



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Geologia

Laura Delgado Mendes

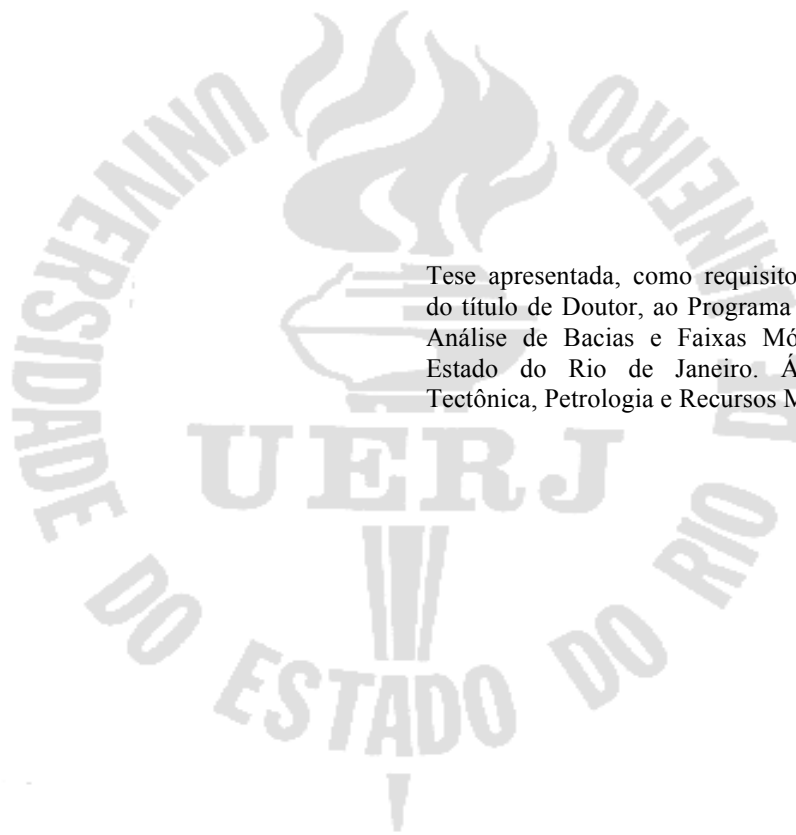
Termocronologia (U-Th)/He e reativação da margem continental do sudeste do Brasil: seção Serra da Mantiqueira - Gráben da Guanabara

Rio de Janeiro

2013

Laura Delgado Mendes

**Termocronologia (U-Th)/He e reativação da margem continental do sudeste do Brasil:
seção Serra da Mantiqueira - Gráben da Guanabara**



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

Orientadora: Prof.^a Dra. Mônica da Costa Pereira Lavalle Heilbron

Coorientadores: Prof. Dr. Kip V. Hodges

Dr. Matthijs van Soest

Rio de Janeiro

2013

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

M538 Mendes, Laura Delgado.
Termocronologia (U-Th)/He e reativação da margem continental do sudeste do Brasil: seção Serra da Mantiqueira - Gráben da Guanabara / Laura Delgado Mendes. – 2013.
214 f. : il. + anexos

Orientadora: Mônica da Costa Pereira Lavalle Heilbron
Coorientadores: Kip V. Hodges; Matthijs van Soest.

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

1. Tectônica de placas – Brasil, Sudeste - Teses. 2. Apatita - Brasil, Sudeste - Teses. I. Heilbron, Mônica da Costa Pereira Lavalle. II. Hodges, Kip V. III. Van Soest, Matthijs. IV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. V. Título.

CDU 551.242.1:549.753.1(815)

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

Assinatura

Data

Laura Delgado Mendes

**Termocronologia (U-Th)/He e reativação da margem continental do sudeste do Brasil:
seção Serra da Mantiqueira - Gráben da Guanabara**

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

Aprovada em 27 de fevereiro de 2013.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dra. Mônica da Costa Pereira Lavallo Heilbron (Orientadora)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Prof. Dr. Miguel Tupinambá
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Prof.^a Dra. Maria Lídia Vignol
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Prof. Dr. Cláudio Riccomini
Universidade de São Paulo – USP

Dr. João Marinho de Moraes Neto
Petróleo Brasileiro S.A – PETROBRAS

Rio de Janeiro

2013

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Professora Mônica Heilbron, pela orientação, pela confiança e por todo o suporte ao longo do desenvolvimento dessa tese e, especialmente, pela amizade e incentivos ao longo dessa trajetória.

Agradeço imensamente à equipe do Laboratório Geológico de Preparação de Amostras - LGPA da UERJ (Gabriela, Sandro, Silvania, Núbia e Luiz) por todo apoio e parceria.

Ao professor Luiz Guilherme do Eirado Silva pelo suporte direto e discussões ao longo do desenvolvimento da tese.

Aos professores Júlio César Almeida (UERJ), Nelson Fernandes (UFRJ), Maria Lídia Vignol (UFRGS), Cláudio Valeriano (UERJ) e Luiz Guilherme do Eirado Silva pela participação e contribuições importantes no seminário de doutorado e no exame de qualificação.

Agradeço imensamente ao professor Miguel Tupinambá pelas contribuições fundamentais na etapa de finalização do trabalho.

Aos professores Kip Hodges e Ramón Arrowsmith *da School of Earth and Space Exploration (SESE) da Arizona State University (ASU)* pela confiança e suporte oferecido desde a preparação para submissão da candidatura até a finalização do programa CAPES-FULBRIGHT 2011-2012 de Doutorado Sanduíche (*Visiting Student Researcher*).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior (CAPES), Comissão Fulbright e ao Institute of International Education (IIE) pela concessão da bolsa de doutorado sanduíche que foi essencial para a realização da pesquisa e por me oferecerem a oportunidade de viver uma experiência acadêmica, profissional e cultural inestimável.

À todos do *ASU Noble Gas Geochemistry and Geochronology Laboratories* (Kip Hodges, Matthijs van Soest, Jo-Anne Wartho, Wendy Bohon, Frances Cooper, Alka Tripathy, Kelsey Young, Byron Adams), em especial Matthijs van Soest, pelo treinamento nas rotinas do laboratório, ensinamentos sobre termocronologia (U-Th)/He e suporte direto nas análises e Professor Kip Hodges pela confiança e pelo suporte para a execução das análises.

À professora Ambrosina Gontijo-Pascutti pelo seu apoio e contribuição, e ao seu aluno Paulo Victor Figueiredo, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, a quem também agradeço pelo apoio durante a etapa de trabalho duro no LGPA.

Ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, aos meus professores (Monica Heilbron, Mauro Geraldês, Webster Mohriak, Miguel Mane, Egberto Pereira, Claudio Valeriano, Carla Semiramis/José Augusto Sapienza) pelas aulas e ensinamentos. Agradeço ao Diogo e Rafael pelo suporte e atenção em todos os momentos.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, em especial aos colegas do Instituto Multidisciplinar, por todo o apoio para o meu afastamento para que eu pudesse concluir o programa de doutorado com afastamento integral nos dois últimos anos.

Ao meu companheiro, Francisco Melo, pelo seu apoio e compreensão, à minha mãe Jandira Delgado, à toda a minha família e aos amigos especiais (Amelia Niemeyer, Neusa Mafra, Carla Santi e todos os velhos e novos amigos) por compreenderem a minha ausência em vários momentos, pelos incentivos e pela energia positiva! A tese é dedicada a vocês!

Não é a montanha que conquistamos, mas a nós mesmos
It is not the mountain we conquer but ourselves

Sir Edmund Hillary

RESUMO

MENDES, L. D. Termocronologia (U-Th)/He e reativação da margem continental do sudeste do Brasil: seção Serra da Mantiqueira - Gráben da Guanabara. 2013. 214 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

A evolução da margem continental do sudeste do Brasil tem sido discutida por diversos autores desde meados do século passado até os dias atuais, especialmente no contexto da origem e evolução dos escarpamentos e das bacias tafrogênicas. Buscou-se contribuir com novos dados sobre a evolução da área a partir da aplicação da termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He em apatita, que oferece uma sensibilidade significativa para registrar movimentações tectônicas na crosta superior. Foi possível obter idades em 107 cristais de apatita de 18 amostras do embasamento coletadas no perfil com orientação NW-SE, numa seção entre a Serra da Mantiqueira e o Gráben da Guanabara. As idades corrigidas variam entre $250,1 \pm 8,7$ Ma e $43,5 \pm 1,9$ Ma (2σ) e as não corrigidas entre $174,13 \pm 3,03$ Ma e $27,07 \pm 0,60$ Ma (1σ). O Neocretáceo, o Eocretáceo e o Paleoceno são os principais registros no conjunto de dados, em ordem de importância. No Neocretáceo, o intervalo entre 83,6 e 72,1 Ma (Campaniano) representa o maior destaque nos registros termocronológicos, embora os outros registros (Maastrichtiano e Santoniano) também estejam presentes e sejam importantes. As idades do Neocretáceo destacam a importância dos eventos tectono-magmáticos e soerguimento regional na história térmica dessa área, inclusive com idades (~86 Ma) atribuídas ao contexto de soerguimento da Serra do Mar. As idades do Eocretáceo indicam o registro de eventos térmicos mais antigos, vinculados à evolução pré-rifte. Já os dados do Paleoceno estariam associados ao evento de reativação responsável pela implantação do sistema de riftes continentais (~65 Ma) e as idades do Eoceno, restritas à borda de falha da bacia de Resende (49,7 Ma e 43,5 Ma), à reativação do sistema de riftes nessa área. A dispersão de idades foi interpretada como efeito dos danos de radiação já que muitos grãos apresentam correlação entre idade e concentração de urânio (eU). Os padrões de tempo-temperatura (t-T), definidos a partir dos modelos HeFTy calibrados para o modelo de difusão que considera os efeitos de danos de radiação nos cristais, registraram eventos de resfriamento rápido, os quais mostram correlação direta com episódios de reativação e soerguimento na margem continental e com registros nas bacias continentais e marginais. O padrão de aumento das idades com a elevação, assim como da costa em direção ao interior é observado, mas mostra-se alterado pela ocorrência de idades mais jovens associadas à complexa evolução dessa margem continental com desnivelamentos de blocos vinculados à tectônica pós-rift, numa situação que ressalta a influência dos episódios de reativação. As estimativas de denudação total variam entre 1,2 e 2,8 km. As taxas de erosão variam entre 15,2 e 35,3 m/Ma. A evolução da área indica não apenas a influência de um evento específico mas, possivelmente, uma combinação de episódios que se alternaram e/ou atuaram em conjunto em determinados períodos. Os eventos de reativação mais antigos, combinados com os mais recentes, exibem os seus remanescentes na paisagem (serras da Mantiqueira e do Mar e os grábens e bacias sedimentares) e assumem papel fundamental na evolução da área. Os registros de tais episódios podem ser observados nas histórias térmicas das rochas e nos depósitos correlativos nas bacias sedimentares marginais e intracontinentais.

Palavras-chave: Termocronologia (U-Th)/He em apatita. Reativação tectônica. Denudação. Sistema de riftes. Sudeste do Brasil.

ABSTRACT

MENDES, L. D. (U-Th)/He thermochronology and reactivation of the southeastern continental margin of Brazil: From Mantiqueira Mountains to Guanabara Graben. 2013. 214 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

This doctoral dissertation involves low-temperature thermochronologic investigations to constrain the Mesozoic and Cenozoic tectonic reactivation of the continental margin of southeast Brazil. The study area is located in a segment of the Neoproterozoic Ribeira belt in southeastern Brazil, which occupied a central position in Western Gondwana. Lately, during the Mesozoic and Cenozoic, fault zones related to the development of the continental rifts in southeast Brazil reactivated. Using apatite (U-Th)/He thermochronology (AHe), we have presented the results of analysis on 107 apatite crystals of basement samples collected from a NW–SE transect in the Mantiqueira Mountains to the Guanabara Graben, as well as from the NE–SE transverse faults. The data range from 27.07 ± 0.60 Ma to 174.13 ± 3.03 Ma (1σ) for uncorrected ages, and from 43.5 ± 1.9 Ma to 250.1 ± 8.7 Ma (2σ) for corrected ages. The Neo-Cretaceous, Eo-Cretaceous, and Paleocene are the main recorded AHe ages, in order of importance. The Eo-Cretaceous ages indicate the occurrence of older thermal events related to a pre-rifting phase (~ 121 Ma). The Neo-Cretaceous ages signify the importance of tectonic and magmatic events, and regional uplifting for the thermal history of the study area, including ages related to the Serra do Mar Mountains uplift (~ 86 Ma). Paleocene ages seem to be related to the reactivation (~ 65 Ma), which was responsible for the continental rifts in the southeastern Brazil. Finally, the Eocene ages (49.7 Ma and 43.5 Ma), which are from samples restricted to the Resende Basin border faults, indicate a continental rift reactivation. We investigated the age dispersion data, which were interpreted as an effect of radiation damage. Several samples show correlations between apatite (U-Th)/He age and effective U concentration (eU). We have applied HeFTy thermal modeling to obtain time–temperature (t–T) paths using a radiation damage diffusion model. Inverse modeling of (U-Th)/He age data suggests rapid cooling episodes for all samples. The main thermal events recorded by the HeFTy models show a direct correlation with the timing of regional tectonic events: reactivation phases, continental margin uplift, and the sedimentary record. Apatite (U-Th)/He ages increase with distance from the coast and with elevation. However, these patterns are discontinued by samples of younger ages as a result of the reactivation process of pre-existing structures in the Brazilian continental margin. The total estimated denudation range from 1.2 to 2.8 km. The erosion rates range from 15.2 to 35.3 m/My. Thus, the multi-episodic thermal events, which led to the formation of important regional tectonic and geomorphological features (Mantiqueira Mountains, Serra do Mar Mountains, grabens, and sedimentary basins), seem to play a fundamental role in the evolution of the Brazilian continental margin. The records can be found in the thermal history of rocks and its correlated deposits in the continental margin.

