



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Anderson Costa dos Santos

**Petrologia do Arquipélago de Martin Vaz e dos Montes Submarinos da Cadeia Vitória-Trindade: Montague, Jaseur, Davis, Dogaressa e Columbia. Análise de elementos traços, datação  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  e de Nd e Sr relacionada à evidência da Pluma de Trindade**

Rio de Janeiro

2016

Anderson Costa dos Santos

**Petrologia do Arquipélago de Martin Vaz e dos Montes Submarinos da Cadeia Vitória-Trindade: Montague, Jaseur, Davis, Dogressa e Columbia. Análise de elementos traços, datação  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  e de Nd e Sr relacionada à evidência da Pluma de Trindade**

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: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Mauro César Geraldês

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Thais Cristina Vargas Garrido

Rio de Janeiro

2016

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

S237 Santos, Anderson Costa dos.  
Petrologia do Arquipélago de Martin Vaz e dos Montes Submarinos da Cadeia Vitória-Trindade: Montague, Jaseur, Davis, Dogaressa e Columbia: Análise de elementos traços, datação  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  e isotópicos de Nd e Sr relacionada à evidência da Pluma de Trindade / Anderson Costa dos Santos. – 2016. 220f.

Orientador: Mauro César Geraldês.

Co-orientadora: Thais Cristina Vargas Garrido.

Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Petrologia – Martin Vaz, Ilha (ES) – Teses. 2. Petrologia – Trindade, Ilha de (ES) – Teses. 3. Tempo geológico – Teses. 4. Geologia isotópica – Teses. 5. Geoquímica – Teses. I. Geraldês, Mauro César. II. Garrido, Thais Cristina Vargas. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. IV. Título.

.....CDU 552(815.2)

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

---

Assinatura

---

Data

Anderson Costa dos Santos

**Petrologia do Arquipélago de Martin Vaz e dos Montes Submarinos da Cadeia Vitória-Trindade: Montague, Jaseur, Davis, Dogaressa e Columbia. Análise de elementos traços, datação  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  e de Nd e Sr relacionada à evidência da Pluma de Trindade**

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: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais

Aprovado em: 16 de setembro de 2016.

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Thais Cristina Vargas Garrido  
Faculdade de Geologia – UERJ

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Mauro César Geraldês (Orientador)  
Faculdade de Geologia – UERJ

---

Prof. Dr. Rubem Porto  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFFRJ

---

Prof. Dr. Julio Mendes  
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Mônica Heilbron  
Faculdade de Geologia – UERJ

---

Prof. Dr. Webster Mohriak  
Faculdade de Geologia – UERJ

Rio de Janeiro  
2016

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, irmã e avó Débora.

## AGRADECIMENTOS

Quem a todos agradece a ninguém se dar o prazer e o gozo de sentir-se importante ao ser lembrado. Em virtude disto, nomeio todos aqueles que por minha vida passaram, uns ficaram e outros se foram, e, se porventura, esqueci-me de alguém, peço-lhe perdão, pois não foi esta minha intenção.

Agradeço primeiramente aos meus pais, minha irmã e minha avó Débora pela força, encorajamento, suporte e choro nos momentos de fraqueza e risos nos momentos de bonança.

Cito, também, a orientação e o encorajamento que meu orientador Mauro César Geraldes me forneceu durante todo o trabalho e, por muitas vezes, o espaço dado para que, através dele, me expressasse e fizesse valer, ou se não, tentar ser ouvido, por tudo o que aprendi na universidade.

Aos professores da geologia UERJ que por certo corroboraram para o pouco que sou hoje. Agradeço também a Suzy, Lélia e a Rose pela força nos momentos de sufoco.

Ao professor Julio Mendes, Sérgio Willians, Ron Fodor, Wolfgang Siebel e Fred Jourdan pela atenção prestada.

À Marinha do Brasil por permitir que este trabalho fosse realizado em terras tão distantes. Ao CNPq por financiar este trabalho Edital MCT/CNPq N° 026/2009 – Programa Arquipélago e Ilhas Oceânicas.

Aos amigos da geologia, nossa, haja folha para citá-los; aos contemporâneos, *sin* e pós-turma, meu carinho especial pelo acolhimento e amizade, eles sabem do que estou falando. Ao amigo Marcio Borges pelos momentos de alegria e de força nessa caminhada acadêmica.

Não poderia jamais deixar de mencionar Leonardo Moraes, Wanessa Borges, minha Xaxá, e a Camila Nogueira, minha eterna dupla, ao meu querido Werlem Holanda, o carinho, amizade, os segredos divididos, os risos compartilhados e as lágrimas que foram secadas. “(...) depois de certo tempo, você aprende que verdadeiras amizades continuam a crescer mesmo a longas distâncias e o que importa não é o que você tem na vida, mas quem você tem na vida”. E que os bons amigos são famílias que nos permitiram escolher (...) assim já dizia Shakespeare.

Agradeço a minha amizade com a pessoa mais doce que conheci na vida, que me ensinou a viver, como se a vida fosse acabar agora. Aprendi a reclamar menos, a chorar menos e a viver mais, mas Shakespeare também dizia que com o tempo (...) você descobre que as pesso-

as com quem você mais se importa na vida são tomadas de você muito depressa; por isso sempre devemos deixar aqueles que amamos com palavras amorosas, pode ser a última vez que as vejamos. A você, Anne Marilyn, dedico minha eterna amizade, e lamento por não ter dito, mesmo que pela última vez, o quanto você era e é importante para mim.

Agradeço ao Leo Morais pela insistência em ser meu amigo até mesmo quando eu não mereci. Agradeço-o pela força antes mesmo da universidade, em me encorajar a enfrentar o vestibular, a seguir os meus sonhos e a lidar com as aventuras que a vida proporciona.

Aos amigos transoceânicos Jennifer e Sarah Robinson, Billy Ray, Paco Furió, Michael Altenhenne, Luis Treto e Anton Lerkin.

Não posso esquecer-me de citar aquele que acima de tudo acreditou em mim, aquele que me dizia que eu podia ir mais longe, e que quanto mais longe eu chegasse, lá, ainda não seria meu fim. Por me fazer me entender nos momentos em que eu mesmo não me entendia e por me ensinar a pensar antes de agir, quando o instinto compulsório humano faz-nos errar pela prática voraz de SER sem SABER: agradeço a mim mesmo por ter sido, acima de tudo, meu eterno companheiro, por ter aprendido que o tempo não é algo que possa ser voltado para trás. Portanto, aprendi a plantar meu jardim e a decorar minha alma, ao invés de esperar que alguém me trouxesse flores.

“E, aprendi que realmente posso suportar... que realmente sou forte, e que quero ir muito mais longe depois de pensar que não se pode mais. E que realmente a vida tem um grande valor e que eu tenho um grande valor diante da vida” (William Shakespeare)

Desistir... eu já pensei seriamente nisso, mas nunca me levei realmente a sério; é que tem mais chão nos meus olhos do que o cansaço nas minhas pernas, mais esperança nos meus passos, do que tristeza nos meus ombros, mais estrada no meu coração do que medo na minha cabeça.

*Cora Coralina*

Não basta ensinar ao homem uma especialidade, porque se tornará assim uma máquina utilizável e não uma personalidade. É necessário que adquira um sentimento, senso prático daquilo que vale a pena ser empreendido, daquilo que é belo, do que é moralmente correto.

