



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Renata Marins Alvim Gama

Caracterização do evento climático MTPE (Máximo Termal do Paleoceno-Eoceno) nas Bacias de Mucuri e Espírito Santo à margem leste brasileira e sua possível relação com o magmatismo de Abrolhos

Rio de Janeiro

2020

Renata Marins Alvim Gama

Caracterização do evento climático MTPE (Máximo Termal do Paleoceno-Eoceno) nas Bacias de Mucuri e Espírito Santo à margem leste brasileira e sua possível relação com o magmatismo de Abrolhos

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias.

Orientador: Prof. Dr. Egberto Pereira

Rio de Janeiro

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

G184 Gama, Renata Marins Alvim.
Caracterização do evento climático MTPE (Máximo Termal do Paleoceno-Eoceno) nas Bacias de Mucuri e Espírito Santo à margem leste brasileira e sua possível relação com o magmatismo de Abrolhos. / Renata Marins Alvim Gama – 2020.
211 f. : il.

Orientador: Egberto Pereira.
Tese (Doutorado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Geologia estratigráfica – Mucuri, Rio, Bacia – Paleoceno – Teses. 2. Solos vulcânicos– Abrolhos, Arquipélago dos (BA) – Eoceno– Teses. 3. Estruturas sedimentares – Teses. 4. Carbono – Isótopos – Teses. 5. Geoquímica orgânica – Teses. I. Pereira, Egberto. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. IV. Título.

CDU 551.243.1

Bibliotecária responsável: Fernanda Lobo / CRB-7: 5265

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Renata Marins Alvim Gama

Caracterização do evento climático MTPE (Máximo Termal do Paleoceno-Eoceno) nas Bacias de Mucuri e Espírito Santo à margem leste brasileira e sua possível relação com o magmatismo de Abrolhos

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de bacias e faixas móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de bacias.

Aprovada em 22 de dezembro de 2020.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Egberto Pereira
Faculdade de Geologia – UERJ

Prof. Dr. René Rodrigues
Faculdade de Geologia – UERJ

Prof. Dr. Miguel Angelo Mane
Faculdade de Geologia – UERJ

Prof. Dr. Emanuele Francesco La Terra
Observatório Nacional

Dra. Renata Moura de Mello
Petróleo Brasileiro S/A

Rio de Janeiro

2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família: mãe (Ana), pai (Paulo) e irmã (Vanessa).

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Dr. Egberto Pereira, pelas contribuições neste trabalho, pelos debates, pelas ideias, por compartilhar seu conhecimento e pela credibilidade conferida na hipótese da pesquisa.

Ao professor Dr. René Rodrigues por ter compartilhado sua experiência e conhecimento sobre geoquímica e ter contribuído no debate desta tese.

Ao geólogo da Petrobras, Dr. Leonardo Oliveira, pela disponibilidade em trocar conhecimentos e dialogar acerca do tema da tese

Aos amigos de departamento, trabalho e de vida, que deixam a rotina mais leve e agradável: Luzia, Dino e Helena.

Ao coordenador do laboratório de Sismoestratigrafia, pelos esforços engendrados para manter o funcionamento do mesmo, inclusive com a licença dos softwares usados nessa pesquisa: prof. Dr. Sérgio Bergamaschi.

Ao professor Dr. Marcelo Salomão por me auxiliar na compreensão dos dados geofísicos não-sísmico.

A todos e todas que trabalham e coordenam os laboratórios: laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica orgânica (LGQM) e Laboratório Geológico de Preparação de amostras (LGPA).

Ao programa de pós-graduação em análise de bacias e faixas móveis (agora chamado de programa de pós-graduação em geociências), em especial os coordenadores e secretárias: Marianni e Juçara.

Às geólogas mestrandas e contemporâneas no Laboratório de sismoestratigrafia: Ana Carolina, Luana, Cássia e Tamila. Foram importantes nessa caminhada, me forneceram um grande suporte no manejo com o software usado nesta pesquisa, além de darem incentivo, amizade e parceria fundamental no trabalho e para além dele.

Aos demais que vieram depois e frequentaram o Laboratório de sismoestratigrafia e que estiveram sempre disponíveis em ajudar neste trabalho, contribuindo de diversas formas, não só na geologia, mas com apoio emocional e mental: Felipe, Gabriela, Luciana, Suelen, Talissa, Vinícius e Vitor.

E a todos os amigos de militância da Uerj, que estiveram juntos comigo, em momentos difíceis, principalmente em 2016/2017 e atualmente, lutando por uma

Universidade pública de excelência, contra governos austeros que objetivaram a sua destruição. Em especial: Cleier, Frederico Passeri, Frederico Irias, Dario, Amanda, Nívea, Mira, Beatriz e Otávio.

