acordo com vários autores, a presença de Persististrombus requer SST anual média entre os 23 a 24° C e SST no inverno não abaixo dos 19 a 21° C (Bardají *et al.*, 2009; Zazo *et al.*, 2010).

Em resumo, Ávila *et al.* (2015a) interpretam a sequência fossilífera da Pedra-que-pica como representando uma sucessão de vários depósitos de detritos (sensu Titschack *et al.*, 2005) cuja deposição final foi desencadeada por grandes eventos de tempestades que removeram os sedimentos do seu ambiente original próximo à antiga linha de costa (Fig. 57B) para uma área com um gradiente mais elevado, localizado na plataforma insular. Esses eventos levaram materiais bioclásticos (conchas de bivalves em especial) para um depocentro local, situado abaixo da ação das ondas em períodos de calmaria (cf. Fig. 47, 57C), onde o sistema de esporões rochosos lávicos agiu como uma barreira costeira protetora. A acumulação de sedimentos finos continuou durante as condições subsequentes de bom tempo, quando o calcarenito no topo da coquina foi colonizado por invertebrados. Como resultado desta colonização, houve um aumento da bioturbação por poliquetas e equinóides espatangóides de grandes dimensões, os quis produziram os icnofósseis *Asterosoma* isp. e *Bichordites* isp., respetivamente (Fig. 57D; Uchman, 1995, 1998).



Figura 57. Modelo deposicional inferido para a formação de uma coquina no contexto de uma plataforma insular usando a Pedra-que-pica como exemplo (figura sem escala). A. Formação da areia de carbonato basal com abundantes *Macaronichnus segregatis* Clifton e Thompson, 1978, durante o nível do mar relativo mais baixo, mas em rápida subida. B. Elevação do nível do mar e estabelecimento de uma fábrica de carbonato em águas litorais. O transporte de detritos cai da fábrica de carbonato de águas de baixa profundidade para partes mais profundas da plataforma insular (~50 m de profundidade), possivelmente desencadeado por eventos de tempestade. C. Diminuição gradual do evento de tempestade e restabelecimento das habituais condições hidrológicas, permitindo a deposição de sedimentos mais finos (areia fina), os quais se espessam contra o esporão rochoso que age como uma barreira/proteção costeira. D. Condições de clima normais. Bioturbação dos calcarenitos por organismos invertebrados oportunistas.

Delimitação geográfica da jazida da Pedra que Pica



25°1'30"W

Figura 58: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Pedra que Pica

lxxvi

9. Vinha Velha

A Vinha Velha é uma jazida Plistocénica cujos fósseis e sedimentos marinhos foram depositados durante o último estádio interglacial, sobre uma plataforma de abrasão marinha talhada em rochas do Complexo Touril. Este afloramento tem cerca de 60 m de largura máxima (no sentido E-W), prolongando-se por cerca de 150 m, ao longo do contorno de dois pequenos esporões rochosos formados por basaltos submarinos, (Fig. 60B). A sequência sedimentar repousa sobre uma plataforma de costa irregular que fica entre 5 a 7 m acima do nível do mar atual, esculpida em basaltos submarinos do Complexo Touril (Figs. 59 e 60; fácies 1, Fig. 61).

O embutimento do MIS 5e está localizado na costa a uma altitude \pm 6,97 \pm 0,20 m (Fig. 14B, "MIS 5e shore angle"). Os sedimentos marinhos depositados por cima desta plataforma de abrasão marinha são compostos por areias vulcano-bioclásticas, não consolidadas, muito fossilíferas (fácies 2, Fig. 61) com até 1,0 m de espessura, sem estruturas sedimentares visíveis. O tamanho do grão das areias é dominado pelas frações de 250-500 µm. Estas areias são ricas em fósseis, predominantemente moluscos, os quais estão muito bem preservados. Os bioclastos consistem principalmente em moluscos inteiros ou conchas fragmentadas, com briozoários e equinodermes como componentes acessórios.

Estas areias fossilíferas estão cobertas por um depósito coluvial/talus subaéreo multifásico, espesso (até 20 m), constituído por camadas finas (com até 1,0 m de espessura) de sedimentos terrígenos não-fossilíferos, não consolidados, alternados com conglomerados/brechas (fácies 3a-f, Fig. 61). As rizoconcreções são abundantes no topo do solo de algumas camadas (por exemplo, nas fácies 3a, b, c, e, f; cf. Fig. 61). Duas camadas de lapilli de pedra-pomes (diâmetro máximo de 1 cm) foram encontradas próximas do topo do depósito coluvial. Moluscos terrestres são pouco frequentes, podendo ser encontrados espalhados por todo o depósito coluvial, mas são abundantes na fácies 3e (Fig. 61), num solo pouco desenvolvido cuja espessura varia lateralmente de 0,1 m a cerca de 0,4 m. Esta unidade é coberta por mais camadas coluviais (fácies 3f, Fig. 61), onde ossos fósseis de pássaros são comuns (Fig. 60E).



Figura 59. A: Vista aérea com a posição do depósito fossilífero da Vinha Velha, localizado a oeste da jazida Pliocénica da Pedra-que-pica. B: Vista lateral do afloramento de Vinha Velha. C, D: Corte transversal geral da sequência estratigráfica da Vinha Velha, mostrando as lavas basais do Complexo Touril, e a sequência sedimentar do final do Plistocénico (MIS 5e e sedimentos mais jovens) depositados em cima das lavas.



Figura 60. Afloramento da Vinha Velha. A: Vista geral do afloramento. B: Vista lateral (foto tirada de oeste). C, D: Detalhe do conteúdo fossilífero. E: Detalhe de osso fóssil de ave marinha.



Figura 61. Cortes estratigráficos simplificados dos afloramentos do último estádio interglacial estudados em Santa Maria, representando as principais litologias, estruturas sedimentares, contatos e conteúdo fossilífero. Os números correspondem ao descrito nos quatro Relatórios do Plano de Ação do PaleoParque Santa Maria e descrevem as principais unidades deposicionais.



Delimitação geográfica da Jazida da Vinha Velha

Figura 62: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Vinha Velha

10. Pedrinha da Cré

A jazida da Pedrinha da Cré localiza-se na costa sul da ilha de Santa Maria, a leste da jazida da Malbusca. Neste local, ainda não descrito mas onde já foram recolhidas amostras, existem, duas jazidas de idades possivelmente diferentes: a primeira, localizada a menor altitude, cerca dos 2 a 5 m, corresponde a um depósito muito pouco rico, do último estádio interlacial, e de onde só está reportada uma espécie de gastrópode, a lapa *Patella candei* d'Orbigny, 1840 (Fig. 64); a segunda, muito mais interessante, está localizada a cerca de 12 m de altitude e será, muito possivelmente, a única jazida do MIS 11, com uma idade de cerca de 400.000 anos. Para esta última jazida estão reportadas 5 espécies, mas muitas mais foram recolhidas, aguardando ainda serem tratadas, triadas e identificadas (Fig. 65).



Figura 63: Amostras recolhidas na Pedrinha da Cré. Em cima: à esquerda, pormenor da jazida do MIS 5e; à direita, lapa *Patella candei*. Em baixo: vista geral da jazida do MIS 5e.



Figura 64: Amostras recolhidas na Pedrinha da Cré, na jazida do MIS 11 (?). À direita: exemplar de *Haliotis tuberculata* Linnaeus, 1758.

Delimitação geográfica da jazida da Pedrinha da Cré

<page-header><figure><figure>

Figura 65: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Pedrinha da Cré

11. Baía de Nossa Senhora

A Baía de Nossa Senhora é uma jazida Pliocénica com uma extensão lateral significativa, com cerca de 140 m (Fig. 66). Neste local existem duas grutas artificiais de onde foram extraídos calcários para a produção de cal. Embora já tenhamos explorado este local em profundidade e recolhido muitas amostras, estas ainda não foram estudadas em detalhe, faltando efetuar a triagem e identificação dos exemplares. Os dados preliminares, baseados principalmente no registo fotográfico, reportam a ocorrência de 16 espécies: 4 espécies de algas calcárias, 4 moluscos gastrópodes, 7 moluscos bivalves e 1 equinoderme. Neste local encontram-se alguns dos mais belos exemplares dos moluscos gastrópodes *Xenophora* sp. e *Persististrombus coronatus* (Defrance, 1827) (Fig. 67). Quanto aos icnofósseis, estão reportadas 6 icnoespécies.



Figura 66: Em cima: vista geral do afloramento da Malbusca (à esquerda) e da Baía de Nossa Senhora (à direita). Em baixo, à esquerda, gruta oeste e à direita, gruta leste da jazida Pliocénica da Baía de Nossa Senhora.



Figura 67: Moluscos mais representativos. À esquerda: Xenophora sp.; à direita: Persististrombus coronatus.

O afloramento da Baía de Nossa Senhora fica a leste da Ponta da Malbusca. Está localizado na base de sequências eruptivas submarinas expostas na ilha de Santa Maria, formadas durante o início do Pliocénico (Ramalho *et al.*, 2017). A falésia quase vertical expõe uma secção dos Complexos vulcano-sedimentares Touril e Pico Alto (Fig. 68A).

A sequência foi descrita por Rebelo et al. (2016), Johnson et al. (2017) e Ramalho et al. (2017), e compreende, da base para o topo: (1) lavas basálticas compactas com 0 a ~16 m de elevação; (2) uma seguência de sedimentos marinhos fossilíferos e níveis subordinados de tufos hidromagmáticos, depositados em inconformidade sobre lavas em almofada entre os ~16 m a ~ 20 m de elevação, os quais estão preservados apenas no lado oriental da Baía de Nossa Senhora, onde foram recobertos por um delta de lava; (3) entre os ~20 m a ~40 m de elevação, uma sequência de lavas em almofada ("pillow-lavas") e hialoclastitos que mergulham para oeste, e correspondentes aos folhetos de um delta de lava (cuja unidade de topo, "topset", foi removida pela erosão) que está presente apenas no lado leste da baía; (4) uma sucessão complexa de sedimentos fossilíferos marinhos compreendendo principalmente calcarenitos, arenitos e tufitos (ver Rebelo et al., 2016 e Johnson et al., 2017) sobrepostos contra a superfície frontal do delta de lava e que, a oeste, se encontra sobre lavas em almofada basais; (5) em conformidade sobre esses sedimentos (e em inconformidade acima do delta de lava erodido), uma extensa sequência de fluxos de lavas basálticas submarinas tabulares e espessas, bem como de lavas em almofada, com sedimentos intercalados ocasionais, até aproximadamente 145 m de elevação; (6) em conformidade sobre a sucessão submarina, está um pacote de 15–25 m de fluxos de lava subaéreas; e (7) um cone de "spatter" basáltico (Pico Maloás; Fig. 8B). As unidades 1–4 são consideradas parte do Complexo Vulcano-sedimentar Touril, enquanto as unidades 5-7 são consideradas parte do Complexo Vulcânico Pico Alto (Serralheiro et al., 1987; Serralheiro, 2003; Rebelo et al., 2016; Ramalho et al., 2017) (Fig. 68B).

Em termos de idade, as geocronologias por K-Ar e Ar-Ar de Sibrant *et al.* (2015) e de Ramalho *et al.* (2017) sugerem que toda a sequência se depositou entre, aproximadamente, 4,32 e 4,0 Ma. Efetivamente, a unidade 1 e a parte inferior da unidade 5 foram datadas, respetivamente, de 4,32 \pm 0,06 Ma e 4,02 \pm 0,06 Ma por Sibrant *et al.* (2015), enquanto que o topo da unidade 5 foi datado de 4,08 \pm 0,07 Ma por Ramalho *et al.* (2017); as duas últimas idades sobrepõe-se nos respetivos intervalos de incerteza. Assim, infere-se uma deposição muito rápida de toda a sequência vulcano-sedimentar durante um período transgressivo, entre os 4,32 e os 4,0 Ma (Ramalho *et al.*, 2017) (Fig. 68B).





Figura 68: Visualização e seção transversal da Baía de Nossa Senhora. A. Vista da falésia onde os sedimentos afloram com indicação dos antigos locais de extração (caverna W, caverna E) e delta de lava B. Seção geológica geral da falésia indicando as principais características do afloramento e idades publicadas (* - Ramalho *et al.*, 2017; ** - Sibrant *et al.*, 2015).

Delimitação geográfica da jazida da Baía de Nossa Senhora

25°3'45"W



25°3'45"W

Figura 69: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Baía de Nossa Senhora

12. <u>Malbusca</u>

A Ponta da Malbusca corresponde a um enorme empilhamento de cerca de 150 m, de lavas submarinas e sedimentos fossilíferos intercalados, extruídos e depositados durante uma fase transgressiva (i.e. de subida relativa do nível do mar) no início do Pliocénico, passando as lavas submarinas a subaéreas praticamente no topo da encosta.

A zona de passagem encontra-se aos cerca de 130 m e marca o paleo-nível máximo das águas do mar durante a génese desta sequência. Tendo em conta que o nível médio das águas do mar durante o início do Pliocénico nunca esteve acima dos +50 m (Miller *et al*. 2005), é possível inferir que a ilha terá sofrido movimentos de soerguimento (uplift) relativamente aos fundos marinhos que a rodeiam de, pelo menos, 80 m (130-50 =80 m). A sequência da Malbusca é, assim, um dos locais onde se podem ver as evidências do uplift sofrido pela ilha de Santa Maria nos últimos 5 Ma (Fig. 70).

É igualmente na Ponta da Malbusca que se observa uma enorme diversidade – com excelentes condições de afloramento – de tipologias diferentes de lavas submarinas, como resultado de taxas de extrusão/efusão diferentes. Estas formações submarinas exibem características sugestivas de taxas de extrusão moderadas a altas, como é atestado pela profusão de sequências de lavas em almofada (pillow lavas) sem material hialoclastítico intersticial, a presença de "megapillows", e acima de tudo de mantos lávicos submarinos ("submarine sheet flows") (Fig. 70).

A descrição que se apresenta a seguir, baseia-se em três trabalhos, os dois primeiros publicados por Rebelo *et al.* (2016a, b), e o terceiro por Johnson *et al.*, (2017). Os trabalhos de Rebelo *et al.* (2016a, b) focam com particular atenção os rodólitos, que são muito abundantes nesta jazida, ao passo que Johnson *et al.* (2017) abordam o tema do ponto de vista do leito grande de sedimentos arenosos na altura (hoje um arenito), o qual possui considerável espessura. Curiosamente, ambos os autores apresentam um modelo para, respetivamente, a deposição dos rodólitos (Rebelo *et al.*, 2016a), e do atual arenito (Johnson *et al.*, 2017).

A jazida da Malbusca foi estudada por Rebelo *et al*. (2016a) através de vários transetos ou logs, efetuados ao longo dos mais de 300 m de extensão lateral que constituem a jazida (Fig. 9). Vários detalhes correspondentes a aspetos particulares dos logs efetuados podem ser visualizados nas Figs. 73 a 76.