*Albert Einstein*

## RESUMO

SANTOS, Anderson Costa dos. *Petrologia do Arquipélago de Martin Vaz e dos Montes Submarinos da Cadeia Vitória-Trindade: Montague, Jaseur, Davis, Dogaressa e Columbia*. Análise de elementos traços, datação  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  e de Nd e Sr relacionada à evidência da Pluma de Trindade. 220 f. 2016. Tese (Doutorado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

O atual trabalho apresenta os resultados da análise de química dos minerais, de rocha total e da composição isotópica Sr e Nd de cinco montes submarinos (Montague, Jaseur, Davis, Dogaressa e Columbia) e da ilha principal de Martin Vaz, localizados na porção *offshore* da região sudeste do Brasil. São intrusões recentes geradas durante o Plio-Pleistoceno, datadas pelo método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . São representados por magmas sódicos de composição nefelinítica onde se observa um processo de evolução magmática por cristalização fracionada na ilha de Martin Vaz gerando fonolitos. A composição dos fenocristais de olivina nos montes submarinos estudados indica um desequilíbrio com o líquido ( $\text{Fe}/\text{Mg}^{\text{ol/liq}} K_D \sim 0,30 \pm 0,03$ ) provavelmente associado a um processo de cristalização anterior a partir de um magma evoluído. Os núcleos verdes de piroxênio nos nefelinitos de Martin Vaz caracterizam-se por um fracionamento polibárico. As diversas composições químicas dos clinopiroxênios corroboram para um modelo de reposição de magmas primitivos na câmara magmática. As razões de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ( $\sim 0,703800$ ) e  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  ( $\sim 0,512800$ ) dos montes submarinos e de Martin Vaz variam pouco reiterando um processo de fusão parcial a partir de uma fonte homogênea localizado à esquerda empobrecida no diagrama de Sr *versus* Nd em direção ao *Bulk Silicate Earth* (BSE). O padrão de enriquecimento em elementos terras-raras e os resultados isotópicos, revelam uma fonte mantélica empobrecida em relação ao BSE, evidenciando que o processo de metassomatismo da fonte é recente e não uma característica pretérita da fonte. Modelos de fusão parcial não-modal (*Fractional Melting* e *Batch Melting*) sugerem que a fonte do magmatismo da cadeia Vitória-Trindade é um *mixing* entre o espinélio e o granada-lherzolito (75-90 Km) gerados entre 2,0-3,0GPa, cuja variabilidade do grau de fusão parcial ( $F=0,02-0,07$ ) influenciou diretamente na composição química das lavas da Cadeia Vitória-Trindade, no que diz respeito às concentrações de elementos incompatíveis.

Palavras-chave: Cadeia Vitória-Trindade. Martin Vaz. Montes Submarinos. Datação Ar-Ar. Nefelinitos.

## ABSTRACT

SANTOS, Anderson Costa dos. *Petrology of Martin Vaz Island and Vitoria-Trindade Ridge seamounts: Montague, Jaseur, Davis, Dogaressa and Columbia. Trace elements,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating and Sr and Nd isotope analysis related to the Trindade Plume evidences.* 220 f. 2016. Tese (Doutorado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

The current work presents the results of chemical mineral analysis, whole rock and isotopic composition of Sr and Nd from five seamounts (Montague, Jaseur, Davis, Dogaressa and Columbia) and the Martin Vaz main island, located in the offshore portion of southeastern Brazil. These alkaline intrusions were generated during the Plio-Pleistocene, dated by the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  method. They are represented by sodic magmas of nephelinitic composition revealing a magmatic evolution process by fractional crystallization in Martin Vaz Island generating phonolites. The composition of the olivine phenocrysts in the seamounts and Martin Vaz indicates a disequilibrium liquid (assuming  $\text{Fe}/\text{Mg}^{\text{ol/liq}} K_D \sim 0,30 \pm 0,03$ ) probably associated with a prior crystallization process from an evolved magma. The green cores pyroxenes from Martin Vaz nephelinite lavas are characterized by a polybaric fractionation. The different chemical compositions in clinopyroxenes corroborate a magma replenishing model. The  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ( $\sim 0.703800$ ) and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  ( $\sim 0.512800$ ) ratios of seamounts and Martin Vaz do not vary significantly reiterating a partial melting process from a homogeneous depleted source in comparison to the Bulk Silicate Earth (BSE). The enrichment pattern in rare-earth elements and isotopic ratios indicates that the metasomatism process is recent and not a long-term source characteristic. Non-modal partial melting models (Fractional Melting and Batch Melting) suggest that the source of the Vitoria-Trindade Ridge magmatism is a mixing between the spinel and the garnet-lherzolite (75-90 Km) generated between 2.0-3.0 GPa which REE enrichment and chemical variability is due to small degree of partial melting ( $F = 0.02-0.07$ ).

Keywords: Vitoria-Trindade Ridge. Martin Vaz. Seamounts. Ar-Ar Dating. Nephelinites.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 -	Mapa de localização da Cadeia Vitória-Trindade no paralelo ~20.....	21
Figura 02 -	Mapa batimétrico da área da Cadeia Vitória-Trindade, ES.....	24
Figura 03 -	A Cadeia Vitória-Trindade e sua distribuição espacial na configuração do assoalho oceânico.....	25
Figura 04 -	Mapa batimétrico 3D da plataforma continental sudeste brasileira com ênfase para a Cadeia Vitória-Trindade.....	26
Figura 05 -	Figura 33 -Mapa topográfico e batimétrico gerado a partir de dados derivados de satélite.....	28
Figura 06 -	Alinhamento Poços de Caldas-Cabo Frio e seu link com a Cadeia Vitória-Trindade.....	32
Figura 07 -	Localização de algumas das ilhas, cadeias, altos e montes submarinos na porção sudeste do Atlântico Sul.....	33
Figura 08 -	Cinco tipos de reservatórios de White (1985) e cinco tipos de componentes mantélicos de Zindler & Hart (1986) .....	39
Figura 09 -	Evolução dos isótopos de hélio nos reservatórios mantélicos.....	40
Figura 10 -	Diagrama de (a) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e (b) $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em basaltos de ilha do Oceânica (OIB) .....	41
Figura 11 -	As lavas com concentrações altas de $^3\text{He}/^4\text{He}$ dos hotspots do hemisfério norte (FOZO-B) separadas das amostras com altas razões de $^3\text{He}/^4\text{He}$ dos hotspots do hemisfério sul (FOZO-A) .....	42
Figura 12 -	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diagrama de variação para suítes de basalto oceânicos.....	43
Figura 13 -	Resumo da relação de fases no pirolito referente às condições do manto superior.....	50
Figura 14 -	Modelo esquemático de dois cenários para a inserção da crosta inferior no manto.....	52
Figura 15 -	Modelo para geração de magma mantélico enriquecido.....	54
Figura 16 -	Da litosfera sub-oceânica à formação do magma alcalino.....	55
Figura 17 -	Variação de densidades ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) para os principais grupos litológicos.....	68
Figura 18 -	Limite de valores para as velocidades em $\text{ms}^{-1}$ das ondas P por litologia.....	70