A história da ciência é de longe o mais bem-sucedido conhecimento acessível aos humanos - ensina que o máximo que podemos esperar é um aperfeiçoamento sucessivo de nosso entendimento, um aprendizado por meio de nossos erros, uma abordagem assintótica do Universo, mas com a condição de que a certeza absoluta sempre nos escapará.

Carl Sagan

Não aceites o habitual como coisa natural, pois em tempo de desordem sangrenta, de confusão organizada, de arbitrariedade consciente, de humanidade desumanizada, nada deve parecer natural, nada deve parecer impossível de mudar.

Bertolt Brecht

Nós, a humanidade, vamos viver em ambientes artificiais produzidos pelas mesmas corporações que devoraram florestas, montanhas e rios.

Ailton Krenak

RESUMO

GAMA, Renata Marins Alvim. *Caracterização do evento climático MTPE (Máximo Termal do Paleoceno-Eoceno) nas Bacias de Mucuri e Espírito Santo à margem leste brasileira e sua possível relação com o magmatismo de Abrolhos*. 2020. 211 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Essa tese relacionou o evento climático de aquecimento global registrado no Paleoceno/Eoceno (MTPE – Máximo Termal do Paleoceno Eoceno) ao magmatismo do Complexo Vulcânico de Abrolhos (CVA). Para tal, foram usadas ferramentas sísmicas, magnetométricas, dados de poços, dados geoquímicos e isotópicos. Na região nordeste da bacia foi identificada uma feição circular associada a um lacólito do CVA. Outras feições circulares foram interpretadas na área, descritas como: domo de sal, cones de escape de fluidos e dobra forçada. A atividade ígnea foi associada à formação do proeminente domo de sal na região central da área (extensão de ~3km), devido ao calor fornecido pela intrusão, considerando que as rochas ígneas foram encaixadas na base e dentro da camada de sal, ou pelo princípio de flutuabilidade, decorrente do peso das rochas ígneas. Por meio da datação indireta, baseada em relações estratigráficas, mais especificamente no preenchimento em *onlap*, foi proposta uma idade Neogena para o fim da atuação da estrutura dômica, indicando que a atividade do CVA pode ter ocorrido em idades muito mais recentes do que aquelas já descritas. Com base nas relações estratigráficas e dados litológicos, indica-se que os cones de escape de fluidos foram formados a partir de processo de degaseificação devido à intrusão de rochas ígneas nos folhelhos ricos em matéria orgânica. A atividade hidrotermal se deu no intervalo do MTPE. Por meios dos dados de $\delta^{13}\text{C}_{\text{COT}}$, associado à bioestratigrafia, foi identificada a anomalia CIE, que marca a passagem do Paleoceno/Eoceno. Os dados geoquímicos mostraram que houve a liberação de $0,09 \times 10^{18}\text{g}$ (ou 0,09 Eg ou 0,09 Tt) de metano para atmosfera em decorrência das intrusões ígneas na área de estudo. Por meio do balanço de massa foi alcançado o valor de $3,4 \times 10^{18}\text{g}$ como necessários para haver a formação da anomalia de -2,9‰, que foi registrada no poço 1-BRSA-819A-ESS. Embora o valor calculado de metano liberado seja menor do que o que seria necessário para formação da anomalia CIE, a área estudada é bem menor do que toda a zona de abrangência do CVA. Sendo assim, há a possibilidade de a quantidade de metano exalado ter sido de aproximadamente 300 vezes maior. Ou seja, um valor considerável que pode ter contribuído, junto com as outras bacias do Atlântico Norte, na liberação de gás de efeito estufa à atmosfera e formação do evento hipertermal: MTPE.

Palavras-chave: Complexo Vulcânico de Abrolhos. Máximo Termal do Paleoceno Eoceno.

Cones de escape de fluidos. Interpretação sísmica. Geoquímica Orgânica.

Isótopos do Carbono da matéria orgânica.

ABSTRACT

GAMA, Renata Marins Alvim. *Characterization of the climatic event PETM (Paleocene Eocene Thermal Maximum) in the Mucuri and Espírito Santo Basins on the Eastern Brazilian Margin and its possible relationship with the Abrolhos magmatism*. 2020. 211 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