Keywords: Apatite (U-Th)/He thermochronology. Tectonic reactivation. Denudation. Rift system. Southeastern Brazil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da área de estudo em Modelo Digital de Elevação.....	22
Figura 2 - Visualização 3D a partir de imagem Modelo Digital de Elevação - <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> (SRTM) (sem escala) e fotografia dos principais segmentos que compõem a área de estudo.	23
Figura 3 - Localização da área de estudos com acessos e amostragem inicial.....	24
Figura 4 - Mosaico das cartas topográficas utilizadas na pesquisa (escala 1:50 000).....	26
Figura 5 - Produção de ^4He ao longo da série de decaimento do ^{238}U	33
Figura 6 - Esquema ilustrativo simplificado da relação entre produção, retenção e/ou perda de ^4He no cristal de apatita, relacionada ao aumento da taxa de difusão causada pelo aumento da temperatura ou por emissão de partículas alfa. No círculo, destacado com linhas tracejadas, observa-se uma área crítica representada por área marginal do cristal na qual é frequente a perda dos produtos do decaimento.	34
Figura 7 - Idade (U-Th)/He em apatita (AHe) como função da temperatura.	35
Figura 8 - Temperatura de fechamento (T_c) dos principais minerais usados como termocronômetros.	36
Figura 9 - Temperatura de fechamento efetiva (T_c) como função da taxa de resfriamento para os termocronômetros He, FT e Ar.	37
Figura 10 - Modelo esquemático da potencial influência dos danos de radiação na difusão do He.....	40
Figura 11 - Efeitos das distâncias de parada na retenção do He.....	42
Figura 12 - Representação esquemática da ejeção de partículas alfa.	43
Figura 13 - Exemplo de cristal de apatita coletado na área de estudo com inclusões visíveis e bolhas de ar, indicadas com as setas.	45
Figura 14 - Imagem ampliada de um cristal de apatita selecionado para as análises (amostra RE-LM-25 a006a, que representa o cristal com a idade mais jovem obtida na pesquisa, 43,5 Ma), com destaque para a geometria do cristal, com terminações bem definidas.	48
Figura 15 - Cristal de apatita analisado, com destaque para as medições comprimento e largura em ambos os lados para os cálculos de raio e comprimento.	48
Figura 16 - História térmica baseada em diferentes dados de traços de fissão em apatita.....	52

Figura 17 - Histórias térmicas de duas amostras (Bra827 e Bra797) baseadas em diferentes modelos de difusão.	53
Figura 18 - Interface do usuário no programa HeFTy.....	56
Figura 19 - Grandes escarpamentos em margens passivas.....	57
Figura 20 - Fatores tectônicos controladores da evolução do relevo em margens passivas rifteadas.....	58
Figura 21 - O perfil temperatura x profundidade como auxiliar na determinação da história das rochas.....	60
Figura 22 - Distribuição de idades em traços de fissão em apatita e relação com a distância da costa em margens passivas.	61
Figura 23 - Zonas de Apagamento Parcial (ZAP) exumadas de traços de fissão em apatita e sua relação com taxas de exumação.	63
Figura 24 - Exemplo de histórias térmicas modeladas e utilizadas para análises de taxas de denudação.	64
Figura 25 - A porção continental da placa Sul-Americana (continente Sul-Americano) com destaque para a área estável fanerozóica, a Plataforma Sul-Americana e as áreas instáveis dos Andes (Caribenhos, Setentrionais, Centrais e Meridionais) e do bloco da Patagônia.....	67
Figura 26 - Subdivisão do sistema orogênico Mantiqueira.	68
Figura 27 - Mapa tectônico do Segmento central do Sistema Orogênico Mantiqueira com destaque para a área da Figura 28.....	70
Figura 28 - Mapa Tectônico simplificado do Orógeno Ribeira com destaque para a área de estudo do presente trabalho (Figura 74).	71
Figura 29 - Perfil geológico, sem escala, transversal à área afetada pelo tectonismo cenozoico, ressaltando o caráter escalonado das estruturas e a formação da Serra do Mar e da Mantiqueira, e do Maciço Carioca, e, entre estas, depressões em forma de semi-grábens (gráben do Paraíba; Baixada Fluminense).	73
Figura 30 - Esquema da sequência de estágios evolutivos da Bacia de Santos e da área continental adjacente.	74
Figura 31 - Modelo esquemático para a origem da Serra do Mar na região entre a Bacia do Paraná e a Bacia de Santos.	76
Figura 32 - Proposta de reconstituição da Serra do Mar Cretácea - SMC.....	78
Figura 33 - Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil.....	80