Figura 19 -	Mapa topográfico da área de estudos da Cadeia Vitória-Trindade contendo as linhas sísmicas do LEPLAC.....	71
Figura 20 -	Fotomicrografia das lâminas dos montes submarinos.....	75
Figura 21 -	Fotomicrografia das lâminas dos montes submarinos.....	76
Figura 22 -	mapa geológico do Arquipélago de Martin Vaz.....	80
Figura 23 -	Aspectos morfológicas das unidades litoestratigráficas da ilha principal de Martin Vaz.....	83
Figura 24 -	Fotomicrografias das amostras MVA-03, MVA-04 e MVA-11. A, C, E, G: nicóis cruzados e B, D, F, H: nicóis paralelos.....	84
Figura 25 -	Fotomicrografia das amostras MVA-10, MVA-12 e MVA-13. A, C, E, G: nicóis cruzados e B, D, F, H: nicóis paralelos.....	85
Figura 26 -	Fotomicrografia das amostras MVA-01, MVA-02 e MVA-08. A, C, E: nicóis cruzados e B, D, F: nicóis paralelos.....	86
Figura 27 -	Fotomicrografia das amostras MVA-05A e MVA-05B. A, C, E, G: nicóis cruzados e B, D, F, H: nicóis paralelos.....	87
Figura 28 -	Fotomicrografia das amostras MVA-05A e MVA-05B. Aumento de 2,5X. A, C, E: nicóis cruzados e B, D, F: nicóis paralelos.....	88
Figura 29 -	Composição química dos clinopiroxênios do Monte de Columbia.....	90
Figura 30 -	Variação da composição de feldspato da lava do monte Davis (Ab = albita; An = Anortita; Or = ortoclásio).....	94
Figura 31 -	Composição química dos clinopiroxênios do derrame nefelinítico e das intrusivas fonolíticas da ilha principal de Martin Vaz, Atlântico Sul, Brasil.....	99
Figura 32 -	Variação de forsterita (Fo, mol %) com a concentração de CaO e NiO (wt.%) em olivinas das extrusivas nefeliníticas dos montes submarinos da Cadeia Vitória-Trindade e da ilha principal de Martin Vaz, Atlântico Sul, Brasil.....	100
Figura 33 -	Variação de forsterita (Fo, mol %) com a concentração de CaO e NiO (wt.%) em olivinas do derrame ankaramítico da ilha principal de Martin Vaz, Atlântico Sul, Brasil.....	101
Figura 34 -	Variação de forsterita (Fo, mol %) com a concentração de CaO e NiO (wt.%) em olivinas da intrusão ankaramítica do Monte Columbia, Atlântico Sul, Brasil.....	102

Figura 35 -	Varição de forsterita (Fo, mol %) com a concentração de CaO e NiO (wt.%) em olivinas da intrusão ankaramítica do Banco de Dogaressa, Atlântico Sul, Brasil.....	103
Figura 36 -	Varição de forsterita (Fo, mol %) com a concentração de CaO e NiO (wt.%) em olivinas da intrusão ankaramítica do Monte Jaseur, Atlântico Sul, Brasil.....	104
Figura 37 -	Varição de forsterita (Fo, mol %) com a concentração de CaO e NiO (wt.%) em olivinas da intrusão ankaramítica do Monte Montague, Atlântico Sul, Brasil.....	105
Figura 38 -	Número de Mg [100 x massa atômica Mg/(Mg+Fe)] em clinopiroxênios plotados versus óxidos maiores (wt. %) para amostras dos montes submarinos e de Martin Vaz.....	108
Figura 39 -	Varição entre os componentes molecular Enstatita (En), Ferrossilita (Fs) e Wollastonita (Wo) em clinopiroxênios do monte submarino de Columbia e do derrame nefelinítico e a intrusiva fonolítica da ilha principal de Martin Vaz, Atlântico Sul, Brasil.....	109
Figura 40 -	Plot de proporções atômicas de número de magnésio versus $Al^4/Al^6$ e de $Al^4$ versus $Al^6$ , onde Mg# [100 x massa atômica Mg/(Mg+Fe)].....	110
Figura 41 -	Diagramas de variação litogeoquímica dos montes submarinos de Columbia, Davis, Montague, Jaseur e Dogaressa.....	119
Figura 42 -	Diagrama de elementos terras-raras para os montes submarinos da Cadeia Vitória-Trindade (Columbia, Dogaressa, Davis, Jaseur, Montague).....	125
Figura 43 -	Diagrama de elementos terras-raras para amostras do derrame nefelinítico que recobre a ilha principal de Martin Vaz, Atlântico Sul. Normalizado pelo condrito de Boynton, 1985.....	127
Figura 44 -	Diagrama de elementos terras-raras para amostras de fonolitos da ilha principal de Martin Vaz, Atlântico Sul. Normalizado pelo condrito de Boynton, (1985).....	127
Figura 45A	Diagrama de elementos terras-raras normalizados pelo condrito de Boynton (1985).....	128
-		
Figura 45B	Diagrama de elementos terras-raras dos montes da Cadeia Vitória-Trindade (Columbia, Dogaressa, Davis, Jaseur, Montague).....	128
-		
Figura 46 -	Diagramas de variação de Nb para as amostras presentes nos montes sub-	

	marinos e da ilha principal de Martin Vaz, cadeia Vitória-Trindade.....	130
Figura 47 -	Diagrama multielementar normalizado para o condrito (SUN & MCDO- NOUGH, 1989) .....	131
Figura 48 -	Diagrama multielementar normalizado para o manto primitivo (MCDO- NOUGH & SUN, 1995) .....	131
Figura 49 -	Diagrama multielementar normalizado para o condrito (SUN & MCDO- NOUGH, 1989) .....	132
Figura 50 -	Diagrama multielementar normalizado para o manto primitivo (MCDO- NOUGH & SUN, 1995) .....	132
Figura 51 -	Classificação de rochas vulcânicas de alto-MgO modificado de Le Bas e Streckeisen (1991) .....	134
Figura 52 -	Diagrama de correlação de $^{134}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para as rochas vulcânicas dos montes submarinos e da ilha principal de Martin Vaz.....	137
Figura 53 -	Dados batimétricos obtidos do banco de dados do TOPEX sobreposto à imagem de satélite do <i>Google Earth</i> ® mostrando os montes submarinos e as ilhas objetos deste estudo, no paralelo de Vitória (~20°S).....	139
Figura 54 -	Mapa regional da topo-batimetria ao longo da margem leste brasileira com destaque para os montes submarinos da Cadeia Vitória-Trindade. Locali- zação da linha sísmica 501-010 do LEPLAC em amarelo.....	141
Figura 55 -	Mapa regional da topo-batimetria ao longo da margem leste brasileira, com destaque para os montes submarinos da Cadeia Vitória-Trindade. Localização da linha sísmica 501-011 do LEPLAC em amarelo.....	142
Figura 56 -	Mapa regional de anomalia free-air com localização da linha sísmica regi- onal 501-010 do LEPLAC em amarelo.....	142
Figura 57 -	Perfil de anomalia <i>free-air</i> ao longo da linha sísmica 501-010 do LE- PLAC.....	143
Figura 58 -	Mapa regional de anomalia free-air com localização da linha sísmica regi- onal 501-011 do LEPLAC em vermelho.....	143
Figura 59 -	Perfil de anomalia free-air ao longo da linha sísmica 501-011 do LE- PLAC.....	144
Figura 60 -	Mapa regional de anomalia magnética com localização da linha sísmica regional 501-010 do LEPLAC em amarelo.....	144
Figura 61 -	Perfil de anomalia magnética ao longo da linha sísmica 501-010 do LE-	