Figura 70. Sequência vulcano-sedimentar da Ponta da Malbusca, composta essencialmente por lavas em almofada (pillow lavas) e mantos submarinos, intercalados por sedimentos marinhos fossilíferos (tempestitos), e produtos subaéreos no topo. A zona de passagem entre produtos submarinos e subaéreos encontra-se aos ~130 m de altitude, definindo assim um paleo-nível do mar que permite inferir os movimentos de soerguimento/uplift que afetaram a ilha de Santa Maria. A diversidade de tipologias de lavas submarinas faz deste afloramento um local ideal para observar este tipo de lavas.


Figura 71. Sequência vulcano-sedimentar da Ponta da Malbusca. A-G - Localização dos logs estudados; a linha tracejada branca marca a zona de passagem entre as unidades submarinas e as unidades subaéreas. Em baixo, o modelo da relação espacial das unidades sedimentares expostas na secção da Malbusca, com base na correlação dos registos individuais e dados de campo. Observe o relevo acentuado das lavas em almofada subjacentes, os folhetos com hialoclastitos na parte leste da jazida, e o espessamento da sucessão sedimentar em direção a norte. A altura das seções está exagerada por um fator de cinco (Rebelo *et al.*, 2016a).

De acordo com Rebelo *et al.* (2016a), e de forma muito resumida, as várias fácies (1 a 9), patentes na Fig. 72 são: fácies 1: lavas em almofada *in situ*, representando um paleo-relevo; fácies 2a: calcarenito de grão fino, aprisionado no interior dos paleo-relevos, sendo o primeiro representante de vários eventos de tempestitos (tempestitos multifásicos, os quais compreendem desde a fácies 2a até à fácies 6); fácies 2b: camada espessa de rodólitos, correspondendo a rodólitos *in situ* e rodólitos que sofreram transporte; fácies 3: brecha formada

essencialmente por conchas que foram retrabalhadas (e assim partidas) aquando de tempestades; fácies 4: arenito/calcarenito vulcaniclástico bioturbado, o que significa uma diminuição da energia hidrodinâmica relativamente à facies 3; fácies 5a e 5b: arenito grosseiro, bioclástico/vulcaniclástico, com bioturbação no topo, representando o enchimento do espaço de acomodação por sedimento arenoso; fácies 5c: arenito grosseiro, bioclástico/vulcaniclástico, com setratificação "hummock", correspondendo a um depósito de tempestade, e que foi associado por Johnson *et al.* (2017) a um depósito que se terá formado aquando da passagem de um furação por Santa Maria, no início do Pliocénico; fácies 6: arenito muito bioturbado em ambiente de pouca profundidade; fácies 7: lavas em almofada que terminaram com a sucessão sedimentar; fácies 8: arenito com estratificação entrecruzada, correspondente a ambientes litorais de alta energia, intercalados com fluxos de lavas submarinas; fáices 9: brecha, correspondente a depósitos de vertente.



Figura 72. Logs estratigráficos detalhados da sequência neogénica da Malbusca, com correlação das diferentes litofácies nos diferentes logs. Os símbolos de estrela e círculo indicam, respetivamente, o local de recolha dos nanofósseis e dos rodólitos calcários (Rebelo *et al.*, 2016a).



Figura 73. a - Folhetos de hialoclastitos (posição G na Fig. 9). b – g - Vistas da Malbusca A com detalhes das diferentes unidades. b - Visão geral da Malbusca A. c – Acumulação de conchas (log A). d - Detalhe da unidade de rodólitos basal com intrusão magmática. e - Rodólito coberto por cracas *Zullobalanus santamariaensis*. f - Unidade de arenito bioturbado (fácies 5c). g - Detalhe da fácies 5c, onde é possível ver vestígios fósseis de *Macaronichnus segregatis* e de *Thalassinoides* isp. (Rebelo *et al.*, 2016a).



Figura 74. Vistas da Malbusca B e C, com detalhes das diferentes unidades. a - Visão geral da Malbusca B. b - Detalhe dos rodólitos na unidade basal. c - Detalhe da unidade no canal de enchimento multifásico. d - Visão geral da Malbusca C. e - Detalhe da unidade basal do rodólito. f - Detalhe do arenito com manchas de rodólitos e conchas (Rebelo *et al.*, 2016a).



Figura 75. Vistas da Malbusca D com detalhes das diferentes unidades. a - Visão geral da Malbusca D. b - Detalhe do rodólito basal e da fácies de arenito. c - Detalhe das estruturas bioturbadas (? *Bichordites* isp.) nos 20 cm do topo do arenito. d - Transição das fácies 5 a 6, com início de abundantes *Macaronichnus* isp. (log D; a escala mede 10 cm). e - Sucessão do log D; observe o topo plano de calcarenitos bioturbados (fácies 6), sobrepostos por um manto de lavas submarinas (Rebelo *et al.*, 2016a).



Figura 76. Sucessão sedimentar completa com cerca de 7 m de espessura, exposta nas paredes verticais de um esporão estreito de rocha, projetando-se da arriba na posição E (cf. Fig. 9). a - A unidade com rodólitos é pouco desenvolvida no lado ocidental. b - Grandes pedras na base da sequência, incrustadas por algas coralinas (setas). c - Os rodólitos preenchem o relevo mais profundo do lado oriental. d - Detalhe dos rodólitos preenchendo o relevo basal (log E). Em direção ao sul (à esquerda em c), uma camada de hialoclastitos está ensanduichada entre o leito sedimentar superior (calcarenito bioturbado, fácies 6) e o fluxo de lava sobrejacente. Observe a espessura diferente das camadas individuais no lado oeste (a) e leste (c) desta arriba (Rebelo *et al.*, 2016a).

De acordo com Johnson *et al.* (2017), os estratos sedimentares existentes em ilhas vulcânicas oceânicas a diversas altitudes oferecem uma oportunidade única para o estudo de ambientes sedimentares costeiros de épocas recuadas, em locais isolados no meio do oceano e, por vezes, de biotas fósseis. Santa Maria, nos Açores (Fig. 77A), é uma dessas ilhas com extensos depósitos de carbonatos marinhos do Pliocénico inferior, com cerca de 4-5 Ma de idade, preservados/encapsulados pela atividade vulcânica, e expostos hoje em dia devido ao subsequente soerguimento do edifício insular e da ação dos fenómenos erosivos/intemperismo (Ávila *et al.*, 2015; Rebelo *et al.*, 2016a; Ramalho *et al.* 2017). A secção da Malbusca, na costa sul, exibe uma sequência vulcano-sedimentar de 150 m de espessura, contendo produtos efusivos intercalados com arenito rico em bioclastos, e finalmente recobertos no topo por mantos de lava subaéreos (Fig. 77B). A sucessão sedimentar mais contínua possui cerca de 20 m de espessura, e inclui um leito de arenito, designado por informalmente "leito grande", com 5 m de espessura (Fig. 77C-G) (Rebelo *et al.*, 2016a; Johnson *et al.*, 2017).



Figura 77. Localização e aparência do leito de tempestade mais espesso (bb - leito grande); outras abreviações: abb - sedimentos acima do leito grande; ba - basaltos, cl - arriba fóssil; ld - delta de lava; ubb1, ubb2 - leitos de sedimentos abaixo do leito grande; Ma - *Macaronichnus segregatis*, Th - *Thalassinoides* isp. Os limites são marcados por linhas tracejadas. A - Mapa de localização mostrando os contornos da ilha e a sua plataforma insular; B - visão geral da secção localizada entre rochas vulcânicas; C - visão geral do leito grande; D - base do leito grande e o sedimento subjacente; E - incisão do leito grande no sedimento subjacente e na arriba fóssil; F, G - lâminas no leito grande; H - topo do leito grande bioturbado com *Macaronichnus e Thalassinoides* (Johnson *et al.*, 2017).

Fácies pré-erosivas

Os estratos basais apresentam rodólitos (fácies 2b) que preenchem as depressões existentes nas lavas em almofada (fácies 1), com até 1,4 m de paleorelevo erodido. As camadas subsequentes incluem uma brecha formada por conchas (fácies 3), seguida de arenito vulcaniclástico e calcarenito bioturbado (fácies 4 a 6), com uma espessura composta de 4-6 m (Rebelo *et al.*, 2016). Icnofósseis no arenito sobrejacente incluem buracos de raias abundantes (*Piscichnus* isp.; cf. Uchman *et al.*, 2018), e outros atribuídos a *Bichordites*, entre muitos outros (Uchman *et al.*, 2016).

Fácies da arriba

Uma inconformidade na sucessão revela 4 m de um paleorelevo vertical, erodido em estratos pré-existentes (veja acima). Os 0,80 cm superiores da superfície escavada (Fig. 78A) são amplamente incrustados por crostas de algas vermelhas coralinas (não geniculadas) do género *Lithophyllum*. Crostas de algas (1 a 2 mm) fundem-se ainda com conchas de moluscos bivalves, localmente abundantes (*Spondylus* sp.). Os bivalves (3 a 4 cm) estão fixados à parede vertical (Fig. 78B). Alguns hospedavam briozoários incrustantes, que mostram que a invasão por crostas de algas vermelhas em tempo ecológico real não era total. Os furos que atravessam as crostas de algas vermelhas formam *Gastrochaenolites* isp. (Fig. 78B, inserção) tendo uma afinidade com o bivalve endolítico seu produtor, *Myoforceps aristatus*. Os furos (até 2 cm) estão orientados numa direção oblíqua, para baixo. Em média, uma área superficial de 10 cm² é preenchida por mais de 17 perfurações por parte destes bivalves. A superfície de inconformidade mostra cavidades e saliências que incluem incrustações por tubos de anelídeos poliquetas (Fig. 78C).

Fácies de arenito

Uma paleo-arriba totalmente exposta não é diretamente observável sob o manto do grande leito de areia, mas os sedimentos adjacentes estendem-se para leste, a partir do local das bioincrustações na discordância escavada sobre o solo por uma distância de 34 m (Fig. 77C), para repousar em areias e seixos mais escuros e mais grossos (Fig. 77D). A parte inferior do leito consiste em arenitos grossos, mal classificados e maciços, com seixos basálticos dispersos (principalmente diâmetros de 1 cm, raramente até 10 cm) e detritos de conchas de bivalves e cascas de equinodermes. Os grãos são mais finos e os seixos desaparecem lateralmente. A parte superior do leito grande encosta e sobrepõe-se à antiga arriba fóssil (Fig. 77E). As lâminas preservadas nesta parte do corpo de areia são planares e quase-planares (Fig. 77F), ou mostram estratificação cruzada "hummock" de pequena a maior escala (Fig. 77G).

O topo do leito grande é apenas parcialmente bioturbado. *Thalassinoides* isp. forma galerias que descem localmente até 1 m (Fig. 77H). Veios verticais que provavelmente pertencem a *Ophiomorpha* isp. estão presentes em alguns locais. Os *Macaronichnus*, com orientação variável, ocorrem nos 10 cm superiores, mas também se estendem mais profundamente em torno de outras tocas. Acima do leito grande, várias camadas pouco individualizadas (fácies 6 de Rebelo *et al.*, 2016) surgem sob a forma de leitos de arenito de grão fino, com espessura de decímetros, parcial ou totalmente bioturbada. Alguns mostram laminação planar ou quase planar (Fig. 78D). Esta fácies apresenta diversos icnofósseis (Fig. 78E), incluindo *Thalassinoides* isp.,? *Ophiomorpha* isp., *Macaronichnus segregatis, Bichordites* isp., *Piscichnus waitemata* Gregory 1991 e *Dactyloidites ottoi* (Geinitz, 1849).

Descritores da areia e tamanho do depósito de areia sobrevivente

O leito grande exibe lâminas alternadas com componentes escuros (ricos em piroxenas) e brancos (ricos em conchas). No geral, minerais pesados e bioclastos correspondem a >98% dos sedimentos aqui encontrados. A espessura das lâminas mais escuras também parece diminuir para o topo da sequência. O tamanho de grão dos sedimentos no leito grande varia entre lodo grosso e areia muito fina a fina. Essas diferenças, que variam até 0,5 Φ entre as lâminas adjacentes, resultam da maior ou menor presença de bioclastos (minerais mais grossos que os mais escuros). A análise morfoscópica revelou que as camadas mais escuras são compostas de 50% a 70% de grãos arredondados a sub-arredondados (clinopiroxenas abundantes e olivina vestigial e plagioclases). As camadas mais claras ainda representam aproximadamente 30% dos minerais mais escuros (mais densos), com o equilíbrio formado pelos bioclastos. A análise também mostra que os bioclastos são compostos de fragmentos do tamanho de areia. Os grãos minerais exibem uma maturidade relativa (bem arredondada e fina) em comparação com os bioclastos.

Com base em fotografias de afloramento do leito grande da Malbusca, os polígonos desenhados no ArcGIS permitiram estimar o volume do principal depósito de areia. Rochas de basalto caídas de cima separam as camadas de tempestade expostas em duas áreas adjacentes. No total, a área de superfície bidimensional calculada para estas duas áreas adjacentes cobre cerca de 1.830 m². O bordo do basalto em que se assenta toda a sequência sedimentar da Malbusca projeta-se em direção ao mar por baixo dessa sequência, para formar a borda de uma costa que mergulha. Devido à erosão do afloramento, o depósito de areia original recuou aproximadamente 8 m para terra, desde o bordo externo sobrevivente da borda de basalto, implicando um espaço mínimo de acomodação de mais de 14.500 m³, anteriormente ocupado pelo leito grande. Permanece por estimar o volume adicional de areia numa extensão para leste, a qual está bloqueada por um delta de lava (Fig. 77B).

Restrições batimétricas de estratos confinantes

O conjunto de vestígios fósseis de estratos que antecedem a erosão da arriba fóssil é dominado por *Macaronichnus* isp., com *Palaeophycus* isp. e *Ophiomorpha* isp., os quais pertencem às ichnofacies de *Skolithos* e correspondem às profundidades do circalitoral ao médiolitoral (Pemberton *et al.*, 2001). Esses horizontes marcam eventos de inundação marinha durante uma transgressão geral, anterior à erosão dos paleo-relevo. Os estratos que sustentam o grande leito de areia na Malbusca restringem um pouco a profundidade mínima da água no momento do evento de tempestade, associado à passagem de um furacão, e que foi o responsável pela formação do leito grande. A arriba extensivamente incrustada por algas vermelhas coralinas e, em menor grau, por bivalves e tubos de anelídeos poliquetas (Fig. 78B, 16C), marca uma inconformidade distinta. Formado por arenito, esta arriba também foi perfurada por bivalves endolíticos (*Myoforceps aristatus*) o que indicia profundidades entre a zona entre-marés e águas de muito baixa profundidade (<5 m).