Figura 34 - Formas rômbricas escalonadas migrando de SW para NE e principais depocentros com forma rômbrica associadas às estruturas mesozoico-cenozoicas.	81
Figura 35 - Esboços paleotectônicos da evolução do segmento central do <i>Rift</i> Continental do Sudeste do Brasil.	84
Figura 36 - Principais feições do Paleogeno. Bacias tafrogenéticas.	85
Figura 37 - Quadro litoestratigráfico e a evolução tectono-sedimentar do segmento central do <i>Rift</i> Continental do Sudeste do Brasil.	86
Figura 38 - Padrão de falhamentos associados à tectônica Neocretácica a Paleogênica na Zona de Transtensão de Volta Redonda.	88
Figura 39 - A Zona de Transtensão de Volta Redonda em relação aos principais elementos da tectônica Mesozoico-cenozoica.	89
Figura 40 - Mapa das principais províncias estruturais associadas com o rifte das bacias de Santos e Campos.	90
Figura 41 - Mapa de anomalias gravimétricas das áreas das bacias de Campos e Santos e área continental adjacente.	91
Figura 42- Integração em ambiente tridimensional de algumas das principais discontinuidades do continente com as falhas de transferência identificadas por Souza (2008), com destaque para as falhas FT-5 e FT-6 e sua relação com as seções sísmicas da bacia de Santos.	92
Figura 43 - Distribuição das idades K/Ar para o magmatismo básico e alcalino nas bacias sedimentares brasileiras e relação com o tempo geológico.	94
Figura 44 - Províncias alcalinas da região central-sudeste da Plataforma Brasileira e relação com as principais feições estruturais.	95
Figura 45 - Esquema da área de estudos do trabalho de Guedes et al. (2005) com destaque para a localização dos diques alcalinos.	96
Figura 46 - Comparação entre os novos dados K-Ar e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ obtidos por Guedes et al. (2005).	97
Figura 47 - (A) Mosaico de imagem Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) do Sudeste do Brasil. (B) Mapa estrutural do topo da seção vulcânica (Geoprobe TM processed image).	98
Figura 48 - Distribuição das idades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ segundo a ordem crescente proposta pelo modelo de traço de <i>hot spot</i> do Alinhamento Magmático de Cabo Frio, ou seja, localização dos pontos de leste para oeste (MOTA, 2012).	100
Figura 49 - Localização das Zonas Sismogênicas na região sudeste do Brasil.	102

Figura 50 - Epicentros de sismos na região Sudeste do Brasil.....	103
Figura 51 - Anomalias de ondas P no SE do Brasil.....	104
Figura 52 - Seção topográfica e idades de traços de fissão corrigidas.	106
Figura 53 - Histórias térmicas obtidas para as amostras da (a) Serra da Mantiqueira alta (HMMR - High Mantiqueira Mountain Range), (b) Serra da Mantiqueira Baixa (LMMR - Low Mantiqueira Mountain Range) e (c) Serra do Mar (SMMR - Serra do Mar Mountain Range).....	107
Figura 54 - Relação entre idades de Traços de Fissão em Apatita (Ma) e comprimento dos traços (μm) apresentados com destaque para período de ocorrência de eventos importantes na evolução da área.	109
Figura 55 - Distribuição das idades (Ma) de traços de fissão no sudeste do Brasil, obtidas a partir de diversos trabalhos (Gallagher et al., 1994; Ribeiro, 1996; Amaral et al., 1997; Hackspacher et al., 2003; Tello Sáenz et al., 2003; Franco et al., 2003; Carmo, 2005; Franco et al., 2005; Franco, 2006; Godoy, 2006; Silva, 2006; Hiruma et al., 2008).	110
Figura 56 - Mapa geológico simplificado indicando a localização das amostras analisadas por Cogné et al. (2011).	111
Figura 57 - Variação espacial de idades centrais de TFA e idades AHe sem correção e corrigidas e a relação com a distância da costa (a) e altitude (b).	112
Figura 58 - Síntese das histórias térmicas obtidas por Cogné et al. (2012) e relação com eventos principais na área e fases da tectônica andina.	113
Figura 59 - Domínios e Regiões Morfoestruturais do Estado do Rio de Janeiro, com destaque para a área de estudo.	115
Figura 60 - Gráfico Idade x Raio para todas as idades obtidas (Idades corrigidas = Idades F_t).	120
Figura 61 - Gráficos Idade x Raio individual por amostra (PA-LM-01, PA-LM-07, PA-LM-12, PA-LM-13, PA-LM-14 e PA-LM-15) com todas as idades obtidas (Idades corrigidas = Idades F_t).	121
Figura 62 - Gráficos Idade x Raio individual por amostra (PA-LM-16, VR-LM-18, PI-LM-19, RE-LM-23, RE-LM-25 e RE-LM-28) com todas as idades obtidas (Idades corrigidas = Idades F_t).	122
Figura 63 - Gráficos Idade x Raio individual por amostra (BA-LM-29, BA-LM-30, VR-LM-31, VR-LM-32 e PI-LM-33) com todas as idades obtidas (Idades corrigidas = Idades F_t).....	123

Figura 64 - Distribuição do total de cristais analisados considerando a concentração efetiva de urânio (eU): eU \leq 10 (baixa), eU 10-30 (moderada) e eU \geq 30 (alta) (Total de amostras = 107).	126
Figura 65 - Gráfico de correlação Idade x Concentração efetiva de urânio (eU) para todas as idades corrigidas (Erro = 2σ).....	127
Figura 66 - Gráficos Relação Idade (U-Th)/He - Concentração Efetiva de urânio (eU) (Erro = 2σ) - Amostras: PA-LM-01, PA-LM-07, PA-LM-12, PA-LM-13, PA-LM-14, PA-LM-15, PA-LM-16 e VR-LM-18.	128
Figura 67 - Gráficos Relação Idade (U-Th)/He - Concentração Efetiva de urânio (eU) (Erro = 2σ) - Amostras PI-LM-19, RE-LM-23, RE-LM-25, BA-LM-29, BA-LM-30, VR-LM-31, VR-LM-32 e PI-LM-33.	129
Figura 68 - Histograma de frequência para idades (U-Th)/He brutas e das idades corrigidas pelo fator F_T , com intervalos de 10 Ma (Total de cristais = 107).	134
Figura 69 - Histograma de frequência para todas as idades (U-Th)/He corrigidas, com intervalos definidos de acordo com a Tabela Estratigráfica Internacional (ICS, 2012) (Total de cristais = 107).	135
Figura 70 - Histograma de frequência para as idades (U-Th)/He selecionadas (com exclusão das idades muito antigas e/ou muito novas) (Total de cristais = 72).	135
Figura 71 - Detalhamento da distribuição das idades do Cretáceo (145 - 66 Ma) (Total de amostras = 59).	136
Figura 72 - Histograma de frequência para as idades (U-Th)/He médias corrigidas pelo fator F_T , com intervalos definidos de acordo com a Tabela Estratigráfica Internacional (ICS, 2012) (Total de amostras = 17).	136
Figura 73 - A) Histograma de frequência para as idades (U-Th)/He corrigidas selecionadas (Total de cristais = 39) e B) idades médias corrigidas por amostra (Total de amostras = 17). Intervalos com base na Tabela Estratigráfica Internacional (ICS, 2012).	137
Figura 74 - Idades (U-Th)/He em apatita (erro = 2σ) obtidas nesse estudo e idades TFA e (U-Th)/He de outros trabalhos (Consultar tabela de referência). Informações sobre contatos litológicos e estruturas baseadas no Mapa Tectônico da Faixa Ribeira Central (modificado de UERJ/TEKTOS).	139
Figura 75 - Correlação Idade (U-Th)/He x Elevação para todas as idades (erro = 2σ).	142
Figura 76 - Gráfico de correlação Idade (U-Th)/He x Elevação para amostras selecionadas (com exclusão de idades mais antigas e/ou mais jovens) (erro = 2σ).	142
Figura 77 - Gráfico de correlação Idade (U-Th)/He x Elevação com identificação das amostras, com exclusão de idades mais antigas e/ou mais jovens (Ma) para cada amostra (erro = 2σ).	143