	PLAC.....	145
Figura 62 -	Mapa regional de anomalia magnética com localização da linha sísmica regional 501-011 do LEPLAC em amarelo.....	145
Figura 63 -	Perfil de anomalia magnética ao longo da linha sísmica 501-011 do LEPLAC.....	146
Figura 64 -	Seção sísmica regional 501-011 do LEPLAC, a sul da CVT, com interpretação preliminar das sequências estratigráficas e feições vulcânicas.....	147
Figura 65 -	Seção sísmica regional 501-010 do LEPLAC, a norte da CVT.....	148
Figura 66 -	Diagrama de idade plateau para a amostra MVA-04 – derrame nefelinítico, Martin Vaz.....	150
Figura 67 -	Diagrama de idade plateau para a amostra MVA-05B – dique fonolítico, Martin Vaz.....	151
Figura 68 -	Diagrama de idade plateau para a amostra MVA-07 – derrame nefelinítico, Martin Vaz.....	153
Figura 69 -	Diagrama de idade plateau para a amostra TRIM-04H – Monte Davis.....	154
Figura 70 -	Diagramas de idades plateau e isocrômica inversa para amostras do derrame nefelinítico da ilha principal de Martin Vaz.....	155
Figura 71 -	Diagramas de idades plateau e isocrômica inversa para amostras das intrusivas fonolíticas da ilha principal de Martin Vaz.....	156
Figura 72 -	Diagramas de variação entre Nb vs. Ba; Zr vs. Ba e Nb vs. Ba/Nb.....	158
Figura 73 -	Diagrama de La/Sm versus Sm/Yb.....	164
Figura 74 -	Razão Zr/Nb e Zr/Y dos montes submarinos e da ilha de Martin Vaz representativa da mistura de components enriquecidos e empobrecidos.....	165
Figura 75 -	Diagrama A de (Ce/Yb) <sub>N</sub> normalizado pelo condrito de Boynton (1985) versus Yb, Diagrama B é a normalização pelo condrito de Boynton (1985) da razão Ce/Yb versus Ce.....	168
Figura 76 -	Variação entre Mg# e MgO/CaO dos montes submarinos da cadeia Vitória-Trindade.....	168
Figura 77 -	Relação Hf (ppm) versus Zr/Hf das amostras dos montes submarinos da Cadeia Vitória-Trindade.....	169
Figura 78 -	Modelo de evolução da câmara magmática tendo como exemplo as lavas presentes em Martin Vaz (A, B).....	174
Figura 79 -	Modelo de plumas extraído de Matska e Yuen (2006).....	175

Figura 80 -	Comparação entre os modelos geodinâmicos.....	176
Figura 81 -	Imagem do GoogleTM Earth Pro® com composição do mapa batimétrico do TOPEX e isócronas de Müller et al., (2008).....	177
Figura 82 -	Idades radiométricas do lineamento Poços de Caldas-Cabo Frio e Cadeia Vitória-Trindade.....	178

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 -	Isótopos radiogênicos utilizados como traçadores da heterogeneidade mantélica.....	37
Tabela 02 -	Descrição dos componentes mantélicos baseados nas razões isotópicas de Sr, Nd, Pb.....	40
Tabela 03 -	Abundância de K, Rb e Sr para o manto anidro e hidratado. ....	48
Tabela 04 -	Abundâncias de K, Rb e Sr na fusão parcial do manto anidro e hidratado.....	49
Tabela 05 -	Arranjo dos coletores para os métodos Nd e Sm.....	65
Tabela 06 -	Arranjo dos coletores para o método de Sr.....	65
Tabela 07 -	Densidade das rochas.....	68
Tabela 08 -	Resumo petrográfico das lavas dragadas dos montes submarinos da Cadeia Vitória.Trindade.....	77
Tabela 09 -	Resumo petrográfico das amostras da ilha principal de Martin Vaz.....	82
Tabela 10 -	Composição química (wt. %) representativa dos clinopiroxênios e olivinas do monte submarino Columbia, Oceano Atlântico Sul.....	91
Tabela 11 -	Composições representativas (wt.%) para olivinas do Banco de Dogarressa, Oceano Atlântico Sul.....	93
Tabela 12 -	Composições representativas (wt.%) para plagioclásios do Monte Davis, Oceano Atlântico Sul.....	94
Tabela 13 -	Composições representativas (wt.%) para olivinas do Monte Jaseur, Oceano Atlântico Sul.....	95
Tabela 14 -	Composições representativas (wt.%) para olivinas do Monte Montague, Oceano Atlântico Sul.....	96
Tabela 15 -	Composição química dos minerais presentes nos derrames ankaramíticos e nas intrusivas fonolíticas da ilha principal de Martin Vaz, Atlântico Sul.....	97
Tabela 16 -	Análise normalizada da composição da olivina (crisólita) presente em Deer, Howie e Zussman (1966).....	98
Tabela 17 -	Análise normalizada da média das olivinas presentes nos montes submarinos e no derrame máfico da ilha de Martin Vaz.....	99

Tabela 18 -	Valor médio para as composições químicas de clinopiroxênios.....	
Tabela 19 -	Valores obtidos dos minerais normativos com o uso da norma CIPW para as amostras de Martin Vaz.....	116
Tabela 20 -	Valores obtidos dos minerais normativos com o uso da norma CIPW para as amostras dos montes submarinos.....	118
Tabela 21 -	Composição de rocha total para as ultramáficas e máficas alcalinas.....	124
Tabela 22 -	Resumo da composição litogeoquímica das amostras da Cadeia Vitória-Trindade .....	137
Tabela 23 -	Comparação da media das composições isotópicas.....	140
Tabela 24 -	Isótopos de Sr e Nd para as amostras dos montes submarinos e da ilha principal de Martin Vaz.....	142
Tabela 25 -	Valores discriminados para cada isótopo de argônio liberado durante cada etapa de aquecimento gradual a uma taxa média de $J = 0,00069610 \pm 0,00000299$ .....	152
Tabela 26 -	Valores discriminados para cada isótopo de argônio liberado durante cada etapa de aquecimento gradual a uma taxa média de $J = 0,00070000 \pm 0,00000203$ .....	156
Tabela 27 -	Valores discriminados para cada isótopo de argônio liberado durante cada etapa de aquecimento gradual a uma taxa média de $J = 0,00069840 \pm 0,00000175$ .....	156
Tabela 28 -	Valores discriminados para cada isótopo de argônio liberado durante cada etapa de aquecimento gradual a uma taxa média de $J = 0,00069610 \pm 0,00000299$ .....	158
Tabela 29 -	Composição da olivina e a razão cristal/líquido assumindo $Fe/Mg_{ol/liq} KD \sim 0,3$ obtidas da equação 4.....	163