O leito de tempestade subsequente incorpora os vestígios fósseis *Thalassinoides*, *?Ophiomorpha* e *Macaronichnus* presentes no topo e desaparecendo para baixo os quais, coletivamente, mostram a colonização por cima de sedimentos que se depositaram rapidamente (Fig. 78H). *Ophiomorpha* é típico das icnofácies *Skolithos*, mas pode ocorrer em leitos de tempestade nas icnofácies *Cruziana*, nas quais o *Thalassinoides* é comum. Como o *Macaronichnus* também pode ocorrer disperso na costa até profundidades da ordem dos 5-10 m (Bromley *et al.*, 2009), o conjunto de icnofósseis no topo do leito grande, associado a um evento provocado por um furação, provavelmente estabelece a transição entre as icnofácies *Skolithos* e *Cruziana*, num local próximo do nível de base das ondas de bom tempo. A assembléia de icnofósseis mais diversa dos leitos de tempestade mais finos e subjacentes (fácies 6 de Rebelo *et al.*, 2016) é típica da icnofácie proximal-arquétipa de *Cruziana*, a qual se estende da costa mais baixa até o alto mar. A profundidade da água variou, provavelmente, perto do nível de base das ondas de bom tempo ou um pouco mais profunda, porque os *Dactyloidites ottoi* dessa

assembléia são típicos dos das icnofácies de *Skolithos* inferiores e *Cruziana* superiores em sedimentos siliciclásticos ricos em alimentos (Wilmsen & Niebuhr, 2014).



Figura 78. Detalhes das unidades estratigráficas abaixo e acima do leito de tempestade mais espesso. Abreviações como na Fig. 15, além disso: crosta algal; cb - toca de crustáceos; e - equinoderme *Clypeaster altus* (Leske, 1778); Bi - *Bichordites* isp., Do - *Dactyloidites ottoi* (Geinitz, 1849), En - *Entobia* isp., Ga - *Gastrochaenolites* isp., Pi - *Piscichnus waitemata*; A – arriba fóssil escavada no leito grande; B - face da arriba fóssil mostrando perfurações no arenito e uma concha de *Spondylus* sp. O folheto mostra *Gastrochaenolites* cuja entrada é coberta por crostas de algas; C - face da arriba fóssil mostrando perfurações por bivalves e tubos incrustantes efetuados por vermes anelídeos (provavelmente, por poliquetas); D, E - Laminação planar ou quase planar em leitos de tempestade cobrindo o grande leito de areia com diversos icnofósseis (Johnson *et al.*, 2017).

Análise da Paleo-tempestade

Baseada principalmente em depósitos do Holocénico, a análise de paleo-tempestades é um campo de estudo recente (Nott, 2004) que, lentamente, se começa a expandir para períodos

mais recuados (Ávila *et al.*, 2020b). Este tipo de trabalhos baseia-se normalmente numa abordagem multidisciplinar (por exemplo, critérios estratigráficos, de tamanho de grão, geomorfológicos e micropaleontológicos), a fim de identificar inequivocamente eventos de tempestade no registo geológico. Entre as principais características, o reconhecimento de sequências massivas e laminadas é frequentemente usado como identificador-chave (Switzer & Jones, 2008). As areias finamente laminadas, de espessura incomum (5 m) na Malbusca, podem ser traçadas mais a leste por aproximadamente 200 m, através de arribas costeiras inacessíveis (Fig. 77B). A tapar o leito grande, laminado, da Malbusca, está um arenito bioclástico fortemente bioturbado, com icnofácies comuns abaixo do nível de base das ondas de bom tempo (Uchman *et al.*, 2016). Por sua vez, essa sequência está revestida por mantos lávicos submarinos com peperitos basais; a sua espessura indica uma profundidade mínima de, pelo menos, 20 m.

A composição do leito grande de areia da Malbusca aponta para a deposição por parte de um evento suficientemente forte, capaz de transportar sedimentos dentro do regime de fluxo superior. Esta evidência é ainda suportada por uma unidade basal arenosa maciça, mal classificada e mais grosseira, bem como pelo aumento ascendente dos grãos de carbonato na unidade laminada superior (ver divisão na Fig. 77C). Essa gradação reflete diferentes condições de fluxo da fase turbulenta para a fase de suspensão e classificação dos sedimentos com, como é usual, os materiais mais densos a depositarem-se primeiro e a menor distância do que os menos densos. O primeiro indica fluxo não uniforme com desaceleração espacial, resultando em deposição de carga no leito. Por outro lado, a segunda fase denota quase uma sequência normal de classificação com diminuição do tamanho de grão e aumento nos componentes mais leves de carbonato. A dimensão deste depósito implica fluxos de alta energia, sustentáveis apenas num evento de curta duração e com uma taxa de classificação muito alta e contínua. Considerando a espessura geral do leito grande, o seu volume e a sua composição, o mecanismo de geração mais provável é um evento provocado por um furação excecionalmente intenso. O tamanho dos grãos e as características morfoscópicas dos minerais mais escuros constituintes também sugerem um processo de longo prazo, anterior ao rápido enterramento, responsável pela sua forma arredondada e grão fino. A maturidade geral dos grãos minerais mais escuros indica que eles tiveram origem numa região mais exterior na plataforma insular, provavelmente numa barra de areia submersa.

A preservação do depósito da Malbusca, combinada com suas características sedimentológicas e subsequente retrabalhamento superficial por eventos de tempestade menores, também implica deposição acima da base de ondas de tempestade, que hoje nos Açores está abaixo dos 50 m de profundidade. A paleo-profundidade mínima que se pode deduzir através dos mantos

ci

lávicos submarinos que recobriram os sedimentos arenosos (20 a 25 m) corrobora esta inferência. Além disso, as observações de Meireles *et al.* (2013) nos depósitos Pliocénicos da vizinha Ponta do Castelo também relatam transporte significativo de sedimentos por tempestades até profundidades de 55 m.



Figura 79. Modelo mostrando uma barra de areia hipotética como fonte para o leito grande: A - Antes do evento de tempestade; B - Depois de a tempestade ter movido a areia em direção à costa, contra uma saliência de rocha representada por um paleossistema submerso (Johnson *et al.*, 2017).

Modelo conceptual

A geomorfologia do Pliocénico no lado sul da ilha de Santa Maria envolveu um espaço de acomodação possivelmente influenciado por uma depressão de pequena profundidade em forma de vale, e localizado a alguma distância (algumas centenas de metros) de uma paleoarriba submarina costeira.

Esse espaço favoreceu a seleção efetiva de sedimentos (alternância de camadas laminadas mais densas e menos densas) para capturar a transferência repentina de sedimentos de uma barra de areia externa. Um modelo conceitual (Fig. 79A, B) descreve as relações físicas na Malbusca antes do desenvolvimento das unidades vulcânicas superiores (Ramalho *et al.*, 2017), quando a ilha era muito parecida com a plataforma atualmente existente e que rodeia o edifício vulcânico destruído de Lord Howe Island, no Mar da Tasmânia (Kennedy *et al.*, 2011).

Lateralmente à paleo-arriba submarina, para leste, está um delta de lava (Figs. 77B, 79) que bloqueou as ondas resultantes do furação, direcionadas de SE para NW, e que transportaram a areia e a depositaram contra a paleo-arriba.

A altura do delta de lava impõe restrições à profundidade da água no momento da tempestade, o que está de acordo com a espessura da sequência vulcânica submarina (20 a 25 m) que recobre o pacote sedimentar da Malbusca.

Devido a dificuldades inerentes ao acesso limitado a afloramentos, o uso de equipamentos leves e portáteis é necessário para estudos em andamento.

Trabalhos futuros incluirão a aplicação de análises de alta resolução usando suscetibilidade magnética, análise geoquímica (XRF), análise digital de tamanho de grão e modelação numérica, com o intuito de elucidar mais claramente as condições deposicionais relacionadas com este evento de tempestade.





c Repeated erosion and deposition of tempestites

d Cover by submarine basalt

Figura 80. Reconstrução esquemática da sequência sedimentar Pliocénica na Malbusca. Para detalhes, consulte o texto (Rebelo *et al.*, 2016a).

O modelo conceptual apresentado por Rebelo *et al.* (2016a) para o depósito da Malbusca está focado nos rodólitos e complementa em certos aspetos, aquele apresentado por Johnson *et al.* (2017). Rebelo *et al.* (2016a) sugerem que alguns dos rodólitos da Malbusca viviam nas depressões basálticas onde são encontrados hoje, porque ocorrem crostas autóctones no basalto. No entanto, existem sinais de transporte porque a maioria dos rodólitos estão desgastados e fazem parte de uma sequência de tempestitos.

Os eventos multifásicos que levaram à formação da sequência sedimentar da Malbusca podem ser resumidos, como mostrado na Fig. 18. Inicialmente a sul da paleo-arriba submarina da Malbusca, a maioria do biota observado vivia numa plataforma rochosa litoral, a baixas profundidades, onde grandes bivalves e ouriços-do-mar *Eucidaris tribuloides* (Lamarck, 1816)

prosperavam. Bolsas de areias bioclásticas incluíam alguns rodólitos, principalmente nucleados. A profundidades um pouco maiores, os fundos arenosos seriam o cenário dominante, com uma grande população de rodólitos não nucleados e outras espécies associadas a sedimentos móveis (por exemplo, os equinóides *Clypeaster altus* e *Echinocyamus pusillus*) (Fig. 80a).

Tal como hoje em dia, as margens da possível ilha (é provável que, nesta altura, só existisse um grande monte submarino e, eventualmente, alguns ilhéus acima da linha de água) estavam sujeitas a tempestades episódicas, expressas pelos rodólitos repetidamente quebrados. Portanto, eventos mais fortes de tempestades levaram à formação de tempestitos proximais, os quais terão sido remobilizados por um furação que transportou grandes quantidades de sedimentos para a linha de costa, formando o leito grande descrito por Johnson *et al.* (2017).

Como é típico em tempestitos, as partículas mais pesadas, ou seja, os rodólitos, foram depositadas primeiro e, mais acima na secção, conchas bivalves, "hummocks", sedimentos laminados e, no topo da sequência, marcando a transição para condições de tempo bom, icnofósseis (Fig. 18b). Conclui-se que eventos subsequentes desencadearam a formação de tempestitos que cortaram erosivamente o(s) tempestito(s) mais antigo(s) e formaram canais que foram adicionalmente preenchidos por finas sequências ascendentes (Fig. 79c). Finalmente, toda a sequência sedimentar foi coberta por mantos de lava submarinos que contribuíram para a sua preservação, estando hoje exposta devido ao soerguimento do edifício insular e à erosão da costa (Fig. 79d).

A sucessão de eventos acima mencionada resultou, portanto, numa amálgama de pacotes sedimentares, que exibem uma tendência geral de diminuição do tamanho do grão para o topo da sequência, bem como uma classificação normal interna. A transição gradual entre sedimentos mais grosseiros e sustentados por matriz para calcarenitos mais espessos, porém mais finos, com estratificação entrecruzada, indica uma diminuição na energia durante os processos de sedimentação, isto é, um aumento da profundidade da água.

Estas características são típicas de muitas sequências marinhas em ilhas oceânicas (Ramalho *et al.* 2013; Meireles *et al.* 2013; Mayoral *et al.* 2013; Johnson *et al.* 2014; Ávila *et al.* 2015), e denotam um rápido aumento relativo do nível do mar, antes do encapsulamento dos sedimentos por atividade vulcânica. Uma tendência transgressiva geral, no caso da Malbusca, é ainda atestada pelas características da sequência vulcano-sedimentar geral, que apresenta um empilhamento de produtos vulcânicos submarinos e sedimentos marinhos até cerca dos 130 m acima do nível do mar atual, altitude a que ocorre a transição para produtos subaéreos. Uma vez que essa transição está atualmente cerca de 110 m acima dos leitos de rodólitos descritos,

cv

deve ter ocorrido um rápido aumento do nível do mar dentro do período compreendido entre a deposição dos rodólitos e a transição para um ambiente subaéreo.

De acordo com a curva do nível do mar de Miller *et al.* (2011) e utilizando o intervalo de idade de 4,32 \pm 0,06 e 4,02 \pm 0,06 Ma, fornecido por Sibrant *et al.* (2015) para os sedimentos da Malbusca, há cerca de 4,255 Ma ocorreu uma queda no nível do mar para -34 m, seguida por um aumento no nível do mar para +3,2 m em 4,245 Ma. Este intervalo de tempo de 10.000 anos (10 ka) pode corresponder ao período de subida relativa inferida no nível do mar, que seria assim penecontemporâneo com a deposição dos rodólitos bem como dos sedimentos acima dos leitos de rodólitos.

Entre 4.015 e 3.995 Ma, ocorreu uma queda relativa do nível do mar de 59,6 m (de +3,2 para - 56,4 m) e de 3,995 a 3,860 Ma, ocorreu uma tendência relativa de aumento do nível do mar, atingindo uma elevação máxima de + 22,1 m aos 3,860 Ma, correspondendo a variação total do nível do mar a 78,5 m. Segundo Ramalho *et al.* (2017), durante todo este intervalo de tempo (isto é, entre os 4.255 e os 3,860 Ma) a ilha/monte submarino estava em processo de subsidência, afundando a uma taxa estimada de ~100 m/Ma, o que corresponde a um subsidência total de cerca de 39,5 m. Portanto, se adicionarmos a tendência de subsidência (39,5 m) ao aumento relativo do nível do mar (78,5 m) dá um total de 118 m, assim se explicando o aumento relativo do nível do mar de 110 m deduzido da sequência vulcano-sedimentar (Rebelo *et al.*, 2016).

Delimitação Geográfica da Jazida de Malbusca



Figura 81: Delimitação geográfica da jazida fóssil de Malbusca

13. Falha Oeste de Malbusca

A Falha Oeste da Malbusca ("Malbusca W") é acessível por mar e pelo topo da falésia, através de um trilho com um forte declive e frequentado por pescadores. Esta jazida tem uma extensão lateral de cerca de 60 m e os sedimentos marinhos possuem uma extensão vertical de cerca de 12 m (fácies 3-5; Fig. 82C). Nesta jazida, as lavas em almofada basais (fácies 1; Fig. 82C) pertencentes ao Complexo Touril estão recobertas por uma unidade de rodólitos (fácies 3 de Malbusca W, fácies 2–4 de Malbusca E; Rebelo *et al.*, 2014, 2016), que por sua vez está coberta por um rudstone (isto é, uma rocha carbonatada com 10% dos grãos da matriz com dimensão superior a 2 mm) de 0,6 a 1,2 m de espessura (fácies 5 de Malbusca E; Fig. 82C). Areias espessas com estratificação cruzada (fácies 4 de Malbusca W; fácies 6 de Malbusca E), que se transformam em areias altamente bioturbadas (fácies 5 de Malbusca W; Fig. 82C) cobrem os rodólitos e o rudstone, concluindo a sequência sedimentar, exceto em (Malbusca E), onde eles são truncados para leste e recobertos por arenitos com estratificação cruzada hummocky e swaley, antes de serem coroados por uma sequência de lavas submarinas. As areias bioturbadas contêm vários vestígios de fósseis, sendo o mais comum *Macaronichnus segregatis* Clifton & Thompson, 1978.

Outros icnofósseis relatados por Uchman *et al.* (2016) nestes afloramentos são *Piscichnus, Thalassinoides, Asterosoma, Bichordites, Palaeophycus, Parmaichnus, Psilonichnus* e *Ophiomorpha. Diopatrichnus santamariensis* Uchman, Quintino & Rodrigues, 2017 foi encontrado em arenitos calcários de granulação média mal selecionados na Falha Oeste da Malbusca (Malbusca W) e em arenitos líticos calcários mal selecionados de granulação média a grossa com conchas (Malbusca E).

Vários exemplares do novo icnofóssil *Diopatrichnus santamariensis* Uchman, Quintino & Rodrigues, 2017 podem ser observados nas Figs. 83 e 84.