Figura 78 - Gráfico de correlação Idade (U-Th)/He x Elevação, considerando idades médias (Ma) para cada amostra (erro = 1σ).....	143
Figura 79 - Gráfico de correlação Idade (U-Th)/He x Distância da costa, considerando idades médias para cada amostra (Ma) (erro = 2σ). Os números representam a identificação da amostra.	144
Figura 80 - Gráfico de correlação idade (U-Th)/He X distância da costa, considerando todas as idades corrigidas (Ma).....	145
Figura 81 - Gráfico de correlação idade (U-Th)/He X distância da costa, considerando idades selecionadas (Ma).	145
Figura 82 - Perfil topográfico da área de estudos no traçado de algumas amostras com idades médias e erro de 2σ	146
Figura 83 - Gráficos Idade - eU com destaque em amarelo para os cristais selecionados e utilizadas no processo de modelagem das história térmicas.....	148
Figura 84 - Modelo HeFTy da amostra PA-LM-14.	153
Figura 85 - Modelo HeFTy da amostra RE-LM-23 (23.4.1).....	155
Figura 86 - Modelo HeFTy da amostra RE-LM-23 - HeFTy 23.6.....	156
Figura 87 - Modelo HeFTy da amostra RE-LM-28 - HeFTy 28.5.....	158
Figura 88 - Modelo HeFTy da amostra BA-LM-30 - HeFTy 30.4.	160
Figura 89 - Modelo HeFTy da amostra BA-LM-30 - HeFTy 30.6.	161
Figura 90 - Modelo HeFTy da amostra VR-LM-31 - HeFTy 31.6.	162
Figura 91 - Modelo HeFTy da amostra PI-LM-33 - HeFTy 33.5.	163
Figura 92 - Gradientes geotérmicos no Estado do Rio de Janeiro (GOMES e HAMZA, 2005), com destaque para a área de estudo.....	166
Figura 93 - Perfil topográfico da área de estudo integrado com as estimativas de denudação total das amostras RE-LM-28, BA-LM-30, VR-LM-31, PI-LM-33 e PA-LM-14 (Tabela 5), baseadas em gradiente geotérmico de $30^{\circ}\text{C}/\text{Km}$. No perfil inferior estão apresentadas as amostras que cruzam o perfil, com as respectivas idades médias (Ma), com erro de 2σ	166
Figura 94 - Carta estratigráfica da Bacia de Santos com integração dos dados apresentados nesse trabalho.....	182
Figura 95 - Topografia digital e batimetria derivada de gravimetria pela imagem de satélite do Sudeste do Brasil. Interpretação para os traçados do rio Paraíba do Sul ancestral e moderno.	Error! Bookmark not defined.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores que podem contribuir para variações nas idades (U-Th)/He em apatita de mesma amostra.	32
Tabela 2 - Domínios e Unidades morfoestruturais do Estado do Rio de Janeiro, com destaque em amarelo para as regiões morfoestruturais e unidades de relevo identificadas na área de estudo.	115
Tabela 3 - Tabela de referências do mapa de idades.	140
Tabela 4 - Valores de GOF (<i>Goodness of fit</i>) para um grupo de amostras modeladas.	151
Tabela 5 - Denudação total estimada a partir de paleotemperatura (T) modelada a partir da definição do padrão de tempo-temperatura no programa HeFTy e calculada para diferentes gradientes geotérmicos (G=30, 35 e 50°C/km).	167
Tabela 6 - Estimativas de taxas de erosão médias para diferentes gradientes geotérmicos (G=30, 35 e 50°C/km). Taxas de erosão (E) calculadas em km/Ma e em m/Ma.	167
Tabela 7 - Integração de diferentes dados associados à importantes eventos para a evolução tectono-geomorfológica do Sudeste do Brasil.	170
Tabela 8 - Integração de dados de Traços de Fissão em Apatita (TFA) para a região Sudeste do Brasil, apresentando idades obtidas por diferentes estudos e características dos eventos termiais associados.	171

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	16
1	OBJETIVOS	20
1.1	Objetivo geral	20
1.2	Objetivos específicos	20
2	MÉTODOS E TÉCNICAS	21
2.1	Introdução	21
2.2	Seleção e delimitação da área de estudo	21
2.3	Levantamento e análise de informações preexistentes	24
2.3.1	<u>Levantamento bibliográfico</u>	25
2.3.2	<u>Levantamento de material cartográfico e de sensores remotos</u>	25
2.4	Instrumentos e softwares utilizados	25
2.5	Atividades de campo	27
2.6	Atividades de laboratório	27
2.7	Geologia de campo	28
2.7.1	<u>Litologias</u>	28
2.7.2	<u>Estruturas</u>	28
2.8	Termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He em apatita (AHe)	28
3	TERMOCRONOLOGIA DE BAIXA TEMPERATURA (U-Th)/He EM APATITA (AHe)	29
3.1	Fundamentos teóricos	29
3.1.1	<u>Produção do hélio (He)</u>	33
3.1.2	<u>Zona de retenção parcial (ZRP)</u>	34
3.1.3	<u>Temperatura de fechamento (Tc)</u>	36
3.1.4	<u>Difusão do hélio (He) em apatita</u>	38
3.1.5	<u>Danos da radiação ("radiation damage")</u>	39
3.1.6	<u>Emissão de partículas alfa (α)</u>	41
3.1.7	<u>Efeitos do zonamento</u>	43
3.1.8	<u>Inclusões ricas em urânio (U) e tório (Th)</u>	44
3.1.9	<u>Efeitos do tamanho do cristal</u>	45
3.2	Procedimentos analíticos	46
3.2.1	<u>Preparação primária</u>	46
3.2.2	<u>Preparação secundária</u>	47
3.2.3	<u>Extração e determinação da concentração de ^4He</u>	49
3.2.4	<u>Determinação das concentrações de urânio e tório</u>	49
3.2.5	<u>Cálculo e correção de idades</u>	50
3.3	Modelagem das histórias térmicas a partir de dados de termocronologia de baixa temperatura	51
3.3.1	<u>Fundamentos teóricos</u>	51
3.3.2	<u>O programa HeFTy para modelagem das histórias térmicas</u>	54
3.4	Termocronologia e a evolução de margens continentais passivas	57
3.4.1	<u>Fundamentos teóricos</u>	57
3.4.2	<u>Aplicação da termocronologia de baixa temperatura na análise do relevo</u>	62