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	20
1	<b>CONTEXTO GEOLÓGICO E ASSINATURA GEOQUÍMICAISOTÓPI- CA DE BASALTO DE ILHA OCEÂNICA.....</b>	27
1.1	<b>Introdução.....</b>	27
1.2	<b>As ilhas oceânicas brasileiras e sua relação com a tectônica do Atlântico Sul</b>	27
1.3	<b>Síntese dos modelos de geração das rochas alcalinas na Plataforma Sul.Americana e no Atlântico Sul.....</b>	29
1.4	<b>A origem do magma alcalino ultramáfico.....</b>	35
1.4.1	<u>Introdução.....</u>	35
1.4.2	<u>Reservatórios mantélicos.....</u>	36
1.5	<b>O magma alcalino.....</b>	44
1.6	<b>Fonte do basalto de ilha oceânica (OIB).....</b>	45
1.6.1	<u>Manto metassomático como fonte de magma alcalino ultramáfico.....</u>	47
1.7	<b>Metassomatismo do manto como fator do enriquecimento geoquímico e iso- tópico dos basaltos de ilha oceânica.....</b>	53
2	<b>METODOLOGIA.....</b>	56
2.1	<b>Introdução.....</b>	56
2.2	<b>Bibliografia.....</b>	56
2.3	<b>Coleta e preparação das amostras de campo.....</b>	57
2.4	<b>Estudos petrográficos.....</b>	57
2.5	<b>Métodos analíticos.....</b>	58
2.5.1	<u>Litogeoquímica.....</u>	58
2.5.2	<u>Lavagem dos grãos para datação <math>^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}</math>.....</u>	60
2.5.3	<u>Datação <math>^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}</math>.....</u>	60
2.5.4	<u>Química isotópica Nd e Sr.....</u>	64
2.5.5	<u>Química mineral.....</u>	66
2.5.6	<u>Topografia, Gravimetria, Magnetometria e sísmica de refração.....</u>	66
2.5.7	<u>Cálculo de fugacidade de oxigênio.....</u>	71
2.5.8	<u>Modelagem geoquímica de elementos terras raras.....</u>	72
3	<b>PETROGRAFIA.....</b>	73
3.1	<b>Introdução.....</b>	73

3.2	<b>Montes submarinos</b> .....	73
3.2.1	<u>Descrição macro e microscópica das amostras</u> .....	73
3.3	<b>Ilha de Martin Vaz</b> .....	78
3.3.1	<u>Introdução</u> .....	78
3.3.2	<u>Descrição macroscópica das amostras</u> .....	79
3.3.3	<u>Descrição petrográfica ao microscópio das amostras</u> .....	81
4	<b>RESULTADOS ANALÍTICOS</b> .....	89
4.1	<b>Composição química dos minerais</b> .....	89
4.1.1	<u>Monte Columbia</u> .....	89
4.1.2	<u>Banco de Dogaressa</u> .....	93
4.1.3	<u>Monte Davis</u> .....	93
4.1.4	<u>Monte Jaseur</u> .....	95
4.1.5	<u>Monte Montague</u> .....	95
4.1.6	<u>Martin Vaz</u> .....	96
4.2	<b>Cálculo normativo (CIPW)</b> .....	115
4.3	<b>Litogeoquímica</b> .....	120
4.3.1	<u>Monte Columbia</u> .....	120
4.3.2	<u>Banco de Dogaressa</u> .....	122
4.3.3	<u>Monte Davis</u> .....	122
4.3.4	<u>Monte Jaseur</u> .....	128
4.3.5	<u>Monte Montague</u> .....	128
4.3.6	<u>Martin Vaz</u> .....	129
4.4	<b>Classificação de rochas ígneas</b> .....	137
4.5	<b>Composição isotópica de Nd e Sr</b> .....	139
5	<b>INTERPRETAÇÃO SÍSMICA, GRAVIMÉTRICA E MAGNETOMÉTRICA DOS MONTES SUBMARINOS DA CADEIA VITÓRIA. TRINDADE...</b>	143
6	<b>DATAÇÃO <math>^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}</math></b> .....	153
6.1	<b>Introdução</b> .....	153
7	<b>DISCUSSÕES</b> .....	161
7.1	<b>Origem de olivinas e núcleos verdes dos clinopiroxênios</b> .....	163
7.1.1	<u>Coeficiente de partição do <math>\text{Fe}^{2+}</math> e <math>\text{Mg}^{2+}</math> no sistema olivina.líquido</u> .....	163
7.1.2	<u>Coeficiente de partição do níquel no sistema olivina.líquido</u> .....	164
7.1.3	<u>Origem dos núcleos verdes de clinopiroxênios</u> .....	166

7.2	<b>Fusão parcial, metassomatismo e heterogeneidade da fonte.....</b>	167
7.3	<b>Fases residuais.....</b>	174
7.4	<b>Fugacidade de oxigênio.....</b>	175
7.5	<b>Modelo de evolução da câmara magmática.....</b>	176
7.6	<b>O modelo da pluma mantélica.....</b>	179
7.7	<b>Idade <math>^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}</math> e a evidência da Pluma de Trindade.....</b>	181
	<b>CONCLUSÕES.....</b>	183
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	185
	<b>APÊNDICE A - Dados Gravimétricos .....</b>	205
	<b>APÊNDICE B – Dados Topográficos.....</b>	206
	<b>APÊNDICE C - Cálculos Gravimétricos.....</b>	207
	<b>APÊNDICE D – Cálculos da fórmula química da olivina.....</b>	215
	<b>APÊNDICE E – Tabela de Cálculos da Modelagem Geoquímica.....</b>	217
	<b>APÊNDICE F – Linhas sísmicas da Cadeia Vitória-Trindade (LEPLAC).....</b>	219