Figura 82. Mapas de localização e colunas estratigráficas. A: Localização do arquipélago dos Açores no Atlântico NE, e configuração geotectónica da Ilha de Santa Maria nos Açores triplo junção. MAR: Cadeia Meso-Atlântica; EAFZ: Zona de falha dos Açores Leste. B: Localização dos afloramentos onde *Diopatrichnus santamariensis* Uchman, Quintino & Rodrigues, 2017 foi encontrado. C: Colunas estratigráficas da Falha Oesta da Malbusca ("Malbusca E") e da Ponta do Cedro (Uchman *et al.*, 2017).



Figura 83. Holótipo de *Diopatrichnus santamariensis* Uchman, Quintino & Rodrigues, 2017 da Ponta do Cedro (Pliocénico Inferior; Ilha de Santa Maria, Açores). A. Vista da toca no campo, cuja parte superior foi coletada. B. O holótipo (parte superior da toca em A), INGUJ240P1. C. Vista do holótipo de cima. Barras de escala: 3 cm (A), 1 cm (B, C).



Figura 84. *Diopatrichnus santamariensis* Uchman, Quintino & Rodrigues, 2017 na Malbusca (Pliocénico Inferior; Ilha de Santa Maria, Açores). A: Toca A, vista geral, Falha Oeste da Malbusca ("Malbusca W"). B: Detalhe de A. C: Toca B, vista geral, Malbusca E. D: Detalhe de C, com *Macaronichnus segregatis* (Ma) e uma toca de crustáceos (cb). E: Toca C, Malbusca E. Barras de escala: 10 cm (A), 3 cm (B – E).

Delimitação geográfica da jazida da Falha Oeste de Malbusca



25°4'15"W

Figura 85. Delimitação geográfica da jazida fóssil da Falha Oeste de Malbusca

14. Gruta dos Icnofósseis

A Gruta dos Icnofósseis localiza-se na costa sul da ilha de Santa Maria, numa pequena baía exposta à ondulação vinda de oeste (jazida nº14 na Fig. 1). Neste local, a secção completa exposta desde o nível do mar até ao topo da arriba é semelhante à que está exposta na área costeira próxima de Malbusca (cerca de 500 m a SE), sendo composta por uma sequência de 145 m de espessura de lavas submarinas e hialoclastitos, intercalados com vários leitos biocalcareníticos tabulares fossilíferos, cobertos no topo da arriba por lavas submarinas basais e o primeiro e principal leito calcarenítico (situado entre os 16–25 m acima do atual nível do mar, aproximadamente) são considerados como pertencendo ao Complexo Vulcano-Sedimentar Touril, enquanto as lavas e sedimentos acima são atribuídos ao Complexo Vulcânico Pico Alto (Serralheiro, 2003).



Figura 85. Corte estratigráfico na zona da Baía de Nossa Senhora, na extremidade leste da jazida da Malbusca. Note-se a zona de passagem das lavas submarinas a subaéreas por volta dos 145 m de altitude, marcando o nível das águas do mar coevo.

A Gruta dos Icnofósseis é uma cavidade de grandes dimensões, esculpida na encosta por erosão marinha (Fig. 86).



Figura 86. Gruta dos Icnofósseis. A,B - vista aérea da Gruta dos Icnofósseis, localizada na base de uma arriba com altitudes de cerca de 150 m. Note-se em B o declive do que seria o fundo submarino nessa zona da ilha, recoberto por sedimento móvel (areias). C - Gruta dos Icnofósseis vista do mar.



Figura 87. Vista estratigráfica geral do afloramento da Gruta dos Icnofósseis. A - Brecha formada por conglomerado/lavas em almofada retrabalhadas. B - Arenito bioclástico, altamente bioturbado e fossilífero. As setas pretas indicam a posição de *Ericichnus bromleyi* Santos & Mayoral, 2015, uma espécie pertencente a um icnogénero novo, descrito em 2015. C - Arenito vulcaniclástico fino, vermelho, estratificado horizontalmente (piroclastos retrabalhados), com restos fósseis abundantes. D - Folhetos de arenito vulcaniclástico (piroclastos retrabalhados) mostrando uma estratificação entrecruzada. E - Calcário marinho compacto. F - Fluxo de lava basáltica submarina. G - Praia Plistocénica de seixos rolados com abundantes moluscos fósseis (MIS 5e).

A secção estratigráfica exposta dentro da Gruta dos Icnofósseis é composta por sete fácies (da base para o topo; Fig. 87): i) ~ 2 m de uma brecha retrabalhada de conglomerado/ lavas em almofada (Fig. 87, fácies A); ii) 0,6 m de um arenito fino bioclástico e fossilífero com os seguintes icnofósseis: *Arenicolites* isp. (Fig. 88A), *Bichordites* isp. (Fig. 88B), *Macaronichnus segregatis* Clifton e Thompson, 1978 (Fig. 88C), *Circolites kotoucensis* Mikuláš, 1992 (Fig. 88D), *Dactyloidites ottoi* (Geinitz, 1849) (Fig. 88E-F), e *Ericichnus bromleyi* Santos & Mayoral, 2015 (Fig. 89A-D). Alguns equinóides de grandes dimensões [*Clypeaster altus* (Leske, 1778) (Fig. 90B)] e moluscos bivalves [*Manupecten pesfelis* (Linnaeus, 1758), *Spondylus* sp. (Fig. 90C)] estão também presentes, embora não sejam comuns (cf. Fig. 87, fácies B); iii) a fácies C corresponde a um arenito vulcaniclástico fino, com estratificação horizontal e com cerca de 30 cm de espessura, possuindo fósseis abundantes de equinodermes (*C. altus*), moluscos (*Spondylus* sp., *Bufonaria*

marginata (Gmelin, 1791) e Epitoniidae não identificados), a craca endémica *Zullobalanus santamariaensis* Buckeridge & Winkelmann, 2010 (Winkelmann *et al.*, 2010) e raras vértebras de peixe. Macróides e rodólitos (Fig. 90D) também estão presentes (Fig. 87); iv) 2,5 a 4 m de folhetos de arenito vulcaniclástico (piroclastos retrabalhados) com estratificação entrecruzada em larga escala, como resultado de múltiplos eventos.

Esta camada contém algumas valvas de *Ostrea* sp.; v) 0,5 m de calcário compacto (Fig. 87, fácies E); e finalmente, a fácies F, que corresponde a um empilhamento de ~ 120-130 m de espessura de folhetos de lava basáltica submarinos, com abundantes lavas em almofada; (vi) em discordância/a cortar a sequência Pliocénica atrás descrita, existe um nível Plistocénico com cerca de 0,5 m de espessura, situado a aproximadamente 8 m acima do atual nível do mar (Fig. 85, fácies G), o qual foi depositado durante o último estádio interglacial (MIS 5e).

Este depósito possui uma praia de seixos rolados (com seixos de 5 a 40 cm de comprimento máximo) e contém alguns moluscos fósseis (por exemplo, *Patella aspera* Röding, 1798). *Gastrochaenolites* isp. produzido pelo bivalve litófago *Leiosolenus aristatus* (Dillwyn, 1817) pode ser visto na rampa que liga a superfície Pliocénica (fácies B, Fig. 87) ao nível Plistocénico (fácies G, Fig. 87).



Figura 88. Características paleoicnológicas preservadas em alto-relevo no arenito bioclástico Pliocénico (fácies B), na Gruta dos Icnofósseis. A - *Arenicolites* isp. B - *Bichordites* isp. C - *Macaronichnus segregatis* Clifton & Thompson, 1978. D – Circolites kotoucensis Mikuláš, 1992. E,F - *Dactyloidites ottoi* (Geinitz, 1849).



Figura 89. Ericichnus bromleyi na superfície bioerodida (fácies B, cf. Fig. 4), na Gruta dos Icnofósseis (Santos et al., 2015). A - Detalhe do holótipo EM-UHU/08-SM001 no campo. B - Esquema interpretativo que mostra a trajetória dos sulcos, com a direção do movimento marcada (setas pretas finas), e a posição sucessiva dos *Circolites* (setas pretas grossas). Várias seções transversais estão aqui representadas: (1) secção normal, (2) secção expandida no ponto de bifurcação, (3) secção *Circolites*. C - Vista de pormenor das estruturas de *Ericichnus–Circolites*. Paratipo EM-UHU/08-SM002. D - Plano esquemático da imagem anterior, detalhando o traço de repouso do ouriço do mar (*Circolites*) e o início do sulco (*Ericichnus bromleyi*), com a direção do movimento marcada (setas pretas finas).



Figura 90. A - Vista geral da Gruta dos Icnofósseis. B – Equinoderme *Clypeaster altus* (Leske, 1778). C - Bivalve *Spondylus* sp. D - Rodólito.

Delimitação Geográfica da jazida da Gruta dos Icnofósseis



25 4 30 VV

Figura 90. Delimitação geográfica da jazida fóssil da Gruta dos Icnofósseis

15. <u>Macela</u>

A Macela é uma jazida Pliocénica que tem o seu início nas imediações do Miradouro da Macela, prolongando-se um pouco para leste do miradouro e, em maior extensão, para oeste, até atingir o trilho de descida para a jazida da Prainha (Fig. 91). Esta jazida ainda não foi estudada em detalhe. Neste local, existem "ripple-marks", a uma altitude que ronda os 107 m. Entre os 100 e os 110 m de altitude, constituindo uma subunidade do Complexo Touril, ocorrem tufitos com intercalações conglomeráticas, dos 100-110 m de altitude, com estratificação ondulada e marcas de ondulação ("ripple-marks" aos 107 m, no local de coordenadas N36° 57' 06.6" W25° 06' 31.7"), contendo moldes internos de bivalves (mais comuns; Fig. 91) e de gastrópodes marinhos (mais raros).



Figura 91: Jazida da Macela. Moldes internos de bivalves (em cima à direita, e em baixo à esquerda). À direita, em baixo, o início do trilho de descida para a jazida da Prainha (onde estão os "ripple-marks"), ao longo do qual se pode apreciar toda a sequência estratigráfica entre a Macela (a topo) e a Prainha (na base).

A sequência estratigráfica na zona Macela-Prainha é composta, da base para o topo (Fig. 92) por produtos vulcânicos do Complexo Vulcânico Anjos, seguindo-se o Complexo Vulcanosedimentar Touril e, finalmente, o Complexo Vulcânico Pico Alto (Serralheiro *et al.*, 1987; Serralheiro, 2003; Ramalho *et al.*, 2017). O Complexo Vulcânico Anjos aflora até aos 38-40 m de altitude e é constituído por um empilhamento de escoadas lávicas basálticas (ankaramíticas) subaéreas, intercaladas por níveis de escórias e de piroclastos avermelhados com horizontes de cozimento. Nas escoadas ankaramíticas é possível observar grande profusão de cristais de olivina e piroxena, sendo este um dos melhores locais da ilha para a sua observação. Esta unidade apresenta-se intensamente cortada por filões subverticais que exibem margens de arrefecimento bem preservadas. Ao nível do mar atual, a erosão diferencial ora expõe estes filões em alto-relevo (situação denominada em "cabo-real") ou em baixo-relevo (situação denominada em "matacães"), contribuindo para uma linha de costa irregular e recortada, e para uma plataforma de abrasão marinha com vários "muros" ou "trincheiras", que oferecem abrigo às comunidades biológicas que aqui ocorrem.

A unidade seguinte é o Complexo Vulcano-sedimentar Touril. Esta uma unidade vulcanosedimentar de idade Pliocénica assenta numa discordância erosiva talhada no Complexo Anjos. Ao longo do trilho Macela-Prainha, esta unidade é essencialmente composta por sedimentos terrígenos e vulcaniclásticos, evidenciando maior ou menor transporte/retrabalhamento. Da base para o topo, é possível distinguir várias subunidades (cf. Fig. 92): (1) Conglomerados brechóides, dos 38-65 m de altitude, com balastros de dimensões centimétricas a decimétricas, sub-rolados a sub-angulosos, de natureza diversa e envoltos em matriz terrígena/arenítica; (2) Tufitos dos 65-76 m de altitude, com estratificação paralela a levemente entre-cruzada, com raros balastros rolados de basalto, e raros fósseis de gastrópodes marinhos (tipicamente apenas moldes internos); (3) Conglomerados brechóides, dos 76-84 m de altitude, com balastros de dimensões centimétricas, sub-rolados a sub-angulosos, de natureza diversa e envoltos em matriz diversa e envoltos em matriz arenítica.

Raros fósseis de gastrópodes marinhos podem ser encontrados nesta subunidade (tipicamente apenas moldes internos); (4) Tufos surtseianos dos 84-100 m de altitude, de estratificação fina sub-horizontal, com esporádicos clastos líticos; (5) Tufitos com intercalações conglomeráticas, dos 100-110 m de altitude, com estratificação ondulada e marcas de ondulação ("ripple-marks" aos 107 m, no local de coordenadas N36° 57' 06.6" W25° 06' 31.7"), e raros fósseis de bivalves e de gastrópodes marinhos (tipicamente apenas moldes internos); (6) Conglomerados brechóides, dos 110-130 m de altitude, com balastros de dimensões centimétricas, sub-rolados a sub-angulosos, de natureza diversa e envoltos em matriz arenítica.

Raros fósseis de bivalves e de gastrópodes marinhos podem ser encontrados nesta subunidade (tipicamente apenas moldes internos). A sequência do Touril é selada a topo (aos 130 m de altitude) por níveis de piroclastos (tufos) surtseianos e mantos lávicos submarinos do Complexo Vulcânico Pico Alto, muito provavelmente emitidos a partir do cone do Pico Facho (Serralheiro *et al.*, 1987; Serralheiro, 2003M; Ramalho *et al.*, 2017).



Figura 92. Corte geológico e descrição da sequência estratigráfica na zona da Macela-Prainha.

A discordância na base do Touril trunca com alguma regularidade o edifício vulcânico do vulcão em escudo dos Anjos e marca o início de um período dominado por erosão e sedimentação, com o correspondente desmonte do edifício insular existente, subida relativa do nível do mar (provavelmente reforçada pela subsidência do edifício insular), e atividade vulcânica esporádica de natureza submarina (quer explosiva quer efusiva). Durante este período a primeira ilha de Santa Maria na altura existente estava a ser gradualmente erodida até ter, provavelmente desaparecido sob as águas, assemelhando-se então a um enorme banco submarino ou grupo de ilhéus rodeados por ampla plataforma de pouca profundidade, onde se deu a deposição de uma enorme espessura de sedimentos e produtos de atividade vulcânica submarina esporádica.

Deste modo, a sequência na zona da Prainha-Macela, reflete este cenário, exibindo os produtos do desmonte do edifício vulcânico e a sua deposição em ambiente marinho de baixa profundidade, assim como a deposição de produtos vulcaniclásticos primários ou retrabalhados, provenientes de atividade vulcânica hidromagmática (essencialmente surtseiana). A escassez de fósseis nesta zona atesta a alta energia em que os depósitos se formaram, assim como o alto conteúdo terrígeno, condições desfavoráveis à colonização e proliferação de moluscos marinhos. É de notar a presença das marcas de ondulação ("ripple-marks"), aos 107 m de altitude, as quais constituem um testemunho da ação de correntes marinhas num fundo

arenoso em águas de baixa profundidade. O renovar da atividade vulcânica veio finalmente selar os depósitos sedimentares, preservando-os para a posteridade.