This work related the global warming event that occurred roughly 56 million years ago (PETM – Paleocene–Eocene Thermal Maximum) with the magmatism in the Abrolhos volcanic complex (AVC). For that purpose, seismic and magnetometric techniques, well and isotopic geochemical data have been used. In the northeast part of the basin circular structures were identified and interpreted as the laccolith of the AVC. An interpretation of other circular structures, such as salt dome, hydrothermal vents complexes, and forced fold was carried out. The salt dome occurs in the central part of the area, and it is characterized by its magnificence. It is about ~3 km long. The formation of the salt dome was associated with an igneous activity because of the presence of the intrusive rocks into the salt layer and in the base; or because of the forces of buoyancy, caused by the weight of the igneous rocks. By utilizing indirect dating, based on stratigraphic relationships, more specifically in filling in onlap, it was possible to assume a Neogene period for the end of the action of the dome structure. This assumption indicates that the AVC activity may have occurred at much more recent ages than those already described. According to the stratigraphic relations and lithological data, the hydrothermal vents complexes were formed from the process of degassing due to the intrusion of igneous rocks in shales rich in organic matter. The hydrothermal activity occurred in the PETM interval. Using the $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$, associated with biostratigraphy, the CIE anomaly was identified, which marks the passage of the Paleocene / Eocene. The geochemical dates indicated that there was a release of the $0.09 \times 10^{18}\text{g}$ (or 0.09 Eg or 0.09 Tt) of the methane into the atmosphere due to igneous intrusions in the study area. By means of the isotopic mass balance, the value of the $3.4 \times 10^{18}\text{g}$ was obtained and it was necessary for the -2.9 ‰ anomaly to form, which was recorded in well 1-BRSA-819A-ESS. Although the calculated value of methane released is lower than what it would be necessary for the formation of the CIE anomaly, the area studied is much smaller than the entire CVA coverage area. Therefore, there is a possibility that the amount of methane exhaled was approximately 300 times greater. That is a considerable amount that may have contributed, together with the other North Atlantic basins, to the release of greenhouse gas into the atmosphere and the formation of the hyperthermal event PETM.

Keywords: Abrolhos volcanic complex. Paleocene–Eocene Thermal Maximum.

Hydrothermal vent complexes. Seismic interpretation. Organic Geochemical.

Carbon isotopic of organic matter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Localização das bacias do Espírito Santo e Mucuri.....	19
Figura 2 -	Carta estratigráfica da Bacia de Mucuri com as unidades litoestratigráficas.....	21
Figura 3 -	Empilhamento estratigráfico das litologias da Bacia do Mucuri com as separações em supersequências.....	22
Figura 4 -	Carta estratigráfica da Bacia do Espírito Santo com as unidades litoestratigráficas.....	23
Figura 5 -	Empilhamento estratigráfico das litologias da Bacia do Espírito Santo com as separações em supersequências.....	24
Figura 6 -	Mapa de ocorrência das rochas ígneas do Complexo vulcânico de Abrolhos (CVA).....	29
Tabela 1 -	Tabela mostrando as várias idades para o Complexo Vulcânico de Abrolhos (CVA), desde o Paleoceno inferior ao Oligoceno inferior, ou seja, ao longo de boa parte do Paleogeno.....	31
Figura 7 -	Perfil geológico esquemático da região do arquipélago dos Abrolhos.....	32
Figura 8 -	Anomalias isotópicas do $\delta^{13}\text{C}$ e do $\delta^{18}\text{O}$ apresentadas nas curvas de Kennett e Stott (1991).....	35
Figura 9 -	Mapa com a localização dos locais onde foram feitos estudos do MTPE....	36
Figura 10 -	Localização do cubo sísmico da Bacia de Mucuri.....	52
Figura 11 -	Localização do cubo sísmico do Espírito Santo	53
Figura 12 -	Localização, na Bacia do Espírito Santo, dos poços em que foram feitas as análises geoquímicas	54
Figura 13 -	Fragmento do perfil composto do poço 1-BAS-117-BA onde se encontra o intervalo com a rocha ígnea e o carbonato, além disso, a discordância do Eoceno Inferior, correlacionável com o evento MTPE.....	57
Figura 14 -	Legenda dos códigos das litologias usadas no perfil composto.....	57
Figura 15 -	Fragmento do perfil composto do poço 1-BAS-119-BA onde se encontra o intervalo da rocha ígnea e as discordâncias.....	59
Figura 16 -	Fragmento do perfil composto do poço 1-BRSA-85-BAS onde se encontra o intervalo com a rocha ígnea e de carbonatos.....	60