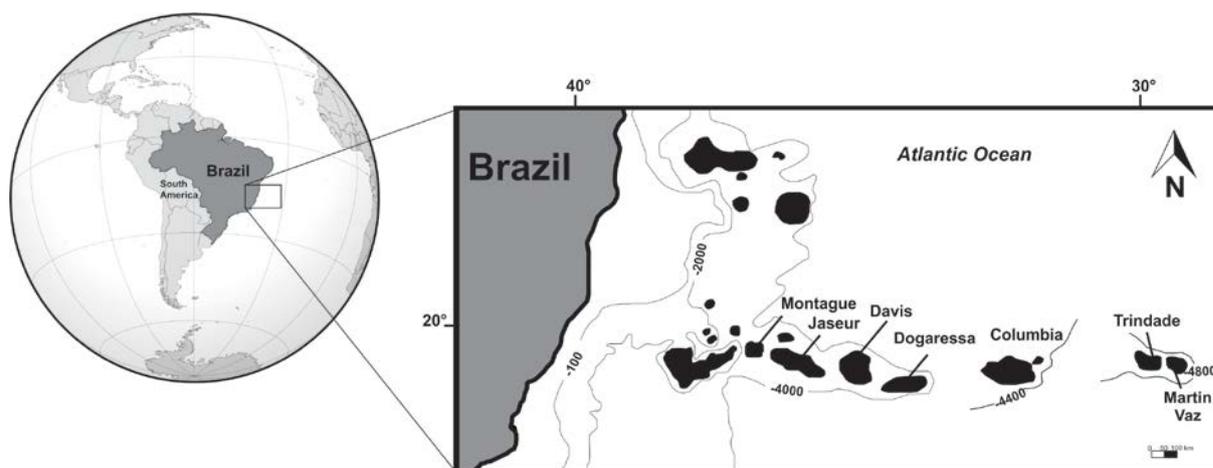
## INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, diversos estudos têm sugerido a origem das províncias ígneas alcalinas brasileiras (ULBRICH & GOMES, 1981) associada à existência da Pluma de Trindade (Gibson et al. 1995; 1997; 1999) cuja feição *offshore*, engloba a cadeia Vitória-Trindade, composta por diversos montes submarinos e as ilhas da Trindade e Martin Vaz (~1200 Km) à leste do território continental brasileiro no paralelo ~20°S (figura 1). Esta feição estende-se da plataforma até a porção de águas profundas da margem brasileira, englobando a cadeia Vitória-Trindade. O fenômeno de geração deste magmatismo alcalino é associado ao processo tectônico de quebra continental no Jurássico inferior e a abertura do Oceano Atlântico (HERZ, 1977). Crough et al., (1980), Duncan, (1981), Gibson et al., (1995, 1997), Herz, (1977), O'Connor e Duncan (1990), Toyoda et al. (1994), VanDecar et al., (1995), e outros, associaram as intrusões alcalinas como uma expressão da passagem da placa Sul-Americana sobre o *hotspot* de Trindade durante a abertura do oceano Atlântico. Almeida (1976) mostrou que a maioria dos maciços alcalinos ocorre num *trend* NE. O impacto da pluma de Trindade há aproximadamente 85 Ma, originou, segundo Gibson et al., (1995, 1997) as Províncias Ígneas Alcalinas de Alto Paranaíba e Poxoréu na borda norte e nordeste da Bacia do Paraná. Thompson et al., (1998) reportam um pico do magmatismo no sudeste Brasileiro entre 135-85 Ma e apresentaram evidência que durante 85-55 Ma o magmatismo cessou quando o Cráton do São Francisco passou por cima da pluma. Em contrapartida, eles propuseram que parte desta pluma mantélica quente desviou para sudeste, onde incidiu em uma litosfera fina da margem continental, gerando as expressões dos complexos ígneos de *trend* WE no continente.

Para VanDecar et al., (1995) o magmatismo do Cretáceo inferior está associado a pluma de Tristão da Cunha que gerou o derrame basáltico da Bacia do Paraná e diversos corpos intrusivos alcalinos associados de idade entre 80 a 90 Ma. Alguns destes maciços alcalinos apresentam xenólitos (~150 km de profundidade) e foram correlacionados ao impacto da pluma de Trindade sob a placa Sul-Americana. VanDecar et al., (1995) e Alves et al., (2006) associaram o magmatismo alcalino desde o estágio final do derrame basáltico do Paraná à zonas de fraquezas de falhas e fraturas transformantes. A ausência de corpos ígneos expressivos em torno do *track* associado à pluma de Trindade, é uma das razões para VanDecar et al., (1995) desacreditar na existência da pluma de Trindade. Por outro lado, Ito e Van Keken (2007) ratificam a existência da pluma de Trindade baseados em dados geofísicos de anomalias de baixa velocidade, correlacionando esta anomalia ao início do impacto da Pluma de Trin-

dade (THOMPSON et al., 1998) ou ao Lineamento TransBrasiliiano (CORDANI & SATO, 1999). Comin-Chiaromonti e Gomes (2005) relatam a existência de granada knorringítica com piroxênio exsolvido incluídos em diamantes amostrados de kimberlitos de 95 Ma, cuja presença sugere que a pluma de Trindade foi uma pluma fraca, originada de uma descontinuidade termoelástica entre o manto inferior e superior, que atingiu tanto o manto inferior quanto à litosfera subcontinental (HUTCHISON, 1997).

Figura 1 - Mapa de localização da Cadeia Vitória-Trindade no paralelo ~20°.



Legenda: Disposição dos montes submarinos e das ilhas de Trindade e Martin Vaz. A cadeia estende-se por 1200 Km

Fonte: FODOR & HANAN, 2000.

A partir de dados litogequímicos dos montes submarinos e de Martin Vaz, além de suas composições isotópicas Sr e Nd e de química mineral, traçaremos neste trabalho uma correlação com dados publicados para o magmatismo do Cretáceo-Eoceno, inserido no contexto das Províncias Ígneas Poxoréu e Alto Paranaíba, assim como os maciços alcalinos de Poços de Caldas, Itatiaia e Cabo Frio, além de correlacionar com o modelo da Pluma de Shona e Discovery (Shona e Discovery Ridge – Atlântico Sul), e a importância da pluma de Trindade na construção dos edifícios vulcânicos da Cadeia Vitória-Trindade, cuja denominação de oeste para leste, é conhecida como os montes: Montague, Jaseur, Davis, Dogarassa e Columbia.

A pluma de Trindade manifestou lavas alcalinas e rochas plutônicas insaturadas a saturadas (ULBRICH & GOMES 1981) tais como basanitos, nefelinitos, leucititos, fonolitos, ankartritos, ankaramitos, nefelina-sienitos e carbonatitos, dentre outros litotipos (HERZ, 1977; WEAVER, 1990; 1991; SIEBEL et al., 2000; MARQUES et al., 1999; GIBSON et al., 1999; THOMPSON et al., 1998). A Província Ígnea Poxoréu apresenta, em geral, basaltos tipo OIB, similares com a assinatura geoquímica dos basaltos do Havaí (GIBSON et al., 1997). Dados

radiométrico K-Ar e Ar-Ar reiteram a hipótese destes maciços alcalinos terem sido gerados pela passagem da placa Sul-Americana sobre o hotspot de Trindade (ULBRICH & GOMES, 1981; FERRARI & RICCOMINI, 1999; GIBSON et al., 1995; GIBSON et al., 1999) com idades variando entre ~90-55 Ma. Skolotnev et al., (2011), através de datação U-Pb em zircão do monte submarino Jaseur, obteve idade de  $29,8 \pm 6,6$  Ma. Cordani (1970), através de datação K-Ar da Ilha da Trindade, obteve idades entre  $3,69 \pm 0,30$  Ma e  $1,06 \pm 0,08$  Ma e duas idades inferiores a 0,270 Ma. A.C. Santos (2013) e A.C. Santos et al., (2015) obtiveram idades entre  $0,49 \pm 0,08$  Ma e  $0,64 \pm 0,08$  Ma para a ilha de Martin Vaz.

## TRABALHOS ANTERIORES

O trabalho pioneiro de Almeida (1959; 1961) descreveu as litologias presentes na Ilha da Trindade e gerou o mapa na escala de 1:10.000 da ilha e Scorza (1964) descreveu rochas da Ilha de Martin Vaz como ankaratritos e haüynitos. Cordani (1970) obteve as primeiras idades K-Ar das Ilhas de Trindade e Martin Vaz. Anos depois, Misusaki et al., (1998), obtiveram idades da ilha de Martin Vaz pelo método K-Ar de  $1,1 \pm 0,5$  Ma. Trabalhos de geoquímica de rocha total e química isotópica de Nd, Sr e Pb trouxeram informações da fonte mantélica para as rochas das ilhas de Trindade, Martin Vaz e para o monte submarino de Columbia (Siebel, 2000; Marques et al, 1999; (FODOR & HANAN, 2000), além de dados isotópicos e datações pelos métodos U-Th-Ra e Th-Ra-Th (SANTOS & MARQUES, 2007). Uma expedição russa coletou amostras e Skolotnev et al., (2011) descreveram a petrografia e geoquímica dos montes submarinos de Dogaressa, Davis e Jaseur. Em uma expedição realizada em 2011, coordenada pela Marinha do Brasil, foram realizadas dragagens nos montes submarinos de Montague, Jaseur, Davis, Columbia e do Banco Dogaressa. Duas expedições em 2011 foram realizadas para a Ilha da Trindade onde em uma delas foram coletadas amostras da Ilha de Martin Vaz. A. C. Santos (2013) em sua dissertação, descreve algumas idades radiométricas pelo método Ar-Ar para amostras de Martin Vaz assim como a descrição petrográfica e litogeoquímica para esta ilha e para os cinco montes submarinos contidos neste trabalho. Este trabalho corroborou para A.C. Santos et al., (2015) publicarem o mapa geológico de Martin Vaz.