14.1. Delimitação geográfica da jazida da Macela

25°6'30"W

25°6'15"W


16. <u>Prainha e Praia do Calhau</u>

As jazidas da Prainha e da Praia do Calhau localizam-se perto da Praia Formosa, a cerca de 5 km a leste de Vila do Porto. Os estratos fossilíferos expostos possuem uma extensão de cerca de 800 m ao longo da costa, a uma altitude entre os 2-4 m (Fig. 94) e correspondem a depósitos costeiros não consolidados, assentes sobre uma plataforma de lavas basálticas. A base da sequência estratigráfica contacta diretamente com os basaltos ankaramíticos do Complexo dos Anjos (Serralheiro *et al.*, 1987) através de uma plataforma irregular de abrasão marinha formada durante 8 evento(s) transgressivos(s) e 4 eventos regressivos, todos eles ocorrendo durante o Plistocénico (Fig. 95)..



Figura 94. Depósitos fossilíferos da jazida plistocénica da Prainha e da Praia do Calhau (setas a amarelo), a oeste da Praia Formosa. A seta vermelha indica um dos depósitos Pliocénicos da jazida da Macela, a cerca de 90-100 m de altitude.

Esta plataforma apresenta depressões circulares com 4,6±1,0 cm de diâmetro, constituindo sinais de bioerosão provocada pelo icnogénero *Circolites* (Mikulás, 1992), presumivelmente efectuados por ouriços-do-mar epilíticos, provavelmente *Paracentrotus lividus* (Fig. 96), antes da deposição dos conglomerados e das crostas algais que formam o início da sequência fossilífera da Prainha. Entre a Praia do Calhau e a Prainha, a plataforma é por vezes intersectada

por diques ou filões basálticos, também eles cortados pela abrasão marinha. Na Fig. 97, apresenta-se a coluna estratigráfica da jazida plistocénica da Prainha.



Figura 95. Correlação provisória entre os terraços e seu possível momento de formação e subsequente modificação nas oscilações eustáticas do nível do mar. As barras horizontais coloridas representam o intervalo de tempo admissível durante o qual cada terraço pode ter sido esculpido pela erosão marinha, de acordo com as flutuações do nível do mar e a elevação da ilha. A largura vertical de cada barra representa o intervalo de elevação do terraço ± 5 m. Os pontos/quadrados com cores diferentes representam alturas em que o nível do mar esteve alto (associados a períodos interglaciais), e os pontos baixos representam alturas em que o nível do mar esteve baixo (associado a períodos glaciais), no respetivo período de tempo para cada terraço (Ricchi *et al.*, 2018).



Figura 96. Bioerosão provocada por ouriços-do-mar epilíticos (imediações da Praia do Calhau).

Depositado sobre a superfície de abrasão marinha basal (fácies 1) está um conglomerado calcário fossilífero fortemente cimentado (fácies 2) com uma espessura variável ao longo da jazida, não ultrapassando os 0,5 m na zona da Prainha. Este conglomerado foi depositado aquando da subida relativa das águas do mar, sendo formado por cascalhos rolados heterométricos, em média com dimensões inferiores a 10 cm de diâmetro, cimentados por uma matriz carbonatada com material bioclástico incorporado.

As dimensões dos seixos rolados diminuem da base do conglomerado para o topo, indiciando uma diminuição do hidrodinamismo (Fig. 98). Recobrindo o conglomerado ou, localmente, diretamente sobre a superfície basáltica (como é o caso na Prainha), está uma crosta algal que se apresenta como uma formação incrustante, achatada dorso-ventralmente com uma espessura máxima de 0,5 m (fácies 2) e com uma extensão lateral de aproximadamente 200 m. Esta crosta algal é formada por algas Rodófitas incrustantes não geniculadas da ordem Corallinales, fixas e não foliáceas, crescendo umas sobre as outras, quer sob a forma de pequenas ramificações, quer como camadas intimamente aderentes. Esta crosta é multiespecífica e constituída por 4 espécies: *Spongites fruticulosus* Kützing (a principal espécie construtora deste recife), *Lithophyllum incrustans* Philippi, *Neogoniolithon brassica-florida* (Harvey) Setchell & Mason e *Titanoderma pustulatum* (Lamouroux) Nägeli (Amen, 2002). Atualmente, somente a *Titanoderma pustulatum* existe nos Açores, tendo as restantes desaparecido do arquipélago durante o decurso da última glaciação.



Figura 97. Seções estratigráficas da Prainha (Ávila *et al.* 2002, 2009, 2010, 2015c), Vinha Velha (Ávila *et al.* 2009, 2015c), Lagoinhas (Ávila *et al.* 2009, 2015c) e Praia do Calhau (Ávila *et al.*, 2015c), exibindo as sucessões sedimentares do Plistocénico (MIS 5e).



Figura 98. Depósitos sedimentares Plistocénicos na Praia do Calhau e na Prainha. (a) Uma das seções mais representativas estudadas na Praia do Calhau (entretanto já desaparecida por efeitos da erosão marinha durante o furacão Gordon): sobre uma plataforma irregular, esculpida no topo dos basaltos ankaramíticos do Complexo dos Anjos, um conglomerado fortemente cimentado foi estabilizado por um biostroma de algas calcárias coralinas. (b) Areias com laminação cruzada cobrem o biostroma das algas calcárias coralinas; as areias estão recobertas por depósitos coluviais-aluviais. (c) Crosta de algas coralinas fósseis com abundantes sinais de bioerosão por bivalves endolíticos e com diques neptunianos (grandes fraturas que afetam a estrutura algal), cheios de areia; ambas as estruturas estão presentes ao longo de toda a seção vertical das algas fósseis. (d) Aspeto geral do biostroma de algas na Prainha, aqui depositadas diretamente sobre os basaltos do Complexo dos Anjos. (e) Marcas de bioerosão efetuadas por ouriços-do-mar epilíticos, provavelmente produzidos por *Paracentrotus lividus* (Lamarck) e atribuídos ao icnofóssil *Circolites kotocensis* Mikulás.

Praticamente desde o início da formação da crosta algal, observam-se abundantes evidências de macroestruturas de bioerosão, atribuídas ao icnogénero *Gastrochaenolites* Leymarie, 1842. Os restos fossilizados dos produtores destes pequenos orifícios circulares, com quase 2 cm de comprimento, podem por vezes observar-se *in situ* no interior destas perfurações e pertencem ao bivalve endolítico *Leiosolenus aristatus* (Dillwyn, 1817), anteriormente conhecido por *Myoforceps aristatus* (Dillwyn, 1817) (Fig. 99).



Figura 99. Crosta algal multiespecífica (fácies 2) (à esquerda) e bivalve litófago *Leiosolenus aristatus* (à direita).

Os sedimentos das fácies 2 e 3 correspondem a unidades que se terão depositado na antepraia (a qual engloba a zona de rebentação) e/ou na zona de surf da praia. A crosta algal possui fendas à superfície, bem como ao longo de toda a sua extensão vertical (Fig. 100). Estas fendas (setas vermelhas) estão preenchidas por areias da fácies 4, suprajacente, e resultam provavelmente da ação de sismos que, através de processos extensionais, fraturaram a crosta algal, após a formação desta. Estas fraturas, conhecidas por diques neptunianos, terão ocorrido debaixo de água e sem exposição subaérea. Recobrindo a superfície de erosão desta crosta calcária multiespecífica, está uma camada de areias bioclásticas muito pouco consolidadas (fácies 4; Fig. 100), com uma coloração geralmente amarelada e, com exceção dos grãos de origem vulcânica, constituída essencialmente por pequenos fragmentos de conchas de moluscos, com conteúdo de carbonatos entre 56 e 67%. Esta unidade é a que apresenta maior extensão, sendo a única presente em certos locais. Nestes casos, assenta diretamente sobre o basalto que forma a base do terraço marinho (Fig. 47d; Fig 99).

Estas areias correspondem a uma fácies de sedimentos que se terão depositado na antepraia superior (zona entre-marés), apresentando uma grande semelhança com as atuais praias da Praia do Calhau, Praia Formosa e Prainha, quer na composição mineralógica e nos tamanhos dos grãos constituintes, quer na percentagem de conteúdos carbonatados (Ávila *et al.*, 2009). Nestes sedimentos arenosos existem bioclastos (restos de conchas de moluscos, de espinhos de equinodermes ou de algas coralinas), grãos de minerais e também fragmentos de rochas.



Figura 100. As setas vermelhas apontam para os diques neptunianos, estruturas pós-deposicionais do tipo corte- preenchimento. Este preenchimento é principalmente constituído por arenito fino, resultante da deposição de areias da camada B1 (Ávila *et al.*, 2010).

Uma fina crosta carbonatada de origem pedológica recobre os sedimentos bioclásticos arenosos (cf. Fig. 46). Este solo desenvolveu-se em depósitos de dunas eólicas, sendo esta crosta formada principalmente por carbonatos microcristalinos (micrito) que precipitaram juntamente com lamas e outras impurezas de reduzidas dimensões (entre 1/16 e 1/256 mm de diâmetro) (Fig. 101).

Recobrindo a fácies 4 estão dunas e depósitos de aluvião/coluvião (fácies 5 a7) (cf. Fig. 97). As aluviões são depósitos fluviais detríticos de idade recente, relativamente abundantes na zona da Ribeira da Praia do Calhau, ao passo que as coluviões são depósitos de vertente, ou seja, materiais de aspeto terroso e incoerentes, localizados em vertentes de relevo mais ou menos acentuado, provenientes de deslizamentos de terra da arriba por ação da gravidade (Fig. 102).



Figura 101. Microfotografias de lâminas delgadas. Amostra SM06-1 recolhida na zona de transição entre as fácies 3 e 4 (Ávila *et al.,* 2009). A: a seta vermelha indica a matriz do micrito (todas as zonas a castanho); a seta a laranja indica o cimento de calcite sparítica (zonas a branco). B: litoclastos (seta azul) e bioclastos aloquímicos (seta amarela).

Este afloramento apresenta características típicas de um pico eustático, começando com "transgressive lag" (depósitos de alta energia e de pouca profundidade, correspondentes à erosão de uma superfície rochosa), passando para depósitos de maior profundidade (fácies 3 e depois Fácies 4), atingindo-se aqui o máximo eustático do pico referido; e passa de novo a depósitos de praia, mas subaéreos (crostas e dunas); sendo depois recoberto por depósitos de vertente/coluviais em ambiente subáereo. A sequência atrás descrita fornece evidência sedimentar para o pico transgressivo e subsequente regressão.

Delimitação geográfica da jazida da Praia do Calhau



Figura 102: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Praia do Calhau



Delimitação geográfica da jazida da Praínha

Figura 103: Delimitação geográfica da jazida fóssil da Praínha

17. <u>Figueiral</u>

A jazida do Figueiral, localizada cerca de 500 m a leste da Pedreira do Campo, no flanco sudoeste do Pico Facho, foi um dos locais mais importantes e de mais fácil acesso, para a extração de cal, na ilha de Santa Maria. O forno de cal dista cerca de 250 m do local onde eram extraídos os calcários, e é aquele que mais próximo está de uma jazida, de todos os que foram construídos na ilha para esse fim (Fig. 104).



Figura 104. Forno de cal nas imediações da gruta do Figueiral. Muitas das rochas que o constituem possuem imensos fósseis incrustados.

Alguns dos fósseis mais emblemáticos extraídos deste local (ex: um magnífico exemplar fossilizado de *Persististrombus coronatus*, outro exemplar de *Xenophora* sp.) estão hoje em

exposição na "Casa dos Fósseis", tendo sido ambos entregues ao naturalista Dalberto Pombo, pelos trabalhadores do Figueiral, conhecedores do seu interesse no património natural de Santa Maria (Fig. 105).



Figura 105. Molusco gastrópode *Persististrombus coronatus* em exposição na Casa dos Fósseis, em Santa Maria (à esquerda). Interior das galerias da gruta do Figueiral.

A jazida do Figueiral é conhecida desde o Século XVI, quando foi mencionada pelo cronista do reino, Gaspar Frutuoso (1983). Desde então, tem sido sistematicamente referida na bibliografia científica (ex: Hartung, 1860; Reiss, 1862; Mayer, 1864; Ferreira, 1952, 1955; Zbyszewski & Ferreira, 1962; Zbyszewski *et al.*, 1961; Cachão *et al.*, 2003; Madeira *et al.*, 2007, 2011; Winkelmann *et al.*, 2010; Ávila *et al.*, 2012; Ávila & Rodrigues, 2013; Ávila *et al.*, 2018). Os depósitos expostos na jazida do Figueiral permitem distinguir e representar uma coluna estratigráfica com 8 fácies litológicas (1-8; Fig. 106B; Habbermann, 201; Ávila *et al.*, 2018).

A sequência visível tem início aos 95 m de altitude, com uma unidade com cerca de 5 m de espessura. A base desta unidade não está exposta. A fácies 1, com cerca de 3 m de espessura, é formada por uma brecha vulcaniclástica, não estratificada e com material pouco calibrado. A quantidade de pedras e de seixos arredondados aumenta no sentido do topo da fácies 1, estando estes materiais frequentemente incrustados por algas vermelhas coralinas, sob a forma de rodólitos. As brechas com matriz vulcaniclástica transformam-se gradualmente numa rocha carbonatada bioclástica com uma espessura total de cerca de 2 m (fácies 2; Fig. 108d-f). Os bioclastos que a compõe são maioritariamente constituídos por fragmentos de moluscos (bivalves e gastrópodes), briozoários, algas coralinas, fragmentos de equinodermes, foraminíferos bentónicos e planctónicos (anfisteginídeos e globigerinídeos) (Fig. 108d-f). A fácies 3 inicia-se cerca dos 100 m de altitude e possui cerca de 2 m de espessura; esta fácies está pouco exposta na superfície visível do afloramento. Tem uma composição heterogénea de

cascalho e blocos de natureza vulcaniclástica, aumentando para o topo a percentagem de ocorrência de uma matriz com características areníticas e argilosas. Ao longo desta "zona de transição", ocorrem lentículas areníticas bioturbadas e horizontes finos de argilas castanhas, bem como rodólitos e conchas de pectinídeos.



Figura 106. Coluna estratigráfica composta detalhada da Pedreira do Campo (A) e do Figueiral (B), e mostrando o horizonte que permite correlacionar as colunas estratigráficas das duas jazidas. Os números representados por círculos pretos correspondem às fácies 1-8 existentes na coluna do Figueiral (B), e são descritos no texto.