Figura 17 -	Fragmento do perfil composto do poço 1-BAS-1-BA onde se encontra o intervalo com as rochas ígneas que se encontram abaixo das discordâncias do pré-Eoceno superior (DPES) e Eoceno Inferior (DEI).....	61
Figura 18 -	Mapa de localização dos poços 1-BAS-117-BA, 1-BAS-119-BA, 1-BRSA-85-BAS e 1-BAS-1-BA, dentro do cubo sísmico, na Bacia de Mucuri.....	62
Figura 19 -	Na parte central, entre as duas linhas sísmicas da inline 485, localiza-se o sismograma sintético do poço 1BAS-117-BA.....	64
Figura 20 -	Amarração e sismograma sintético do poço 1BAS-119-BA.....	65
Figura 21 -	Amarração e sismograma sintético do poço 1BAS-01-BA.....	65
Figura 22 -	Amarração e sismograma sintético do poço 1BRSA 085 BA.....	66
Figura 23 -	Correlação dos 4 poços da Bacia de Mucuri.....	77
Figura 24 -	Esquema mostrando as geometrias das fácies de soleiras.....	79
Figura 25 -	Ilustração esquemática em “3D” do que seria um de sistema de “canalização” vulcânico/magmático.....	79
Figura 26 -	Expressão sísmica das superfícies interpretadas com as suas respectivas descrições.....	81
Figura 27 -	Mapa 3D e 2D da superfície do topo do embasamento.....	83
Figura 28 -	Linha sísmica representada pela <i>Inline</i> 485 registrando o domo de sal.....	85
Figura 29 -	Linha arbitrária, com dois poços amarrados, mostrando a variação lateral da camada evaporítica o que evidencia seu o caráter deformado.....	88
Figura 30 -	Mapa do topo da sequência evaporítica.....	89
Figura 31 -	Time slice de 1000 ms com o atributo RMS.....	90
Figura 32 -	Linha sísmica <i>Xline</i> 1000 do cubo sísmico da Bacia de Mucuri.....	92
Figura 33 -	Linha sísmica <i>Inline</i> 905 do cubo sísmico da Bacia de Mucuri.....	93
Figura 34 -	Linha 2D com o atributo <i>reflection intensity</i>	94
Figura 35 -	Superfície gerada pelo mapeamento da Discordância do Eoceno Inferior...	95
Figura 36 -	Linha sísmica <i>Xline</i> 1000.....	97
Figura 37 -	Linha sísmica (<i>xline</i> 890) com atributo <i>sweetness</i>	98
Figura 38 -	Linha sísmica 2D que mostra o a quebra de relevo, associado ao anticlinal Parcel das Paredes.....	99
Figura 39 -	Superfície gerada pelo mapeamento da DPES.....	100
Figura 40 -	Perfil composto e histogramas de velocidade (Vp) do poço 1-BAS-119-	102

	BA.....	
Figura 41 -	Inline 170 não interpretada e interpretada	104
Figura 42 -	Fragmento do perfil composto do poço 1-BAS-119-BA com os histogramas das rochas ígneas 1 e 2.....	107
Figura 43 -	Fragmento do perfil composto do poço 1-BAS-119-BA com os histogramas da rocha ígnea 3.....	108
Figura 44 -	Fragmento do perfil composto do poço 1-BAS-119-BA com os histogramas da rocha ígnea 4.....	109
Figura 45 -	Fragmento do perfil composto do poço 1-BAS-117-BA com o histograma da rocha ígnea.....	110
Figura 46 -	Fragmento do perfil composto do poço 1-BRSA-85-BAS com o histograma da rocha ígnea.....	110
Figura 47 -	Fragmento do perfil composto do poço 1-BAS-01-BA com os histogramas das rochas ígneas 1, 2, 3 e 4.....	111
Figura 48 -	Fragmento do perfil composto do poço 1-BAS-01-BA com os histogramas das rochas ígneas 5, 6, 7 e 8.....	112
Figura 49 -	Fragmento do perfil composto do poço 1-BAS-01-BA com os histogramas das rochas ígneas 9, 10 e 11.....	113
Figura 50 -	Linha sísmica crossline 890 em dado de amplitude	115
Figura 51 -	Linha sísmica <i>crossline</i> 896 em dado de amplitude (à esquerda) e com o atributo TecVa (à direita).....	116
Figura 52 -	Linha sísmica (Inline 958) onde é dado um zoom na região de ocorrência do complexo de soleiras.....	118
Figura 53-	Linha sísmica 2D (0231-Mucuri Central 8A.0231-0680) com o atributo sísmico <i>reflection intensity</i>	119
Figura 54 -	Mapa base do topo do embasamento.....	120
Figura 55 -	Linha sísmica 2D perpendicular a linha de costa.....	122
Figura 56 -	A mesma linha sísmica 2D da figura anterior, com o atributo <i>Sweetness</i>	123
Figura 57 -	Linha sísmica transversal a linha de costa (Inline 608).....	124
Figura 58 -	Linha sísmica 2D (0231 MUCURI CENTRAL 8A.0231-0735) onde foi mapeado outro dique na área de estudo.....	125
Figura 59 -	Desenho esquemático, com um exemplo na linha sísmica, de um conduto hidrotermal.....	127