4	ÁREA DE ESTUDO: CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO	66
4.1	Introdução	66
4.2	Evolução geotectônica do embasamento cristalino	66
4.3	Evolução Tectônica do Sudeste brasileiro no Mesozoico e Cenozoico	72
4.3.1	<u>Modelos de evolução tectônica para o Fanerozóico</u>	72
4.3.2	<u>O Sistema de Riftes</u>	79
4.3.3	<u>Zonas de transferência</u>	87
4.3.4	<u>Manifestações ígneas associadas</u>	93
4.3.5	<u>Etapa neotectônica: Sismicidade e tensões no contexto regional</u>	100
4.4	Aplicação da termocronologia de baixa temperatura na região Sudeste do Brasil: Trabalhos anteriores	104
4.5	Contexto geomorfológico	114
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	116
5.1	Introdução	116
5.2	Termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He em apatita aplicada à margem continental sudeste do Brasil na Seção Serra da Mantiqueira - Gráben da Guanabara	116
5.2.1	<u>Amostragem</u>	116
5.2.2	<u>Idades (U-Th)/He</u>	117
5.3	Análise da dispersão das idades AHe	118
5.3.1	<u>Relação idade AHe x tamanho do cristal</u>	118
5.3.2	<u>Danos da Radiação e relação com a concentração efetiva de urânio (eU)</u>	125
5.3.3	<u>Considerações sobre a dispersão de idades</u>	131
5.4	Distribuição cronológica dos dados AHe	133
5.5	Distribuição espacial dos dados AHe	138
5.5.1	<u>Perfil idade AHe x elevação</u>	141
5.5.2	<u>Relação entre idade AHe e distância da costa</u>	144
5.6	Modelagem das histórias térmicas a partir da termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He em apatita no contexto das reativações tectônicas do Mesozoico-Cenozoico	147
5.7	Estimativas de denudação a partir de termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He em apatita	165
5.8	Síntese dos resultados	169
5.8.1	<u>Termocronologia do Eocretáceo</u>	172
5.8.2	<u>Termocronologia do Neocretáceo</u>	175
5.8.3	<u>Termocronologia do Paleogeno</u>	177
5.8.4	<u>Relação entre a margem continental e as bacias marginais</u>	180
5.8.5	<u>Reativações recentes?</u>	185
	CONCLUSÕES	189
	PROPOSTAS DE DESDOBRAMENTOS DA PESQUISA	195
	REFERÊNCIAS	196
	ANEXO A - Fotomicrografias e medidas dos cristais de apatita analisados	
	ANEXO B - Síntese dos dados analíticos	
	ANEXO C -Modelos HeFTy	

INTRODUÇÃO

Problemática e Justificativa

A evolução de margens continentais passivas é tema que desperta grande interesse da comunidade científica. Embora muitos avanços sejam notáveis no sentido de uma melhor interpretação sobre os modelos tectônicos evolutivos dessas áreas, ainda há muitas questões em aberto, principalmente com relação àquelas que exibem feições topográficas que indicam uma evolução geodinâmica complexa.

A plataforma Sul-americana foi submetida a diversos períodos de instabilidade crustal com variabilidade espacial e temporal. A margem atlântica da América do Sul, a qual é reconhecida como uma margem rifteada, sofreu deformação significativa durante e após o rifteamento intracontinental (BROWN et al., 2000). Nesse sentido, diversos estudos foram e ainda estão sendo conduzidos para elucidar diferentes aspectos sobre a sua evolução, especialmente no sentido de discutir a condição de "margem passiva" atribuída à margem continental brasileira, na medida em que exhibe indicadores importantes que apontam a sua reativação em distintos episódios desde a ruptura continental.

A importância da tectônica do Mesozoico-Cenozoico na evolução do setor da margem "passiva" e rifteada na região Sudeste do Brasil está registrada de forma notável com a formação do Sistema de *Rifts* da Serra do Mar (ALMEIDA, 1976), *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) (RICCOMINI, 1989) ou Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil (ZALÁN e OLIVEIRA, 2005), estruturação que se desenvolveu ao longo das antigas linhas de fraqueza do Pré-Cambriano e que resultou em um complexo padrão de falhamentos vinculados a alterações nos campos de tensões. O sistema de riftes gerado é composto por bacias segmentadas e delimitadas por falhas normais com orientação NE, associadas às zonas de transferências com componentes *strike slip* e normal que afetam significativamente a topografia e influenciam diretamente a evolução de bacias, transporte de sedimentos e estratigrafia (GAWTHORPE e HURST, 1993) e que se estendem para a bacia de Santos (MOHRIAK et al., 1995). Eventos tectônicos que reativaram estruturas pretéritas são apontados como os responsáveis pela intensificação dos processos de denudação em determinados períodos, fornecendo consideráveis volumes de sedimentos para as bacias marginais, assim como pela preservação de superfícies de aplainamento geradas em períodos de estabilidade tectônica (ALMEIDA, 1976).

A área de estudo situa-se nesse contexto e compreende um setor definido transversalmente às estruturas pré-cambrianas, numa faixa que segue da Serra da Mantiqueira até a Baixada da Guanabara, englobando os riftes do Paraíba do Sul e Litorâneo e grábens associados. Este sistema de riftes destaca-se pelas estruturas que revelam evolução tectônica com diferentes pulsos de deformação e magmatismo que estão registrados na margem continental e mostram relação direta com a evolução das bacias sedimentares adjacentes (ZALÁN e OLIVEIRA, 2005).

A área selecionada apresenta diversos elementos que indicam o controle das estruturas do embasamento e a evolução associada à tectônica distensional Wealdeniana (ALMEIDA, 1967) ou Sul-Atlântica (SCHOBENHAUS e CAMPOS, 1984). Eventos de reativação neotectônicos, responsáveis pela geração de falhas cenozóicas e pelo condicionamento da evolução morfodinâmica da paisagem do sudeste (HASUI, 1990a) também são identificados, a partir de feições estruturais, morfológicas e sedimentares (GONTIJO, 1999; RICCOMINI, 1989; SALVADOR e RICCOMINI, 1995; entre outros) e dos registros de sismicidade (ASSUMPTÃO, 1998; HASUI et al., 1982; MIOTO e HASUI, 1982).