O nível basal da fácies 4 inicia-se aos 102 m de altitude e caracteriza-se por uma abundância pronunciada de seixos rochosos arredondados e encrostados por algas calcárias, formando rodólitos, os quais se encontram inseridos numa matriz esbranquiçada com mais de 10% de grãos superiores a 2 mm. A abundância de seixos rochosos e de rodólitos diminui para o topo

da fácies 4, ao passo que a percentagem de matriz aumenta, passando gradualmente a um calcarenito granuloso (fácies 5) com uma espessura entre 1,5 a 2 m, não estratificado, bem calibrado, constituído essencialmente por foraminíferos bentónicos e planctónicos (anfisteginídeos com até 1 mm de comprimento máximo, e globigerinídeos; Fig. 16c), fragmentos de briozoários e de algas vermelhas (Fig. 15B, 17g-i). Nos últimos 20-30 cm da fácies 5, a quantidade de material piroclástico aumenta consideravelmente.



Figura 107. Afloramento do Figueiral. A) Pedreira histórica vista do exterior. B) Conchas dos bivalves dominantes *Aequipecten macrotis* (Sowerby) e *Aequipecten opercularis* (Linnaeus) (fácies 6). C) Observe os abundantes macroforaminíferos bentónicos e planctónicos (anfisteginídeos e globigerinídeos) (fácies 5). D) O interior de uma das galerias exploradas para calcário. Tufos de cinzas e *lapilli* do complexo do Pico Alto (fácies 8).



Figura 108. Fotografias dos afloramentos e fotomicrografias dos calcários da Pedreira do Campo e Figueiral. a-– c Pedreira do Campo (fácies 1). d – f Figueiral (fácies 2). g – i Figueiral (fácies 5). j – I: Figueiral (fácies 7). As manchas azuis devem-se à impregnação por resina.

Por volta dos 104 m de altitude, dá-se a passagem para a fácies 6, com cerca de 50 cm de espessura, uma coquina rica em valvas desarticuladas de bivalves pectinídeos com menos de 5 cm de diâmetro máximo, e quase exclusivamente constituída por exemplares de duas espécies, *Aequipecten macrotis* (Sowerby, 1847) e *Aequipecten opercularis* (Linnaeus, 1758) (Fig.107b). A distinção entre estas duas espécies não é fácil e requer alguma prática, sendo a diferença principal o nº de costelas (20-21 na primeira espécie, 18 na segunda) e a presença de caneluras com ondulação forte no caso de *Aequipecten macrotis* e de caneluras com ondulação fraca, no caso de *Aequipecten opercularis*. *Lapilli* palagonitizados e pouco calibrados são os principais constituintes da matriz, para além de elementos esqueléticos fragmentados de moluscos (bivalves e gastrópodes), briozoários e foraminíferos. A transição entre as fácies 6 e 7 é brusca e nítida. A fácies 7 possui cerca de 5-10 cm de espessura, é lateralmente descontínua e

caracteriza-se por ser um horizonte formado por anfisteginídeos (Fig. 108I) numa matriz com grão de dimensões variáveis entre os 0,5 mm e >2 mm, acessoriamente possuindo rodólitos, foraminíferos bentónicos e fragmentos de briozoários e de equinodermes.

Do ponto de vista paleontológico, o registo fóssil inventariado para a jazida do Figueiral é dos mais pobres de Santa Maria. Neste momento, são reportados 21 taxa para este afloramento: 1 espécie de tubarão (*Cosmopolitodus hastalis* (Agassiz, 1833), 1 craca (*Zullobalanus santamariaensis* Buckeridge & Winkelmann, 2010), 1 ouriço [*Clypeaster altus* (Leske, 1778)], 9 moluscos bivalves, 4 moluscos gastrópodes, 1 celenterado (*Parasmilia radicula* Mayer, 1864), 2 briozoários, 1 foraminífero (*Amphistegina* sp.) e 1 cetáceo não identificado (Ávila *et al.*, 2015b; Fig. 109).



Figura 109: Fósseis mais comuns no afloramento do Figueiral. A — Aequipecten opercularis (Linnaeus, 1758); B — Aequipecten opercularis e A. macrotis (Sowerby, 1847); C — aglomeração de macroforaminíferos bentónicos Amphistegina sp.; D — Clypeaster altus (Leske, 1778).

Delimitação geográfica da jazida do Figueiral



Figura 110: Delimitação geográfica da jazida do Figueiral



Zona tampão da jazida do Figueiral

Figura 111. Zona tampão da jazida do Figueiral

18. <u>Pedreira do Campo</u>

A Pedreira do Campo é uma antiga exploração de basaltos, localizada cerca de 1 km a SE de Vila do Porto e a cerca de 1,2 km a SW do Pico Facho, numa zona não urbanizada e inserida num contexto de paisagem cultural tradicional de pequenos campos murados utilizados para pasto e agricultura. Esta área (juntamente com o Figueiral e, posteriormente, a Prainha) foi classificada como Monumento Natural Regional, na sequência de trabalhos de investigação efectuados por membros do MPB (Marine PalaeoBiogeography working group, da Universidade dos Açores) e seus colegas, em 2001/2002 (Cachão *et al.*, 2003). A sua classificação é justificada "pelo interesse científico, educativo e turístico, por expor a sequência de passagem de rochas sedimentares a rochas vulcânicas submarinas do Pliocénico inferior, por constituir um afloramento de lavas em almofada de grande beleza geológica e elevado valor didáctico (Fig. 112) e por ser um dos locais da ilha onde se podem observar calcários marinhos fossilíferos" (Cachão *et al.*, 2003).



Figura 112: Lavas em almofada na Pedreira do Campo.

A sequência da Pedreira do Campo regista a passagem do topo da unidade Complexo do Touril, ali representada por rochas sedimentares, à base do Complexo Vulcânico do Pico Alto, de natureza vulcânica submarina (cf. Serralheiro *et al.*, 1987). As escoadas lávicas que formaram o Pico Facho têm uma idade aproximada de 2.84±0.04 Ma (Sibrant *et al.*, 2015). A Pedreira do Campo é um dos locais da Ilha de Santa Maria onde é possível observar em afloramento localizado a cerca de 300 m da atual linha de costa, rochas sedimentares fossilíferas. No local afloram biocalcarenitos conglomeráticos com conteúdo fóssil abundante e diversificado. A associação fossílifera inclui micro e macro-somatofósseis e icnofósseis. De entre os somatofósseis são de destacar nanofósseis calcários, algas rodofíceas (rodólitos e laminitos algais; Rebelo *et al.*, 2016), macroforaminíferos bentónicos, anelídeos poliquetas, corais solitários e coloniais, moluscos bivalves e gastrópodes, briozoários e equinodermes. Os icnofósseis estão representados, basicamente, por estruturas de bioerosão de esponjas e de bivalves afetando elementos esqueléticos de outros organismos. A Pedreira do Campo tem, também, elevado valor didático para o ensino da Geologia e da Paleontologia. Acresce, ainda, a grande beleza geológica e paisagística do afloramento e da área envolvente (Cachão *et al.*, 2003) (Fig. 113).



Figura 113: Panorâmica da Pedreira do Campo, antes (em cima) e após (em baixo) a implantação do passadiço de madeira.

O afloramento da Pedreira do Campo é um importante património geológico, sobretudo de cariz paleontológico e vulcanológico. Este Monumento Natural Regional, contém uma sucessão de cerca de 5 m de sedimentos fossilíferos do Touril com duas fácies distintas (subunidades 1 e 2; Fig. 106A). O contacto basal da subunidade 1 (topograficamente inferior à subunidade 2) não é visível, porque não está exposto. A subunidade 1 é formada por calcários bioclásticos brancos, impuros, que afloram a uma altitude de cerca de 100 m. Cerca de 5% destas rochas compactas e sem estrutura são seixos de basalto que estão espalhados na matriz de carbonato de granulação fina, constituindo o núcleo à volta do qual estão concentricamente incrustadas algas calcárias, formando rodólitos com formato irregular (Fig. 114). As conchas de moluscos de maiores dimensões são também constituintes comuns destas rochas. Vistos ao microscópio, estes calcários são ricos em foraminíferos bentónicos com até 2 mm de comprimento máximo (principalmente anfisteginídeos), em moluscos (bivalves e gastrópodes), briozoários, e rodólitos. Algumas das conchas de moluscos estão recristalizadas ou estão presentes sob a forma de moldes. O contacto superior da subunidade 1 (calcários) está recoberto por um arenito lítico castanho claro, bem estratificado, e com uma espessura de aproximadamente 4,5 m; esta subunidade 2 apresenta uma coloração avermelhada na parte superior. Estes arenitos são recobertos por cerca de 20 m de espessura de lavas em almofada do Complexo Vulcânico do Pico Alto (subunidade 3; Fig. 106A) (Habbermann, 2010).



Figura 114: Calcários da Pedreira do Campo. Note-se a abundância de rodólitos.

Reconstrução paleoecológica do Figueiral e Pedreira do Campo

Na maioria das ilhas oceânicas de pequena dimensão (como é o caso de Santa Maria), o fornecimento de sedimentos para a plataforma insular está largamente relacionado com os processos de erosão marinha em períodos em que o nível das águas do mar esteve acima do atual, sendo negligenciável o transporte de sedimentos por via de sistemas fluviais (Ávila *et al.*, 2008, 2018). Durante as fases de menor atividade vulcânica, desenvolveram-se nas plataformas insulares de Santa Maria, "fábricas de carbonato" que foram preservadas geralmente em pequenos depocentros, tal como sucedeu no Figueiral e na Pedreira do Campo (e também na Pedra-que-pica), durante o Pliocénico inferior.

No Figueiral e na Pedreira do Campo, as "fábricas de carbonato" ter-se-ão desenvolvido num ambiente fótico litoral (provavelmente a profundidades inferiores a 60 m). As relações estratigráficas e a composição faunística sugerem que os calcários da fácies 1 da Pedreira do Campo (Fig. 106A) correspondem estratigraficamente aos calcários do horizonte superior (fácies 7) do Figueiral (Fig. 106B). As diferenças encontradas entre as duas fácies de calcários destas duas jazidas provavelmente refletem a elevada variabilidade destas fácies em função de diferenças locais na paleomorfologia dos depocentros localizados na antiga plataforma insular (Fig. 115).

A sucessão sedimentar existente no afloramento do Figueiral é interpretada como um ciclo retrogradacional-progradacional que chegou a atingir condições de mar aberto, mas que se manteve dentro da zona eufótica, durante a retrogradação máxima; é por essa razão que deduzimos uma profundidade máxima da ordem dos 60 m para a deposição destes sedimentos (Fig. 115). De acordo em esta interpretação, a fase retrogradacional é representada pelos depósitos do Touril, ao passo que a fase progradacional é formada pelos tufos do Complexo Vulcânico do Pico Alto.

A brecha basal do Figueiral (fácies 1 e 2) é interpretada como um fluxo de detritos, sendo curta a distância de transporte, uma vez que não ocorreu arredondamento dos clastos angulares. A composição clástica desta brecha indica como fonte de proveniência as lavas basais do Complexo dos Anjos. Uma vez que a parte inferior da referida unidade carece de indicadores para um depósito submarino, é sugerido um ambiente de deposição subaéreo. Subsequentemente, terá ocorrido uma subida relativa do nível das águas do mar (retrogradação), tendo o fluxo de detritos sido retrabalhado na sua parte superior (fácies 2), provavelmente num ambiente marinho de alta energia (zona intertidal ou na zona subtidal pouco profunda), tal como é indicado pela ocorrência de seixos arredondados e de rodólitos. Nessa altura, desenvolveu-se uma "fábrica de carbonato", tendo-se iniciado em simultâneo o depósito dos bioclastos ("packstone" a "floatstone"), que formam a matriz da brecha vulcaniclástica.



Figura 115. Reconstrução da antiga linha de costa de Santa Maria cerca dos 3,5 Ma (milhões de anos), com base no recente Modelo Digital de Terreno (DTM) (Rebelo *et al.*, 2016). (A) Projeção vertical da ilha. (B) projeção oblíqua da ilha. A linha tracejada branca representa a antiga linha de costa aos 3,5 Ma (205 m acima do atual nível do mar). 1 – Pedreira do Campo; 2 – Figueiral; 3 – Malbusca; e 4 – Pedra-que-pica. Repare-se que a distância à antiga linha de costa é muito maior no caso da Pedreira do Campo e do Figueiral (4 km no mínimo), do que no caso da Pedra-que-pica (o que explica a ocorrência de calcários brancos, sem input terrígeno, na Pedreira do Campo e no Figueiral). Durante a retrogradação em curso, um segundo fluxo de detritos deu origem aos sedimentos encontrados na "zona de transição" (fácies 3). A sedimentação marinha continuou tendo-se depositado as unidades correspondentes às fácies 4 e 5, expostas na pedreira do Figueiral. Estes sedimentos representam uma continuidade na transgressão marinha, daqui se deduzindo profundidades progressivamente maiores para a deposição dos sedimentos.

A elevada concentração de rodólitos esféricos no Figueiral, não cimentados, na fácies 4, e o seu gradual desaparecimento ao longo da fácies 5 concorrem para esta interpretação de uma transgressão marinha. De facto, a ocorrência de aglomerações de rodólitos esféricos requer constantes ou, pelo menos, episódicos eventos de maior energia, os quais são induzidos por correntes ou por ondas. A unidade sedimentar seguinte (fácies 5) é desta forma associada a um ambiente de mar aberto, mais profundo, na vigência do qual terá sido limitado o input de sedimentos siliciclásticos provenientes da (possível) ilha emersa. A coquina que forma a unidade sobrejacente (fácies 6), provavelmente foi depositada sob a forma de fluxo de detritos. Baseamos isto na ausência de estruturas sedimentares e na ausência de uma orientação preferencial para a deposição das conchas (constituídas praticamente em exclusivo por valvas desarticuladas de bivalves). Os tufos incorporados nesta coquina indiciam um primeiro período (curto) de atividade eruptiva submarina.

Durante a fase eruptiva subsequente, formou-se a fácies 7. Esta unidade representa o topo do Complexo do Touril e, provavelmente, ter-se-á depositado durante o máximo da retrogradação patente na sequência exposta no Figueiral. Os abundantes organismos fototróficos que caracterizam esta unidade indicam que a deposição ocorreu dentro da zona eufótica, a qual hoje em dia, nos Açores, se prolonga até cerca dos 60 m de profundidade. Esta interpretação está de acordo com a formulada por Kirby *et al.* (2007) para a unidade de calcários na Pedreira do Campo (fácies 1; Fig. 106A), localizada nas proximidades, a qual se terá formado num banco submarino de baixa profundidade e longe de quaisquer fontes de sedimentos terrígenos subaéreos. Estas deduções baseiam-se na predominância de organismos fotossintéticos (rodólitos formados por algas coralinas fototróficas e foraminíferos bentónicos) bem como na ausência de materiais terrígenos de granulação fina e implicam que, nesta altura, tanto o Figueiral como a Pedreira do Campo se localizariam na plataforma insular, a profundidades máximas da ordem dos 50-60 m, e a uma distância relativamente grande de uma possível fonte de sedimentos de origem terrestre (da ordem dos 4 km, no mínimo). Todas estas evidências concorrem no sentido da interpretação de Ávila *et al*. (2012) e de Ramalho *et al*. (2017) de que, muito provavelmente, nesta altura, toda a ilha de Santa Maria seria um imenso "guyot", truncado no topo devido à erosão marinha, eventualmente com alguns pequenos ilhéus, assim se explicando a ausência de sedimentos de origem terrestre (Fig. 116).