Figura 60 -	Complexo hidrotermal na área de estudo.....	129
Figura 61 -	<i>Timeslice</i> de 1284 milissegundos com o atributo <i>sweetness</i>	129
Figura 62 -	Mapa da superfície do topo dos condutos hidrotermais.....	130
Figura 63 -	Conduto hidrotermal com o atributo <i>sweetness</i> e sua localização no mapa do topo do embasamento.....	130
Figura 64 -	Mapa magnetométrico de campo total.....	131
Figura 65 -	Mapa magnetométrico usando o filtro de amplitude do sinal analítico (ASA).....	133
Figura 66 -	Mapa com o filtro de primeira derivada (Dz).....	134
Figura 67 -	Mapa magnetométrico com a aplicação do filtro de deconvolução de Euler.....	135
Figura 68 -	Perfil litológico, raios-gama e de dados geoquímicos de Carbono Orgânico Total (COT), Resíduo Insolúvel (RI) e Enxofre (S), e Isótopo estável do Carbono da matéria orgânica ($\delta^{13}\text{C}$) do poço 1-BRSA-819A-ESS	137
Figura 69 -	Perfil litológico, raios-gama e de dados geoquímicos de Carbono Orgânico Total (COT), Resíduo Insolúvel (RI) e Enxofre (S), e Isótopo estável do Carbono da matéria orgânica ($\delta^{13}\text{C}$) do poço 4-BRSA-530-ESS	139
Figura 70 -	Perfil litológico, raios-gama e de dados geoquímicos de Carbono Orgânico Total (COT), Resíduo Insolúvel (RI) e Enxofre (S), e Isótopo estável do Carbono da matéria orgânica ($\delta^{13}\text{C}$) do poço 6-BRSA-486-ESS	141
Figura 71 -	Perfil litológico do poço 1-BRSA-819A-ESS com os dados geoquímicos de COT e pirólise (Picos S1, S2, S3, Tmax, IH e IO).....	145
Figura 72 -	Classificação da evolução térmica da matéria orgânica usando o diagrama do tipo Van Krevelen (BROOKS, 1981; ESPITALIÉ et al. 1985) para o poço 1-BRSA-819A-ESS	146
Figura 73 -	Perfil litológico do poço 4-BRSA-530-ESS com os dados geoquímicos de COT e pirólise (Picos S1, S2, S3, Tmax, IH e IO).....	147
Figura 74 -	Perfil litológico do poço 6-BRSA-486-ESS com os dados geoquímicos de COT e pirólise (Picos S1, S2, S3, Tmax, IH e IO).....	149
Figura 75 -	Elementos do CIE no poço 1-BRSA-819A-ESS.....	151
Figura 76 -	Elementos do CIE no poço 4-BRSA-530-ESS	154
Figura 77 -	Elementos do CIE no poço 6-BRSA-486-ESS	155

Tabela 2 -	Fases identificadas do CIE no poço 6-BRSA-486-ESS, o único que apresentou todas as fases.....	156
Figura 78 -	Curvas dos teores de Carbono Orgânico Total (COT) e dados isotópicos...	157
Figura 79 -	Linha sísmica que passa no poço 1-BRSA-819A-ESS.....	160
Figura 80 -	Unidades quimioestratigráficas nos poços 4-BRSA-530-ESS e 1-BRSA-819A-ESS.....	162
Figura 81 -	<i>Time slice</i> no tempo 1132 ms utilizando o atributo <i>variance</i>	166
Figura 82 -	<i>Time slice</i> no tempo 1000 ms utilizando o atributo RMS.....	166
Figura 83 -	Linha sísmica 2D na porção nordeste da área com o atributo TecVa ressaltando os refletores de mais alta amplitude, que apresenta contraste de impedância positivo.....	167
Figura 84 -	Imagem sísmica mostrando o núcleo do vulcão.....	168
Figura 85 -	Linha sísmica 2D regional mostrando os domos.....	173
Figura 86 -	Estrutura dômica presente na porção nordeste da área, identificada por meio da linha sísmica 2D (0231Mucuri Central 8A.0231-0686).....	174
Figura 87 -	Linha sísmica 2D em dado de amplitude.....	177
Figura 88 -	Eventos magmáticos que ocorreram na margem leste brasileira.....	178
Figura 89 -	Mapa com a localização das quatro estruturas dômicas interpretadas na área de estudo	179