A introdução e o desenvolvimento de métodos como o de “termocronologia”, que oferecem informações sobre a história térmica das rochas, minerais e terrenos geológicos (REINERS e EHLERS, 2005) têm contribuído significativamente para os avanços na interpretação da história das rochas e dos eventos tectônicos associados (BISHOP, 2007; EHLERS e FARLEY, 2003; JAPSEN et al., 2009; LISKER et al., 2009; REINERS et al., 2005; REINERS e SHUSTER, 2009; entre outros).

No Brasil, desde a década de 90, algumas pesquisas têm utilizado a termocronologia para oferecer novos dados sobre a evolução da região Sudeste a partir de métodos como o de traços de fissão em apatita (GALLAGHER et al., 1994; HACKSPACHER et al., 1999; HACKSPACHER et al., 2004; HIRUMA, 2007; RIBEIRO et al., 2003; SILVA, 2006; TELLO SAENZ et al., 2003; VIGNOL-LELARGE et al., 1994; entre outros) e, mais recentemente, utilizando o sistema (U-Th)/He (COGNÉ et al., 2011; COGNÉ et al., 2012; RIBEIRO, 2007) e, dessa forma, têm contribuído significativamente com importantes dados e interpretações sobre a evolução dessa área, assim como também têm apontado a necessidade de desenvolvimento de mais estudos.

Nesse sentido, a proposta da pesquisa foi investigar os eventos de reativação da margem continental do sudeste do Brasil ao longo do Mesozoico-Cenozoico, na seção Serra da Mantiqueira - Gráben da Guanabara, a partir do método de termocronologia (U-Th)/He em apatita (AHe), considerando-se as suas potencialidades devido à maior sensibilidade para o

registro de eventos de baixas temperaturas (GREEN et al., 2006; HOUSE et al., 1997). Nessa perspectiva, pretende-se identificar eventos de reativação tectônica, bem como estudar a interação soerguimento/denudação com base nos dados termocronológicos.

Destaca-se, ainda, o contexto de intenso uso e ocupação da área de estudo, representada por parte da Região Metropolitana do Rio de Janeiro e Região Centro Sul do Estado homônimo, que apresentam expressivo desenvolvimento urbano-industrial e contingente populacional distribuído de forma não planejada, desordenada, em áreas com morfologia acidentada e que evidenciam, por sua vez, numerosas situações de risco geológico/geomorfológico.

A pesquisa de tese vincula-se ao desenvolvimento dos projetos “Tectônica rúptil mesozoica e magmatismo associado: estudo integrado do embasamento adjacente à Bacia de Santos, S-SE do Brasil” (Convênio Petróleo Brasileiro S.A - PETROBRÁS e Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ - N°0050.0022710.06.4) coordenado pelos professores Dra. Mônica da Costa Pereira Lavalle Heilbron (UERJ) e Dr. Júlio Cesar Horta de Almeida (UERJ) e “Evolução Tectono-Magmática do embasamento *onshore* das Bacias de Santos, Campos e Espírito Santo, SE Brasil” (FAPERJ, Processo E-26/110.368/2007), coordenado pela professora supracitada.

A pesquisa também se associa à parceria estabelecida com os professores Kip Hodges e Ramón Arrowsmith da *Arizona State University* (ASU) e ao suporte oferecido pelo Programa CAPES-FULBRIGHT 2011-2012 de Doutorado Sanduíche (*Visiting Student Researcher*). O apoio dos professores e pesquisadores da ASU foi fundamental para a submissão da proposta de participação da doutoranda no programa, assim como para o seu treinamento nas rotinas do método e execução das análises termocronológicas no *ASU Noble Gas Geochemistry and Geochronology Laboratories* e no *W. M. Keck Foundation Laboratory for Environmental Geochemistry* da *School of Earth and Space Exploration* da *Arizona State University*, sendo o primeiro coordenado pelo Prof. Kip Hodges.

Principais questionamentos

Os seguintes questionamentos foram focos de investigação na pesquisa:

1. Qual é a contribuição do método de termocronologia (U-Th)/He em apatita para a análise dos processos de reativação da margem continental sudeste do Brasil e sua evolução ao longo do Mesozoico-Cenozoico?
2. Qual é a relação entre os eventos termo-tectônicos e denudacionais observados na margem continental a partir do termocronômetro (U-Th)/He com os registros das bacias marginais e intracontinentais?

Estrutura da tese de Doutorado

A presente tese compreende cinco capítulos principais. Os **capítulos** inicial e final são capítulos de introdução e conclusões. O **capítulo 1** apresenta os objetivos gerais e específicos. O **capítulo 2** apresenta uma visão geral dos métodos e técnicas utilizados. No entanto, o detalhamento do método de termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He em apatita utilizado da pesquisa será apresentado separadamente no **capítulo 3**, considerando-se a sua importância para a pesquisa desenvolvida. No **capítulo 4** busca-se contextualizar a área de estudos regionalmente, assim como com relação aos trabalhos anteriores que utilizaram métodos de termocronologia para estudar a evolução no contexto regional. Os resultados estão apresentados no **capítulo 5**, integrando as discussões motivadas pelos dados obtidos; Tal capítulo foi compartimentado de forma a: **1)** destacar os resultados analíticos da aplicação do método de termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He em apatita e avaliar a consistência dos dados obtidos; **2)** apresentar e discutir os modelos gerados a partir da modelagem das histórias térmicas das amostras; e **3)** analisar os dados de denudação obtidos a partir dos cálculos efetuados; **4)** sintetizar os resultados, considerando o significado dos dados no contexto regional e local. Adicionalmente, o **capítulo final** visa apontar possíveis desdobramentos do trabalho no sentido de explorar questões em aberto e oferecer propostas para um melhor aproveitamento dos resultados a partir da integração com outros dados e métodos que possam ser incorporados e explorados.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é investigar e definir eventos de reativação do Mesozoico-Cenozoico da margem continental do sudeste do Brasil, na seção Serra da Mantiqueira - Gráben da Guanabara, e a sua relação com a evolução da área a partir da termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He em apatita. Dessa maneira, busca-se contribuir para os estudos sobre a evolução tectônica da Faixa Ribeira e sobre a evolução morfotectônica do Sudeste do Brasil.