Figura 116. Esboço representando os principais estágios da história evolutiva da ilha de Santa Maria. (1a) Estágio de monte submarino, subestágio de águas profundas, durante o final do Miocénico (?): Início da construção da ilha, inicialmente como um vulção submarino em grande parte efusivo (inferido). (1b) Estágio de monte submarino, subestágio de águas intermedias, durante o Miocénico tardio: crescimento sustentado do edifício por vulcanismo efusivo submarino vigoroso (inferido). (2) estágio emergente da ilha, por volta dos 6-5,8 Ma: primeira emergência acima do nível do mar por vulcanismo to tipo Surtseiano e transição para vulcanismo subaéreo. (3) Fase de construção do vulcão em escudo, 5,8-5,3 Ma: vulcanismo sustentado, proporcionando a construção de um vulcão subaéreo, com subsidência acelerada. (4) Estágio erosivo, 5,3-4,1 Ma: vulcanismo em declínio, erosão, movimentos de vertente (eventualmente incluindo a perda do setor leste do edifício) e subsidência, levando ao truncamento do edifício da ilha existente e sedimentação marinha extensa; o edifício provavelmente assemelhava-se a um guyot, com o topo truncado, assim tendo permanecido até ao final desta etapa. (5) Primeiro estágio rejuvenescido, 4,1-3,5 Ma: renovado e vigoroso vulcanismo constrói um novo edifício insular descentrado para leste em relação ao antigo edifício, resultando em significativo avanço costeiro para leste e para oeste, pela progradação de deltas alimentados por lava, sob subsidência contínua; a progradação vulcânica para leste ultrapassou o bordo da plataforma insular existente. (6) Segunda etapa rejuvenescida, 3,2-2,8 Ma, uplift/elevação desde ca. 3.5 Ma: vulcanismo em declínio e uma reversão da subsidência para uma tendência de uplift/elevação, que resulta em erosão e geração de terraços marinhos; o vulcanismo monogenético esporádico de baixo volume continuou até 2,8 Ma. (7) Estágio de ilha elevada, ca. 3,5 (ou 2,8) Ma até o presente: elevação e erosão contínuas, com a erosão marinha particularmente concentrada no lado de barlavento, levando à topografia atual (Ramalho et al., 2017).

Posteriormente, um período de intensa atividade eruptiva submarina recobriu abruptamente os sedimentos marinhos, formando os tufos surtseianos do Complexo Vulcânico do Pico Alto (fácies 8; Fig. 106B). A estratificação plano-horizontal desta unidade, bem visível na Pedreira do Campo (fácies 2; Fig. 106A) sugere a sua formação numa área costeira litoral (Kirby *et al.*, 2007). Com o início da deposição dos tufos vulcânicos, terminou a "fábrica de carbonato" anteriormente existente na plataforma insular, tendo por seu turno aumentado tremendamente o fornecimento de sedimentos à plataforma insular, o que provocou uma mudança do sistema sedimentar de retrogradação para progradação, muito provavelmente, sem uma mudança significativa do nível das águas do mar. Os níveis mais elevados de lavas em almofada, que são tão abundantes e estão tão bem preservados na Pedreira do Campo (fácies 3; Fig. 106A), estão ausentes no Figueiral, o que sugere que a sua distribuição foi ou controlada morfologicamente e/ou restrita às vizinhanças da fonte emissora dessas lavas, que se depositaram, obviamente, em ambiente submarino.

18.1. Delimitação geográfica da jazida da Pedreira do Campo

19. <u>Área do Aeroporto</u>

A jazida do aeroporto contém fósseis Plistocénicos (ex., *Patella* sp.) encontrados num dos terraços subaéreos existentes na zona do Ginjal, a uma altitude entre os 85-90 m. Nesta fase, não nos é possível adiantar mais informação relativamente a esta jazida, pois os dados que temos recolhido ao longo dos últimos 10 anos ainda não estão publicados.

<figure>

Delimitação geográfica da jazida do Aeroporto

25°10'W

25°9'45"W

Figura 118. Delimitação geográfica da jazida fóssil do Aeroporto.

ANEXO II – Glossário

- Abrasão/Abrasão marinha Erosão das rochas causada pela ação mecânica dos fragmentos ou partículas transportadas pelas correntes eólicas (corrosão), fluviais, marinhas (abrasão marinha) ou pelos glaciares.
- Alpondra ("stepping-stones" em inglês) Numa tradução literal, significa cada uma das pedras dispostas de modo a deixarem atravessar correntes de água (ribeiros, rios) a pé enxuto. Em biogeografia, corresponde ao mecanismo em que montes submarinos passam a funcionar como ilhas, como resultado da descida do nível médio das águas do mar durante estádios glaciais, assim diminuindo a distância entre arquipélagos isolados e fontes colonizadoras continentais, o que faz aumentar a taxa de dispersão de espécies continentais no sentido das ilhas.
- Alquenonas As alquenonas são compostos orgânicos produzidos por algumas espécies de fitoplâncton da classe Prymnesiophyceae. Foram descritas pela primeira vez em sedimentos oceânicos e são utilizadas em geoquímica para estimar a temperatura da água do mar na qual os organismos produtores de alquenonas cresceram.
- Aluvião Depósito sedimentar constituído por elementos geralmente grosseiros, que podem apresentarse mais ou menos consolidados. Os sedimentos das aluviões são transportados pelas águas dos rios e ribeiros.
- Ambiente sedimentar / ambiente deposicional Local onde ocorre deposição de material sedimentar. Pode ser continental, costeiro, marinho, fluvial ou lacustre. Quando se considera um ambiente sedimentar, consideram-se igualmente as suas condições físicas, químicas e biológicas.
- Aragonite Mineral de fórmula química CaCO₃. É uma das formas cristalinas do carbonato de cálcio, cristalizando no sistema ortorrômbico, sendo muito menos estável e mais solúvel em água do que a calcite. Por esta razão, animais com conchas predominantemente aragoníticas são mais dificilmente preservados no registo fóssil do que aqueles com conchas predominantemente calcíticas.
- Batimetria Medição da profundidade dos oceanos, lagos e rios, sendo expressa cartograficamente por curvas batimétricas, que unem pontos da mesma profundidade com equidistâncias verticais.
- Bioclasto Partícula esquelética de natureza biológica maior que 2 mm, fragmentada ou inteira, articulada ou não, e com distintas composições químicas, onde pode ficar registrada a atividade de agentes mecânicos (hidráulicos, eólicos), biológicos (predadores, encrostantes) ou químicos (dissolução), que atuam desde a morte do organismo até o seu enterramento.

- Bivalves São moluscos abundantes e diversos, constituídos por duas valvas calcárias que encerram as partes moles. As valvas articulam-se numa charneira que possui, geralmente, dentes, fechando-se devido à ação de dois músculos. A maior parte apresenta simetria bilateral, sendo o plano de simetria correspondente ao plano de separação das valvas. São animais maioritariamente marinhos, bênticos infaunais ou epifaunais, alimentando-se por filtragem.
- Briozoários São animais invertebrados, sésseis e coloniais. O grupo é constituído por animais predominantemente encontrados em água salgada, mas também ocorrendo em água doce. No ambiente marinho podem ser encontrados em todas as profundidades, sendo, porém, mais comuns em águas rasas nos mares tropicais. Os briozoários marinhos possuem um esqueleto calcário e participam da construção de recifes.
- Calcarenito Tipo de rocha calcária, composta principalmente por detritos carbonatados, com mais de 50% dos grãos com um diâmetro entre 0.0625 e 2 mm. Estes grãos podem ser formados por fragmentos de bioclastos, de intraclastos calcários, de carbonatos mais antigos ou por uma combinação destes constituintes. O calcarenito é o equivalente calcário do arenito.
- **Calcite** tal como a aragonite, possui fórmula química CaCO₃. Possui clivagem perfeita e romboédrica, e é mais estável e menos solúvel em água do que a aragonite.
- Carbonatos sais inorgânicos ou os seus respetivos minerais, que possuem o anião carbonato CO₃²⁻ na sua composição química.
- **Carbonato de cálcio (CaCO₃)** é o principal componente do calcário. Na natureza, os minerais de carbonato de cálcio apresentam-se sob três formas cristalinas: aragonite, calcite e vaterite.
- **Cimentação** Processo que consiste na precipitação química de minerais siliciosos, carbonatados, metálicos ou outros (cimento) que agrega as partículas numa rocha sedimentar detrítica.
- Cimento Material mineral que ocorre nos espaços entre os componentes das rochas sedimentares detríticas e que funciona como a «cola» que mantém os fragmentos coesos e agregados entre si.
- **Circulação Termohalina** A circulação termohalina (também conhecida por circulação termossalina) corresponde à circulação oceânica global devido às diferenças de densidade das águas dos oceanos provocadas por variações de temperatura (termo) ou de salinidade (halina), quer em regiões oceânicas superficiais, quer profundas. O aumento de densidade da água pode ocorrer devido ao seu arrefecimento, ao excesso de evaporação, a um processo de precipitação, à descarga de rios, ou à formação de gelo e consequente aumento de salinidade. É chamada de termohalina toda a circulação que não é gerada pelos ventos.
- Clástico Característica da rocha que é formada por fragmentos de rochas ou minerais de outras rochas pré-existentes.

- Clasto Fragmento de rocha que foi desagregado da rocha mãe, por processos de erosão, tectónicos ou vulcânicos. Os clastos tendem a sofrer transporte e deposição, sedimentando e passando a constituir uma rocha sedimentar detrítica (brecha, por ex.).
- **Clinoforme** Forma geométrica, vista em perfil ou corte, da fisiografia de um substrato ou fundo submarino, atual ou soterrado, representando a progradação desse perfil deposicional.
- Clinopiroxenas Minerais do grupo das piroxenas, caracterizados por possuírem um sistema cristalino monoclínico, isto é, com os três eixos cristalográficos apresentando comprimentos diferentes. Os cristais deste sistema normalmente apresentam apenas um eixo de simetria binário, ou um único plano de simetria, ou uma combinação de ambos. As piroxenas são um grupo de silicatos que ocorrem em rochas de origem vulcânica ou metamórfica, sendo muitas das vezes o grupo mineral dominante.
- **Compactação** Força exercida nos sedimentos, pelo peso dos sedimentos suprajacentes e que provoca expulsão de fluídos e coesão dos materiais, sendo um dos processos que ocorre na litificação dos sedimentos.

Crista Média Atlântica – Ver Dorsal Média Alântica.

- **Cronostratigrafia** ramo da estratigrafia que estuda a idade dos estratos rochosos em relação ao tempo, isto é, que se preocupa com a idade absoluta das rochas e estratos. A missão última da cronostratigrafia é estabelecer uma escala de tempo geológico aplicável a todo o globo, e em relação com processos geológicos (orogenias e glaciações, por exemplo) que deixaram uma assinatura à escala glogal ou quase global.
- Datação radiométrica Métodos de cálculo da idade absoluta de uma rocha e/ou minerais (geocronologia), recorrendo ao decaimento natural de isópopos de elementos químicos que compõe os minerais dessa rocha. A datação por carbono 14 é um dos métodos usados para datar amostras com menos de 50.000 anos.
- Deposição normal Diz-se de uma sequência sedimentar caraterizada por possuir sedimentos de grão mais grosseiro na base do depósito, os quais vão diminuindo de dimensão para o topo da sequência, onde os sedimentos são mais finos.
- Deposição reversa Diz-se de uma sequência sedimentar caraterizada por possuir sedimentos de grão mais fino na base do depósito, os quais vão aumentando de dimensão para o topo da sequência, onde os sedimentos são de grão mais grosseiro.
- Diagénese Conjunto dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem após a deposição dos sedimentos, durante e após o processo de litificação. Os fenómenos de alteração e metamorfismo não fazem parte da diagénese. A diagénese reflete-se nas transformações químicas, físicas e biológicas ocorridas nos sedimentos e compreende fenómenos como o

rearranjo espacial dos componentes da rocha, cimentação, dissolução por pressão, precipitação e recristalização, entre outros.

- Diques neptunianos Também conhecidos por filões neptunianos. Resultam, por ação da gravidade, do preenchimento de fraturas por sedimentos não consolidados, os quais são posteriormente cimentados.
- Discordância angular corresponde ao limite entre unidades litoestratigráficas, marcada por um hiato, ou seja, por um período em que houve erosão ou não-deposição de sedimentos, e em que inicialmente houve a deposição de um material (que pode ou não ter sido litificado), o qual sofreu abalos sísmicos mudando sua configuração inicial; posteriormente, houve uma nova deposição, a qual gerou rochas com uma inclinação diferente da rocha mais velha.
- **Dorsal Média Atlântica** Corresponde à maior cordilheira submarina existente no nossa planeta, a qual se prolonga por mais de 16.000 km sob o Oceano Atlântico, entre o Oceano Ártico (Gakkel Ridge) e o Antártico (Junção Tripla de Bouvet), desde os 87° N de latitude até à ilha de Bouvet (54° S). Os locais mais elevados desta cordilheira emergem sob a forma de ilhas. A formação desta grande cordilheira deve-se a um limite divergente entre placas tectónicas: no Atlântico Sul, ao afastamento entre as placas sul-americana e a africana. O Oceano Atlântico está atualmente a expandir-se ao longo desta dorsal, a um ritmo que varia entre 2 a 10 cm/ano. Esta dorsal foi descoberta na década de 1950 por Bruce Heezen e Marie Tharp, tendo a sua descoberta levado à formulação da teoria de expansão do fundo oceânico e à aceitação da teoria da Deriva Continental formulada anteriormente por Alfred Wegener.
- **Equinodermes** Grupo de invertebrados marinhos que possuem, geralmente, um esqueleto dérmico calcário, usualmente com espinhos. Regra geral têm simetria penta-radiada. Os seus representantes atuais mais comuns são os ouriços-do-mar, as estrelas-do-mar, as holotúrias e os lírios-do-mar.
- Erosão Processo geológico que envolve a degradação de materiais geológicos pré-existentes por ação, química, física ou biológica. Os principais agentes erosivos são o mar, vento, gelo, água e marés.
 As rochas ao sofrer alteração física e química começam a desagregar-se e os fragmentos resultantes são transportados.

Erosão mecânica - Ver Abrasão.

- **Erosão química** Processo erosivo que tem origem em reações químicas, tais como, a hidrólise, hidratação, oxidação, entre outras.
- **Esparrite** designação dada na classificação de Folk ao cimento matricial de calcite cristalina que ocorre nos calcários e mármores. As esparrites designam-se por micro-esparrite quando o cimento é

formado por cristais microscópicos e por bioesparrite quando resulta da formação de calcite durante o processo de fossilização, retendo pelo menos parcialmente as formas do molde biológico.