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	15
1	CONTEXTO GEOLÓGICO	20
1.1	Complexo Vulcânico de Abrolhos (CVA)	27
1.2	Máximo Termal do Paleoceno-Eoceno – MTPE	33
2	MATERIAIS E MÉTODOS	52
2.1	Dados Geofísicos	54
2.1.1	<u>Dados petrofísicos e Geofísicos sísmicos</u>	55
2.1.2	<u>Dados Geofísicos não-sísmicos (Métodos potenciais – Magnetometria)</u>	66
2.2	Dados de geoquímica orgânica e de isótopos de carbono	69
3	RESULTADOS	76
3.1	Resultados dos dados petrofísicos e sísmicos (interpretação sismoestratigráfica)	76
3.1.1	<u>Topo do embasamento</u>	82
3.1.2	<u>Mapeamento da base e do topo das camadas evaporíticas</u>	84
3.1.3	<u>Mapeamento da Discordância do Eoceno Inferior (DEI)</u>	90
3.1.4	<u>Mapeamento da Discordância Pré-Eoceno Superior (DPES)</u>	95
3.1.5	<u>Mapeamento das rochas ígneas</u>	104
3.1.6	<u>Conduitos de escape de fluido e gás</u>	126
3.2	Resultados dos dados geofísicos não-sísmicos	131
3.3	Resultados dos dados geoquímicos	135
4	DISCUSSÕES	150
4.1	Anomalia CIE e a caracterização do MTPE na área de estudo	150
4.2	Relações entre os teores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{COT}}$ com os dados geoquímicos	158
4.3	Caracterização do Complexo Vulcânico de Abrolhos (CVA) na área de estudo	165
4.4	Relações entre a anomalia CIE e o CVA	179
4.5	Correlação do MTPE com o Antropoceno	187
	CONCLUSÕES	189
	REFERÊNCIAS	193

INTRODUÇÃO

O evento MTPE (Máximo Termal do Paleoceno-Eoceno) é um catastrófico fenômeno de rápido aquecimento global, associado com uma mudança ambiental, que ocorreu no limite do Paleoceno/Eoceno, há aproximadamente 56 milhões de anos atrás (e.g. KENNETT e STOTT 1991; ZACHOS et al. 1993, THOMAS e SHACKLETON 1996, MURPHY et al. 2010, ZEEBE et al. 2014, SVENSEN et al. 2019). Durante esse fenômeno, mundialmente houve uma elevação da temperatura das águas de 13/14°C para ~21°C, sendo considerado pelos autores como provavelmente o momento mais quente do Cenozoico.

O MTPE é caracterizado principalmente: pela grande entrada de carbono no ciclo exógeno do carbono, gerando uma anomalia negativa do $\delta^{13}\text{C}$ (*Carbon isotopic excursion - CIE*) (e.g. ZACHOS et al., 2001 e 2005); pelo evento de extinção dos foraminíferos bentônicos (*benthic foraminiferal extinction event - BEE*) (e.g. THOMAS, 1989, THOMAS, 1990; SPEIJER et al., 2012) e pela acidificação dos oceanos (*Ocean acidification - OA*) (e.g. ZACHOS et al., 2005).

O *CIE* representa uma dramática redução nos valores isotópicos do $\delta^{13}\text{C}$ na ordem de ~ -2 a -4‰, de causa ainda desconhecida, mas com registro em várias partes do mundo (e.g. KENNETT e STOTT, 1991; BRALOWER et al., 1995; KATZ et al., 1999). Algumas hipóteses buscam explicar as possíveis causas da origem da excursão negativa do $\delta^{13}\text{C}$ (anomalia *CIE*): eventos de liberação de metano dos hidratos de gás dos taludes continentais (assinatura do $\delta^{13}\text{C}$ de ~ -60‰) (e.g. KATZ et al., 2001; DICKENS et al., 1995); erosão e oxidação do Carbono de sedimentos marinhos devido a colisão Indiana-Asiática (assinatura do $\delta^{13}\text{C}$ do CO_2 de ~ -22‰) (BECK et al., 1995); queda de bólidos com entrada do ^{12}C de fora do planeta Terra (KENT et al., 2003), descongelamento e oxidação de pergelissolo (*permafrost*) de turfas (assinatura do $\delta^{13}\text{C}$ de ~ -30‰) (DECONTO et al. 2010); incêndios florestais globais generalizados (assinatura do $\delta^{13}\text{C}$ de ~ -22‰) (KURTZ et al., 2003) e o metamorfismo de contato gerado pela intrusão de rochas ígneas em pelitos ricos em matéria orgânica com liberação do metano para atmosfera através de condutos de escape de fluidos (*hydrothermal vents*) (assinatura do $\delta^{13}\text{C}$ do metano de ~ -60‰) (SVENSEN et al., 2004).

Ainda é controverso se o aquecimento global do limite do Paleoceno/Eoceno foi gerado pela emissão de gases de efeito estufa, principalmente na forma de CO_2 ou CH_4 , ou se o aquecimento precedeu e um desdobramento deste aquecimento foi o acionamento de

gatilhos (e.g. mudança na circulação de correntes oceânicas – Bralower et al., 1997) que provocaram a liberação de carbono (e.g. dos hidratos de gás – Dickens et al., 1995, Bralower et al., 1997) gerando a anomalia *CIE*. Cabe salientar que há um questionamento se o *CIE* seria a causa ou a consequência do aquecimento. Existe um debate sobre a possibilidade de que o aquecimento global no limite do Paleoceno/Eoceno esteja relacionado com ciclos orbitais. Assim, o aquecimento inicial não teria sido provocado pela emissão de gases de efeito estufa, mas sim pelos ciclos orbitais (LOURENS et al., 2005; DECONTO et al., 2010, ZACHOS et al., 2010, ZEEBE et al., 2017). A partir deste aquecimento inicial, gatilhos de liberação de gases de efeito estufa teriam sido acionados, provocando *feedbacks* positivos de sustentação de um clima mais quente (LOURENS et al., 2005; DECONTO et al., 2010).