## OBJETIVOS

### Objetivos Gerais

Esta tese de doutorado tem por objetivo:

- a) A interpretação mineralógica e litogeoquímica da ilha principal de Martin Vaz e dos montes submarinos;
- b) Obtenções e interpretações de datações  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  para que fosse possível contextualizar temporalmente as intrusões dos montes submarinos e da Ilha de Martin Vaz;
- c) Interpretação de geoquímica isotópica Nd e Sr dos montes submarinos e da ilha principal de Martin Vaz com o intuito de caracterizar fonte;
- d) Modelagem geoquímica de elementos traços para determinação do percentual de fusão parcial.

### Objetivos Específicos

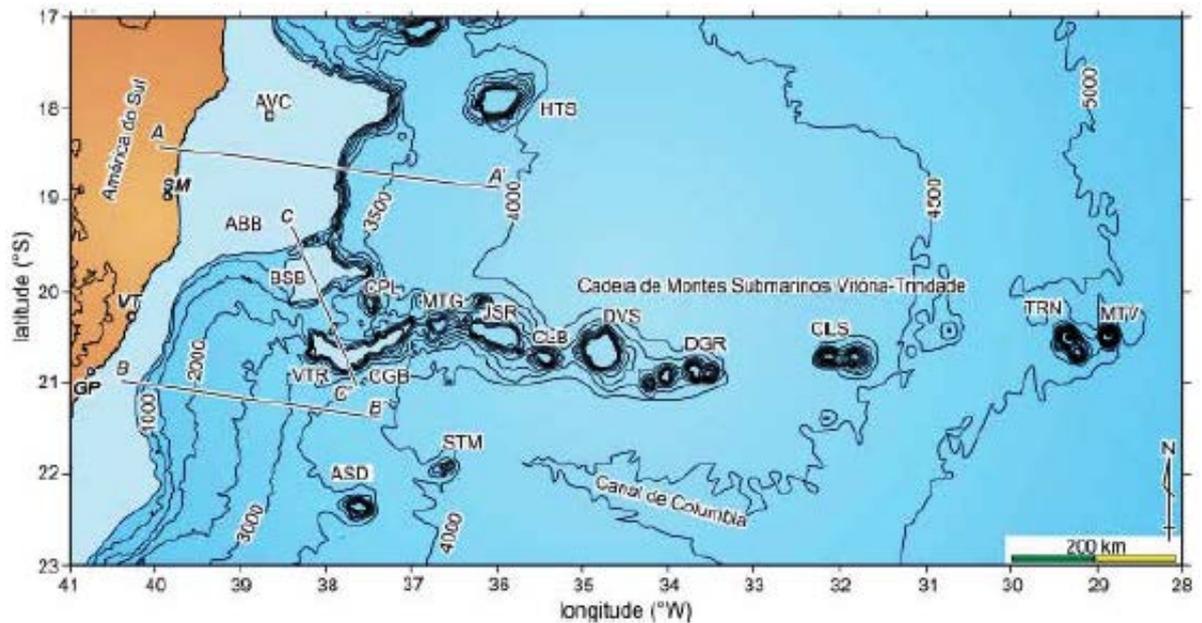
- a) Através da modelagem geoquímica, estudar a origem e a evolução dos magmas presentes na cadeia Vitória-Trindade assim como determinar o processo de equilíbrio cristal-líquido;
- b) Discriminar a fonte mantélica através das razões isotópicas de Nd e Sr e tentar determinar se o processo de geração deste magmatismo está ligado à pluma ou a processos inerentes apenas a placas tectônicas.

## LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Cadeia Vitória-Trindade é composta por diversos montes submarinos e por ilhas: A Ilha da Trindade e o Arquipélago de Martin Vaz, localizado no Oceano Atlântico Sul, cujo território pertence ao município de Vitória (ES), localizada ao longo do paralelo 20°30' S. Os montes submarinos estão dispostos de Oeste para Leste e são denominados de Montague, Jaseur, Davis, Dogaressa e Columbia e estão assentados no sopé continental (figuras 1 e 3). De todas as ilhas do arquipélago, apenas a Ilha da Trindade é habitada, sendo que a única localidade existente na ilha é o Posto Oceanográfico da Ilha da Trindade (POIT), que é uma guarni-

ção militar mantida pela Marinha do Brasil. O Posto Oceanográfico da Ilha da Trindade é o local habitado mais remoto do Brasil, estando situado a 1025 km de distância da localidade mais próxima, que é a guarnição mantida pela Marinha na Ilha de Santa Bárbara, no Arquipélago dos Abrolhos (figura 2).