- Estádio glacial Período de tempo decorrido entre dois estádios interglaciais consecutivos, caracterizado por baixas temperaturas médias globais da atmosfera e água do mar e, consequentemente, por um aumento do volume das calotes polares e dos glaciares, e por uma diminuição do nível médio das águas do mar.
- Estádio interglacial Período de tempo decorrido entre dois estádios glaciais consecutivos, caracterizado por temperaturas médias globais mais elevadas da atmosfera e água do mar e, consequentemente, por uma diminuição do volume das calotes polares e dos glaciares, e por uma subida do nível médio das águas do mar.
- **Estratigrafia** Estudo geológico, no tempo e no espaço, das camadas rochosas que constituem a crosta terrestre. Uma tarefa básica da estratigrafia é correlacionar, ou seja, equiparar temporalmente, as sequências de camadas geológicas que ocorrem em diferentes locais da superfície terrestre. A representação da informação estratigráfica faz-se recorrendo a cortes geológicos e colunas estratigráficas, e consequente interpretação e correlação com outras regiões comparando espessuras, distribuição espacial das rochas, e unidades estratigráficas. Recorre-se frequentemente à cronostratigrafia, litostratigrafia (parte da Estratigrafia que se dedica ao estudo das unidades estratigráficas no que diz respeito à sua continuidade vertical e lateral e à existência de hiatos), biostratigrafia (estudo da idade das camadas sedimentares e execução de correlações entre estratos, tendo como base o seu conteúdo fossilífero; os fósseis ideais neste tipo de estudo são os fósseis de idade, ou seja, são aqueles que correspondem a organismos que se distribuem em intervalos de tempo curtos e abrangendo uma ampla área geográfica), sismostratigrafia, magnetismo remanescente, geoquímica, etc.
- Eustasia/Variação eustática Refere-se às variações do nível da água dos oceanos. Estas variações ocorrem em função das épocas glaciais (aumento da massa de gelo com descida do nível das águas) e interglaciais (quando ocorre o degelo e a subida do nível das águas), assim como de variações da topografia dos fundos oceânicos.
- "Fábrica" de carbonato Mecanismo natural de produção de sedimentos carbonatados, quer por via da precipitação química de CaCO₃ diretamente a partir de águas marinhas em climas tropicais, quer pela precipitação induzida por actividade biológica que, por sua vez, pode ter dois mecanismos distintos: 1) a produção de esqueletos de calcite e/ou aragonite, por exemplo, por corais recifais; ou 2) a acumulação de conchas e carapaças produzidas por macro ou microorganismos.

- Fácies Conjunto de rochas com determinadas características distintivas, quer paleontológicas (fósseis), quer litológicas, considerando qualquer aspeto composicional, químico ou mineralógico, morfológico, estrutural ou textura (a forma, o tamanho, a disposição dos seus grãos e a sua composição de minerais), que ajudem a conhecer onde e quando se formou a rocha.
- Fauna alóctone fauna que não é típica do lugar onde existe. Em paleontologia, as faunas alóctones são interpretadas como tendo sido sujeitas a transporte e posterior deposição num ambiente diferente daquele em que os animais habitavam quando estavam vivos.
- Fauna termófila fauna típica de águas quentes; normalmente está associada a climas tropicais.
- Filão basáltico Corpo de rocha basáltica, de forma tabular, que atravessa rochas adjacentes ou que corta formações rochosas maciças.
- Foraminíferos São organismos unicelulares, podendo ter um ou mais núcleos. Este animais segregam uma concha que é composta por carbonato de cálcio e por outros compostos inorgânicos, como sílica e sulfato de magnésio. Algumas espécies vivem dentro de conchas com uma única câmara, sendo designadas como uniloculares, mas a maior parte dos foraminíferos são multiloculares, ou seja, vivem em conchas que possuem várias câmaras. Por fora da concha estendem-se os pseudopódios, que são filamentos protoplasmáticos usados na locomoção, fixação ao substrato e alimentação.
- Fóssil Todo e qualquer vestígio identificável, corpóreo ou de atividade orgânica, de organismos do passado, conservado em contextos geológicos, isto é, nas rochas (do latim fossile, fossu, cavado, retirado do chão cavando). Tipos básicos de fósseis: somatofósseis e icnofósseis.

Frente Polar – corresponde à fronteira entre a célula polar e a célula de Ferrel, em cada hemisfério.

- Gastrópodes Constituem o grupo de moluscos mais numeroso e diversificado. A maioria dos gastrópodes apresenta uma concha univalve, achatada ou espiralada, no interior da qual se aloja a massa visceral. Apesar de algumas espécies serem terrestres, a maioria é aquática, principalmente marinha.
- Hialoclastitos Amálgama de sedimento marinho e partículas de rocha que resultam da fragmentação e vitrificação rápida da superfície da lava por arrefecimento brusco, quando esta entra em contacto com água do mar/sedimento marinho saturado em água, ou com gelo.
- Icnofóssil Fóssil de vestígio de actividade vital (isto é, de actividade biológica) de organismos do passado (do grego icnós, traço, vestígio + fóssil). Por exemplo, são icnofósseis os fósseis (mineralizações, incarbonizações ou moldes) de pegadas, de pistas de deslocação, de marcas de dentadas, de excrementos, de ovos, de túneis e de galerias de habitação, etc.
- Icnogénero Agrupa icnofósseis de espécies com características semelhantes.

- Intertidal Designação atribuída à zona do substrato litoral que fica exposta ao ar durante a baixa-mar e submersa durante a preia-mar (zona entre-marés).
- Laminação cruzada Estrutura sedimentar formada por lâminas ou camadas que se cruzam e truncam em ângulos, tendo sido depositadas no decurso de um processo contínuo de sedimentação, e sem a ocorrência de discordância.
- Lapilli Piroclastos com dimensão máxima entre os 2 e os 64 mm. Nos Açores, são conhecidos por "bagacina".
- Lavas-em-almofada morfologias formadas pela efusão de derrames lávicos em ambiente subaquático, originados por erupções submarinas ou pela entrada na água de derrames lávicos provenientes de erupções subaéreas. Esta denominação deve-se à sua secção aproximadamente esférica ou cilíndrica, semelhante a almofadas. As lavas-em-almofada podem encontrar-se numa enorme variedade de formas incluindo bolbosas, esféricas, achatadas, alongadas e tubulares, e variam em diâmetro de várias dezenas de centímetros a vários metros.
- Litificação Processo através do qual os materiais não coesos (sedimentos), se transformam em rocha consolidada. Esta transformação compreende diversos fenómenos, tais como, a desidratação dos sedimentos, compactação e cimentação.
- Marcas onduladas Formas do fundo em sedimento arenoso ou argiloso, provocadas por correntes fluviais, marinhas, eólicas ou de ondulação (ripple marks). Têm forma de duna, apresentam ritmicidade e podem ser simétricas ou assimétricas. Muitas vezes as marcas de ondulação são preservadas no sedimento durante os processos de litificação (diagénese), facilitando a determinação da polaridade das camadas sedimentares, bem como, a direção da corrente que as gerou.
- Matriz conjunto de minerais de uma rocha no seio dos quais se encontram os constituintes de maiores dimensões (fenocristais, no caso de rochas ígneas).
- Moluscos Constituem um grande grupo de animais invertebrados, presentes no meio marinho, dulçaquícola ou terrestre. Possuem um corpo mole e não-segmentado, constituído tipicamente por uma cabeça anterior, um pé ventral e uma massa visceral dorsal. O corpo é normalmente coberto por um manto fino, carnudo e em regra protegido por uma concha externa. A maior parte dos moluscos são aquáticos, mas existem muitas formas terrestres.
- Neogénico período geológico pertencente à era Cenozóica do éon Fanerozóico com uma duração de 20,442 Ma (milhões de anos). Teve o seu início há cerca de 23,03 Ma, quando se iniciou o Miocénico, e terminou no final do Pliocénico, há 2,588 Ma.
- Nível de base das ondas de tempestade Profundidade a partir da qual o efeito das ondas deixa de se sentir no fundo, ou seja, os sedimentos do fundo já não são postos em suspensão na coluna

de água e, portanto, já não podem ser transportados por correntes de fundo, sejam estas geradas por ondas, por marés, ou por outro tipo de fenómeno. Em contraste, entre a linha de costa e esse nível de base, os sedimentos são postos em suspensão sempre que ocorrem. Essa profundidade é variável de local para local, consonte a altura média das ondas atingida durante as tempestades e o tamanho médio das partículas que constitutem o sedimento. Desta forma, e à mesma profundidade, partículas maiores necessitam de ondas maiores para serem postas em suspensão, do que partículas de menor dimensão.

Olivinas – grupo de minerais formados por silicatos de magnésio e ferro.

- Oólito Partícula esférica do tamanho de um grão de areia (entre 0,25 a 2 mm de diâmetro), que se forma por precipitação química em torno de um núcleo. Este, pode ter diferentes origens, desde um fragmento de uma concha a um fragmento mineral, em torno do qual vai precipitando em camadas concêntricas, outro material (carbonato, sílica, fosfato, etc.). Os oólitos formam-se em águas agitadas e pouco profundas e a sua forma esférica assemelha-os a ovas de peixe. Os calcários compostos por oólitos denominam-se calcários oolíticos.
- Ostrácodes São crustáceos de reduzida dimensão, com o corpo lateralmente comprimido e dotados de uma concha calcária ou quitinosa composta por duas valvas. Podem ser encontrados em ambientes aquáticos de água doce, salobra e até marinhos. Geralmente, os ostrácodes são bentónicos. A maioria são detritívoros, alimentando-se de matéria orgânica em decomposição.
- Palagonitização Alteração de rochas basálticas num tipo de argila a Palagonite que se forma através da hidratação das partículas vítreas formadas durante uma erupção hidromagmática.
- Paleontologia Ciência natural que estuda a vida do passado da Terra e seu desenvolvimento ao longo do tempo geológico, bem como os processos de integração da informação biológica no registo geológico.
- "Pillow-lavas" ver Lavas-em-almofada.
- Piroclastos Designação utilizada em geologia para classificar os fragmentos de lava ou rocha sólida que são expelidos para o ar pela erupção de um vulcão. Petrologicamente, os piroclastos são fragmentos de lava, solidificados em algum momento da erupção, ou mais frequentemente durante o seu percurso aéreo, ou arrancados e transportados no estado sólido por abrasão do material geológico existente ao longo das condutas eruptivas. Podem ter várias dimensões, variando desde a cinza vulcânica às bombas ou blocos.
- Placas tectónicas Porção da litosfera limitada por zonas de subducção, zonas de convergência, e zonas conservativas. As placas tectónicas são criadas nos riftes (zonas de divergência), e são consumidas nas zonas de subducção. A grande maioria dos terremotos e erupções vulcânicas

ocorrem nas zonas de fronteira entre placas tectónicas. Atualmente são reconhecidas 55 placas tectónicas, 15 principais e 40 de menores dimensões.

- Plagioclases Minerais constituintes da crosta terrestre e que pertencem à denominada "série da plagioclase", uma família de minerais de feldspatos plagioclásicos, com extremos entre a albita e a anortita.
- Planctotrófico Diz-se do tipo de desenvolvimento embrionário de invertebrados marinhos associado a uma larva com uma duração prolongada na coluna de água, variável entre semanas a meses, e em que esta larva se alimenta durante o tempo em que permanece na coluna de água.
- Pliocénico época final do período Neogénico, com uma duração de cerca de 2,745 Ma (milhões de anos). Teve o seu início há 5,333 Ma e terminou há 2,588 Ma. Divide-se nos estágios Zancliano (5,333 a 3,600 Ma) e Piacenziano (3,600 a 2,588 Ma).
- "Ponto húmido" local do planeta onde ocorre a presença de vulcanismo cuja origem não consegue ser explicada dentro do paradigma da tectónica de placas, sendo essa origem, alternativamente, interpretada como fusão mantélica localizada, resultante da presença anormalmente alta de voláteis no manto terrestre, o que leva ao abaixamento do ponto de fusão das rochas que compõe o manto superior, gerando os magmas que alimentam esse vulcanismo.
- "Ponto quente" local do planeta onde ocorre a presença de vulcanismo cuja origem não consegue ser explicada dentro do paradigma da tectónica de placas, sendo essa origem, alternativamente, interpretada como fusão mantélica localizada resultante da presença de uma anomalia térmica, gerando assim os magmas que alimentam esse vulcanismo. A presença dessa anomalia térmica, por sua vez, é geralmente interpretada como resultante da acção de uma pluma mantélica, isto é, a ascensão colunar de material quente das zonas mais profundas do manto terrestre.
- Quaternário período do Cenozóico que engloba o Plistocénico (2,58 a 0,0117 milhões de anos) e o Holocénico (117.000 anos até à atualidade).
- Regressão Fenómeno de recuo progressivo do mar sobre áreas terrestres, levando à emersão, em consequência da descida do nível do mar, do soerguimento do continente/ilha ou pelo movimento vertical relativo de ambos.
- Rodólitos estruturas construídas por algas vermelhas calcárias (Corallinales, Rhodophyta), não articuladas, que vivem exclusivamente em meio marinho, desde as latitudes equatoriais até as polares, entre a zona de marés e profundidades máximas inferiores a 300 m. Estas algas produzem estruturas esféricas que se formam em resultado do seu crescimento subcircunferencial. Podem, ou não, ter um núcleo constituído por um seixo, uma concha, ou outro tipo de material propício ao assentamento e posterior crescimento dos propágulos da alga.

- Sedimento Material resultante da degradação de rochas pré-existentes, de restos de organismos ou de precipitação química depositado à superfície da terra. Os sedimentos são constituídos por fragmentos de rocha e partículas minerais de variados tamanhos, restos vegetais ou animais (ossos ou carapaças), bem como, o resultado de precipitação química ou da evaporação, numa bacia.
- Sistema sedimentar retrogradacional Sistema sedimentar associado a uma transgressão, motivado por exemplo, pela subida do nível do mar local, em que a linha de costa se movimenta continente adentro, assim como a respectiva sedimentação marinha costeira.
- Sistema sedimentar progradacional Sistema sedimentar associado a uma tendência regressiva, como a gerada por descida do nível médio local da água do mar, com deslocamento da linha de costa, assim como a respectiva sedimentação costeira terrígena, no sentido do mar aberto.
- Taxa Termo normalmente utilizado pelos biólogos para designar uma ou várias espécies, quando algumas delas só foram identificadas e classificadas até ao género.
- Terminação (glacial) Intervalo de tempo de curta duração entre o final de uma glaciação e o início do período interglacial subsequente. Durante uma Terminação, o nível médio das águas do mar aumenta de forma abrupta; na última Terminação, subiu 120 a 130 m em somente 6.000 anos.
- Transgressão Fenómeno de avanço progressivo do mar sobre áreas terrestres, levando à submersão, em consequência da subida do nível do mar, da subsidência do continente/ilha ou pelo movimento vertical relativo de ambos.
- Tufo Depósito vulcânico primário, direto, formado pela queda de produtos vulcânicos, mesmo que através da coluna de água.
- Tufito Depósito vulcânico secundário, remobilizado (por correntes, ondulação, etc.), passando, assim, a ser um depósito sedimentar e, portanto, um tufito.

Upwelling – Também conhecido, em português, por "ressurgência" ou "afloramento costeiro". Corresponde a um fenómeno oceanográfico em que, num determinado local, ocorre o transporte de águas localizadas a maiores profundidades, logo mais frias, para a superfície do oceano, devido ao movimento horizontal de massas de água à superfície, o qual é induzido pelo vento. As zonas de upwelling possuem, geralmente, uma elevada produtividade primária, devido aos nutrientes que são trazidos para a superfície.