De fato, apesar da intensidade e rapidez do início do aquecimento global MTPE, este evento não é marcado por um evento de extinção de massa generalizado (SPEIJER et al., 2012), exceto pela extinção dos foraminíferos bentônicos (*benthic foraminiferal extinction event - BEE*) do oceano profundo (e.g. THOMAS, 2007). Eles foram severamente afetados (30-50 % das espécies dos foraminíferos bentônicos foram extintas – Thomas, 2007), diferentemente dos foraminíferos planctônicos, que não foram extintos neste período, pelo contrário, tiveram um aumento na diversidade de algumas espécies (e.g. THOMAS, 1990; CLAY KELLY et al., 1996). Ocorre ainda o surgimento de espécies novas que viveram exclusivamente durante o MTPE (no intervalo de 50 e 100 mil anos) (CLAY KELLY et al., 1996). Durante o MTPE, alguns gêneros de ostracodes, típicos do ambiente marinho batial, desapareceram e foram substituídos por ostracodes oportunistas com forma generalista que persistiu por ~ 25-40 mil anos. Posteriormente, a fauna dos ostracodes foi recuperada, entretanto com espécies menores e/ou com a carapaça menos calcificada (STEINECK e THOMAS, 1996). Além disso, o limite do Paleoceno/Eoceno registra o aparecimento repentino e a migração de algumas ordens da classe *mammalia*, como os Artiodátilos (ex. cervos), Perissodátilos (ex. cavalos) e inclusive os primatas (KNOX, 1996; NOVACEK, 1999 e GINGERICH, 2006).

A liberação de metano, com a sua oxidação para CO₂ e posterior dissolução na água do mar é atribuído como um episódio que provocou a modificação da química da água no final do Paleoceno (ZACHOS et al., 2005). Neste sentido, houve uma diminuição do Ph da água do mar e um raseamento da lisoclina e da CCD (profundidade de compensação dos carbonatos). O que pode ser comprovado pela redução do peso dos carbonatos no limite do Paleoceno/Eoceno. O nível baixo de saturação dos carbonatos nos oceanos profundos

provavelmente impediu a calcificação dos organismos marinhos e assim pode ser considerado como um fato que potencialmente contribuiu para extinção em massa dos foraminíferos bentônicos no limite Paleoceno/Eoceno (ZACHOS et al., 2005).

As evidências do MTPE vêm sendo identificadas em diversas partes do globo, tanto na porção marinha (e.g. Groelândia – REYNOLDS et al. 2017; Noroeste da Europa – KNOX 1998; Noruega - SVENSEN et al. 2004; Paquistão – BECK et al. 1995; Oceano Pacífico Norte – BRALOWER et al., 1995; Oeste do Atlântico Norte – KATZ et al. 1999; New Jersey – EUA- AUBRY et al. 2000; Antártida – KENNETT e SLOTT et al. 1991; *Walvis Ridge*, Atlântico Sul - THOMAS e SHACKELTON, 1996, ZACHOS et al. 2005 e no Brasil por RODRIGUES 2005 e DE MELLO 2016), quanto continental (e.g. FRICKE et al. 1998). Portanto, ainda são poucos os estudos do MTPE no compartimento brasileiro do Oceano Atlântico Sul.

No Brasil, em especial nas bacias da margem sudeste há registro de magmatismo no final do Paleoceno e início do Eoceno, os quais são notáveis diversas construções vulcânicas e subvulcânicas (soleiras e diques – THOMAZ FILHO et al., 2008). Na Bacia de Santos há o registro de significativo vulcanismo extrusivo de caráter basáltico alcalino no Meso-Eoceno, onde foram reconhecidas feições de cones vulcânicos e derrames submarinos (OREIRO, 2006). Nas bacias do Espírito Santo, Mucuri, Cumuruxatiba e Jequitinhonha houve um pujante magmatismo a partir do Paleoceno (e.g. CORDANI 1970; MIZUSAKI et al. 1994; SOBREIRA e SZATMARI 2000, RANGEL et al. 2007) nomeado de Formação Abrolhos (BOYER, 1969). Estas bacias estão limitadas a norte pela Bacia de Almada, no Alto de Olivença, e ao sul pela Bacia de Campos através do Alto de Vitória. A área total destas quatro bacias é cerca de 112 mil km² (FRANÇA et al., 2007a,b; RANGEL et al., 2007; RODOVALHO et al, 2007). Em especial nas bacias do Espírito Santo e Mucuri o magmatismo Abrolhos, com principal expressão no Paleoceno e no Eoceno, exerceu grande influência na fisiografia destas bacias (e.g. FRANÇA et al., 2007a,b), sendo responsável pelo alargamento da plataforma continental do norte do Espírito Santo e do sul da Bahia em 200 km (ASMUS et al., 1971).