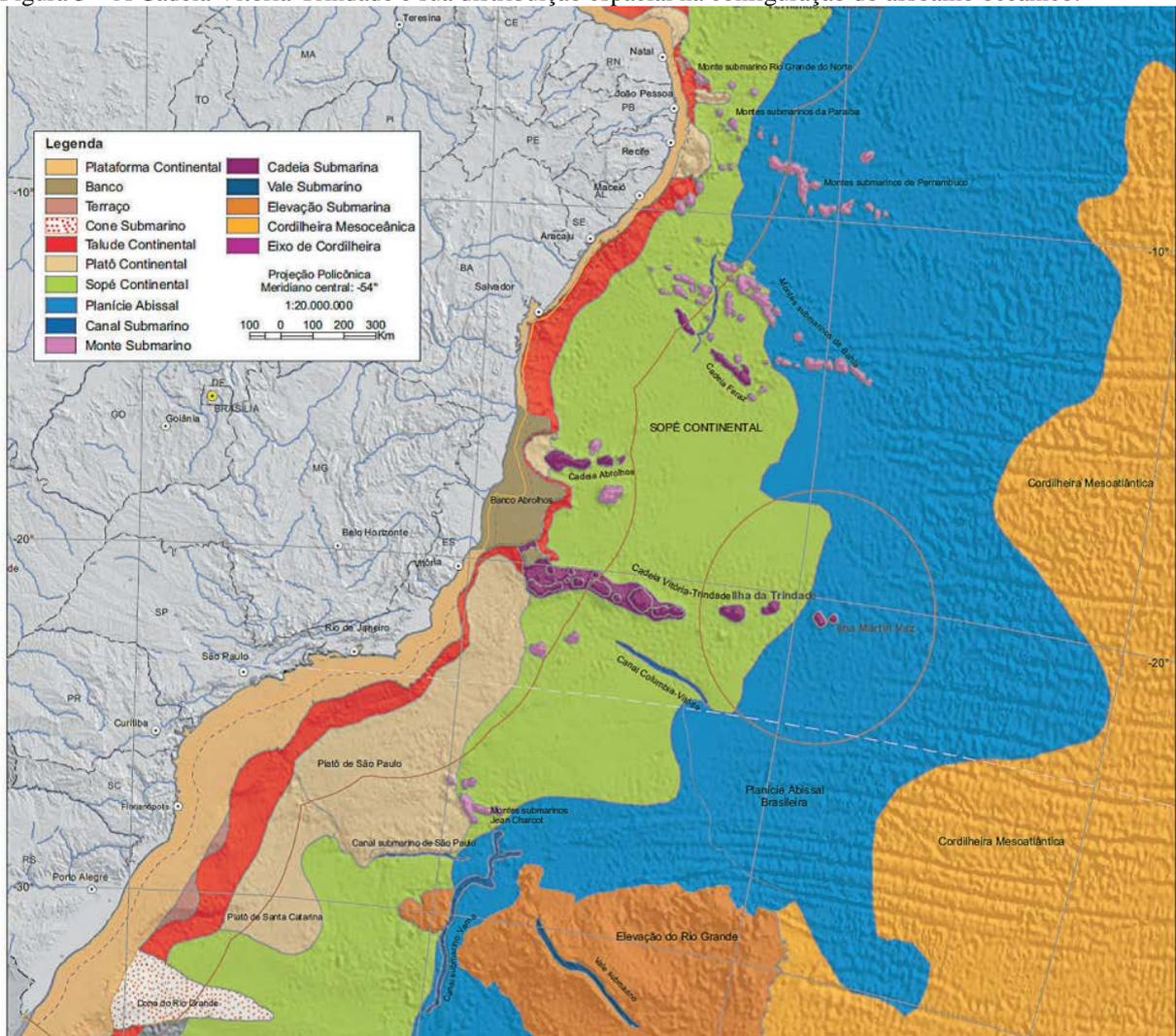
Figura 2 - Mapa batimétrico da área da Cadeia Vitória-Trindade, ES.



Legenda: Os dados topográficos são originados de TOPO elaborado com o auxílio de software original BAZ versão 1.0. MTV – Martin Vaz; TRN – Trindade; CLS – Columbia; DGR – Dogaressa; DVS – Davis; JSR – Jaseur; MTG – Montague; VTR – Vitória; ABB – Abrolhos.

Fonte: MOTOKI e MOTOKI, 2011.

Figura 3 – A Cadeia Vitória-Trindade e sua distribuição espacial na configuração do assoalho oceânico.

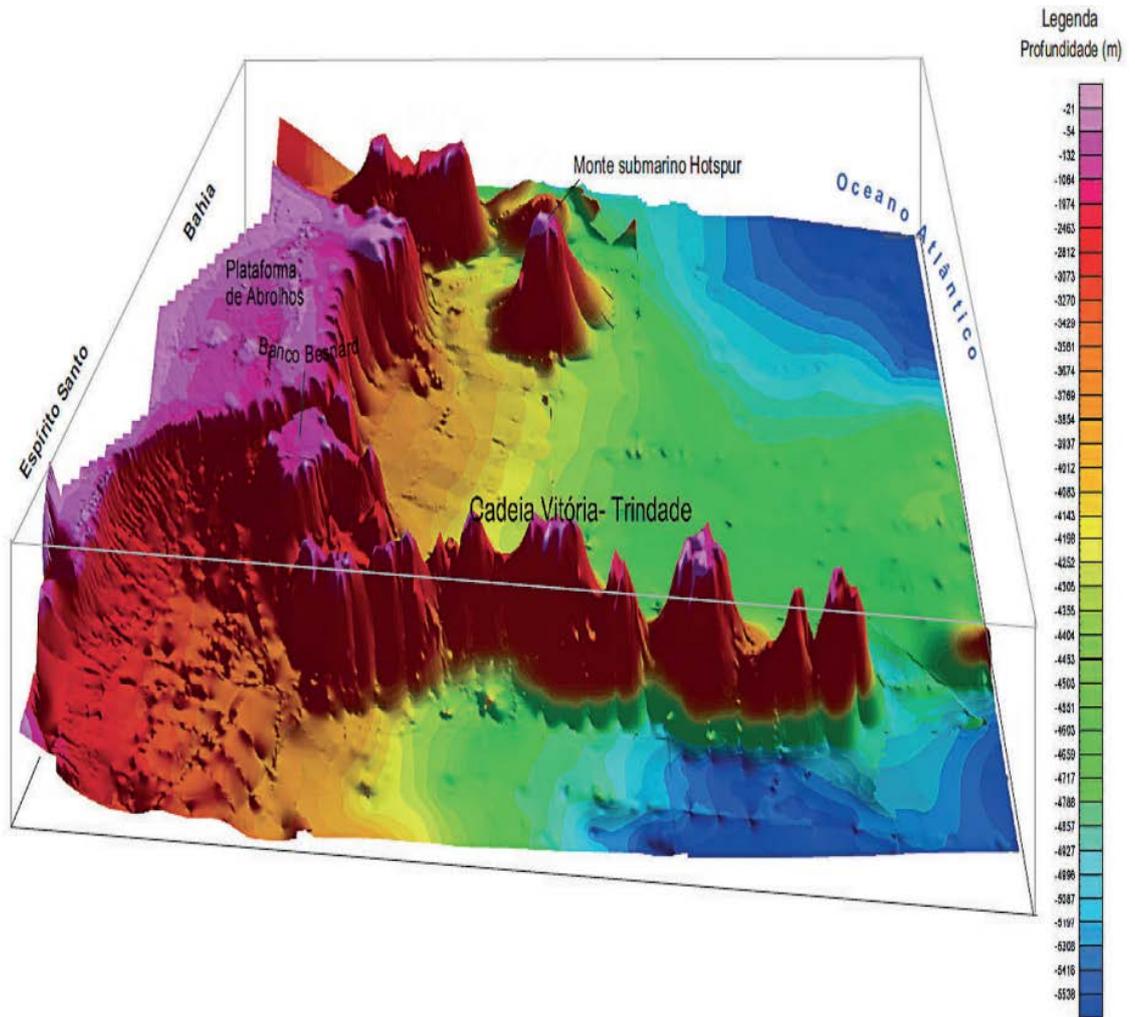


Fonte: IBGE. Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2011, p. 54.

O arquipélago é constituído por duas ilhas principais (Trindade e Martin Vaz), separadas por 48 quilômetros, que somam uma área total de 10,4 km<sup>2</sup>. As ilhas são consideradas, pelos navegadores, como um imenso paredão no meio do Atlântico.

Entre as porções aflorantes de rocha e a costa brasileira encontra-se uma cadeia de montes submarinos e *guyots* assentados 4,0-5,0 quilômetros no assoalho oceânico sendo conhecidos pelos nomes de Montague, Jaseur, Davis, Dogressa e Columbia, de oeste para leste (figura 4).

Figura 4 – Mapa batimétrico 3D da plataforma continental sudeste brasileira com ênfase para a Cadeia Vitória-Trindade.



Fonte: IBGE. Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2011, p 41.