O intenso evento vulcânico da Formação Abrolhos ocorreu na mesma idade geológica de outros eventos ígneos mundiais (e.g. Província Vulcânica Atlântica do Norte - *North Atlantic Volcanic Province* - NAVP) (STOREY et al., 2007) que estão sendo relacionados com o MTPE. Apesar dos eventos magmáticos do Paleoceno-Eoceno serem conhecidos no Brasil, ainda são pouco estudados estratigraficamente, principalmente quando se considera a

relação destes com as mudanças climáticas globais. De acordo com diversos trabalhos (e.g. KENNETT e STOTT, 1991, TJASMA e LOHMANN, 1983; STEINECK e THOMAS, 1996, SVENSEN et al. 2004, JONES, 2015), existe uma relação próxima entre os produtos gerados por atividades magmáticas com as mudanças climáticas, assim como a extinção e/ou manutenção dos organismos vivos. Muitos trabalhos relacionando o magmatismo da província Atlântica Norte à emissão de Carbono e, conseqüentemente com o aquecimento global que se sucedeu no final do Paleoceno, têm sido feitos para o hemisfério norte (e.g. SVENSEN et al. 2004, REYNOLDS et al. 2017). Alguns autores (e.g. KENNETT e STOTT, 1991) já haviam sugerido que estudos fossem feitos em regiões de baixa latitude para melhor caracterização da magnitude do evento MTPE. Assim, urge a importância de estudos pertinentes sobre esse assunto no hemisfério sul, inclusive nas bacias sedimentares brasileiras.

A expressão brasileira (e.g. OREIRO 2006, THOMAZ FILHO et al. 2008, OLIVEIRA et al. 2018) do magmatismo mundial no limite geológico do Paleoceno/Eoceno pode também ter sido responsável pela emissão de gases de efeito estufa no tempo do MTPE, contribuindo para o aquecimento global nesse intervalo, assim como os outros magmatismos em outras partes do globo. Desse modo, o objetivo geral deste trabalho é verificar a importância do magmatismo de Abrolhos para o evento climático no intervalo do Paleoceno/Eoceno. Os objetivos específicos envolvem:

- a) estudar bacias da margem leste brasileira onde houve o desenvolvimento do corpulento magmatismo da Formação Abrolhos. Para tal, foram escolhidas as bacias do Espírito Santo e de Mucuri;
- b) examinar os dados isotópicos da razão entre os carbonos 12 e 13 ($\delta^{13}\text{C}$) e os dados geoquímicos nessas bacias, com a finalidade de encontrar e caracterizar a anomalia *CIE*;
- c) realizar interpretações geofísicas (sísmicas e não-sísmicas) e petrofísicas com a finalidade de caracterizar o magmatismo de Abrolhos e a influência das rochas ígneas intrusivas nos sedimentos ricos em matéria orgânica;
- d) promover cálculos com relação a influência dessas rochas ígneas no processo de emissão de Carbono para atmosfera à época do MTPE;
- e) por fim, estabelecer correlações com as interpretações realizadas nesse trabalho com os registros já conhecidos no mundo.

Área de estudo

A área do estudo compreende a porção offshore das bacias do Espírito Santo e de Mucuri, no litoral centro-leste do Brasil.

Figura 1 –Localização das bacias do Espírito Santo e Mucuri



Fonte: Base de dados ArcGis.

Esta tese foi dividida em 5 capítulos que estão resumidos da seguinte forma:

- a) capítulo 1 refere-se à revisão bibliográfica dos temas que sustentam esse trabalho, os quais são: o evento termal MTPE e o contexto geológico;
- b) capítulo 2 é destinado a descrição da metodologia abordada nesse trabalho, que inclui os dados geofísicos sísmicos, dados geofísicos não-sísmicos, dados geoquímicos e isotópicos;
- c) capítulo 3 aborda os resultados obtidos nessa tese de doutoramento e inclui os resultados dos dados geofísicos sísmicos, não sísmicos e os resultados dos dados geoquímicos e isotópicos;
- d) capítulo 4 é direcionado as discussões da tese, onde foi feita a correlação e integração dos dados estudados;
- e) capítulo 5 refere-se a conclusão do trabalho, onde foi considerado o desfecho final da tese. Inclui uma síntese e junção das conclusões parciais antes já expostas e propostas com sugestões para pesquisas futuras.