1.2 Objetivos Específicos

Para se alcançar o objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Produzir novos dados a partir do método de termocronologia (U-Th)/He em cristais de apatita e avaliar a sua aplicabilidade;
- Identificar os eventos de reativação ocorridos na área de estudo com base nos dados de termocronologia (U-Th)/He em apatita;
- Analisar a influência das estruturas transversais com orientação NW-SE que compartimentam o sistema de riftes cenozoicos;
- Aplicar a modelagem térmica com vistas ao reconhecimento/reconstrução das histórias térmicas das amostras analisadas;
- Estimar as taxas de denudação na área a partir do termocronômetro (U-Th)/He em apatita e comparar com dados preexistentes;

2 MÉTODOS E TÉCNICAS

2.1 Introdução

O desenvolvimento da pesquisa envolveu procedimentos e técnicas da Geologia Estrutural, Geocronologia e Morfotectônica. Foram integrados trabalhos de campo, gabinete e laboratório, segundo as atividades descritas a seguir. Tais procedimentos serão apresentados nesse capítulo considerando-se a fundamentação teórica necessária sobre os procedimentos metodológicos com vistas a atingir os objetivos da pesquisa.

2.2 Seleção e delimitação da área de estudo

A definição da área de estudo da pesquisa foi motivada pelo interesse em aprofundar o conhecimento sobre a evolução tectônica e geomorfológica do embasamento aflorante da Bacia de Santos, situado no setor central da Faixa Ribeira. Contribuir com considerações sobre o conhecimento da evolução da margem continental do Sudeste do Brasil e, agregar novos dados sobre a evolução da região no Mesozoico-Cenozoico motivaram a escolha da área alvo, a qual engloba uma faixa NW-SE entre as Serra da Mantiqueira, Serra do Mar e Baixada da Guanabara, na região sul fluminense (Figuras 1 e 2).

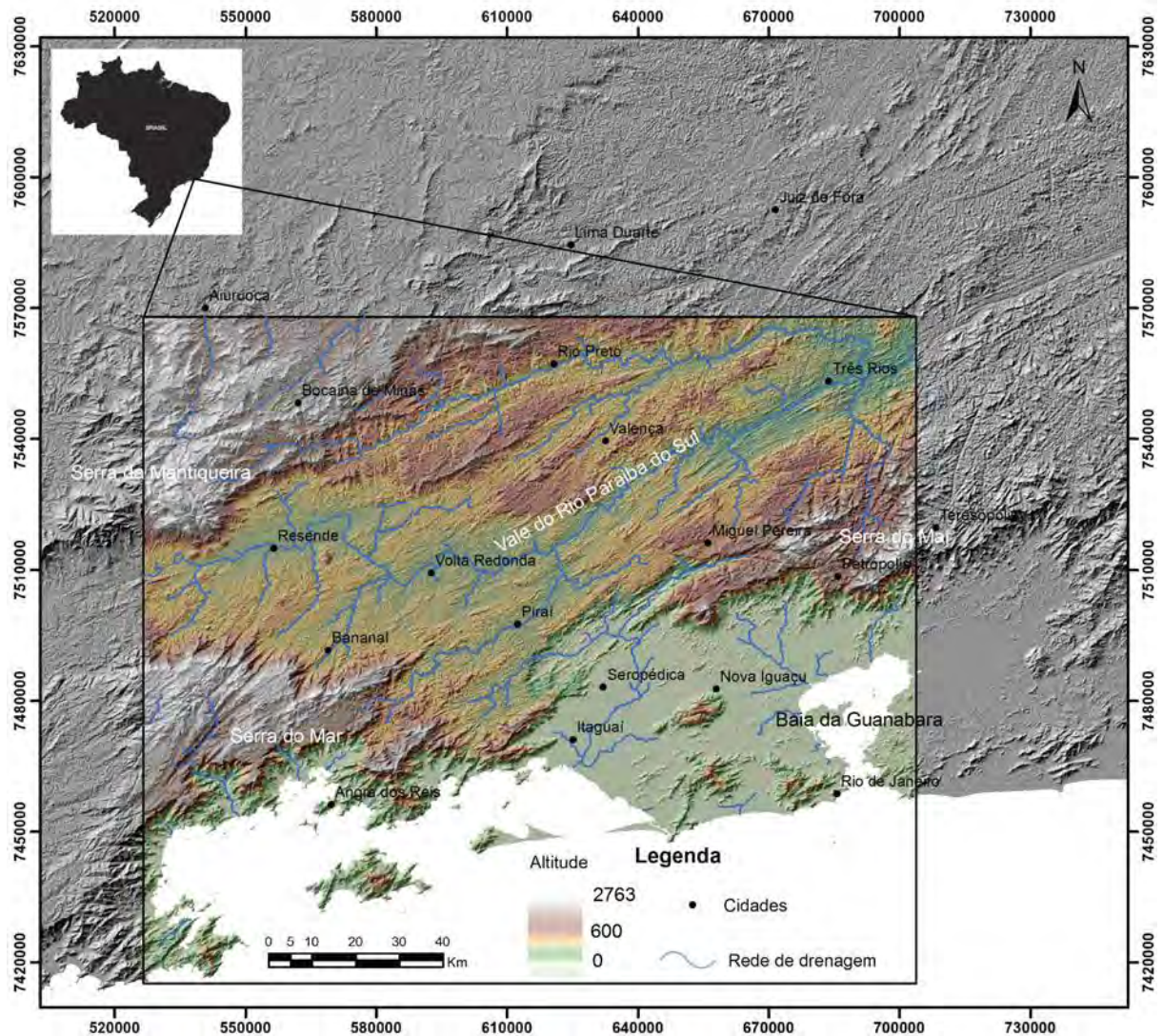
O trabalho publicado por Valeriano e Heilbron (1993), no início da década de 1990, também motivou a definição da área de estudo, na medida em que aponta questões em aberto sobre uma importante área do setor central da Faixa Ribeira, a denominada "Zona de Transtensão de Volta Redonda", e destaca a sua relevância no contexto da evolução do Sistema de *Rifts* da Serra do Mar (ALMEIDA, 1976).

Dessa forma, a evolução dessa área, definida pela configuração das estruturas associadas à Zona de Transtensão de Volta Redonda, no contexto das reativações mesozoico-cenozoicas, definem a área de estudo espacial e temporalmente. Tal contexto estimulou a elucidação das novas questões que nortearam o desenvolvimento da pesquisa.

A área de estudo abrange uma área do estado do Rio de Janeiro localizada, aproximadamente, entre os paralelos de 22° e 23° S e os meridianos de 44° e 45° W, distribuindo-se a partir de áreas com topografia elevada associadas ao Planalto da Mantiqueira

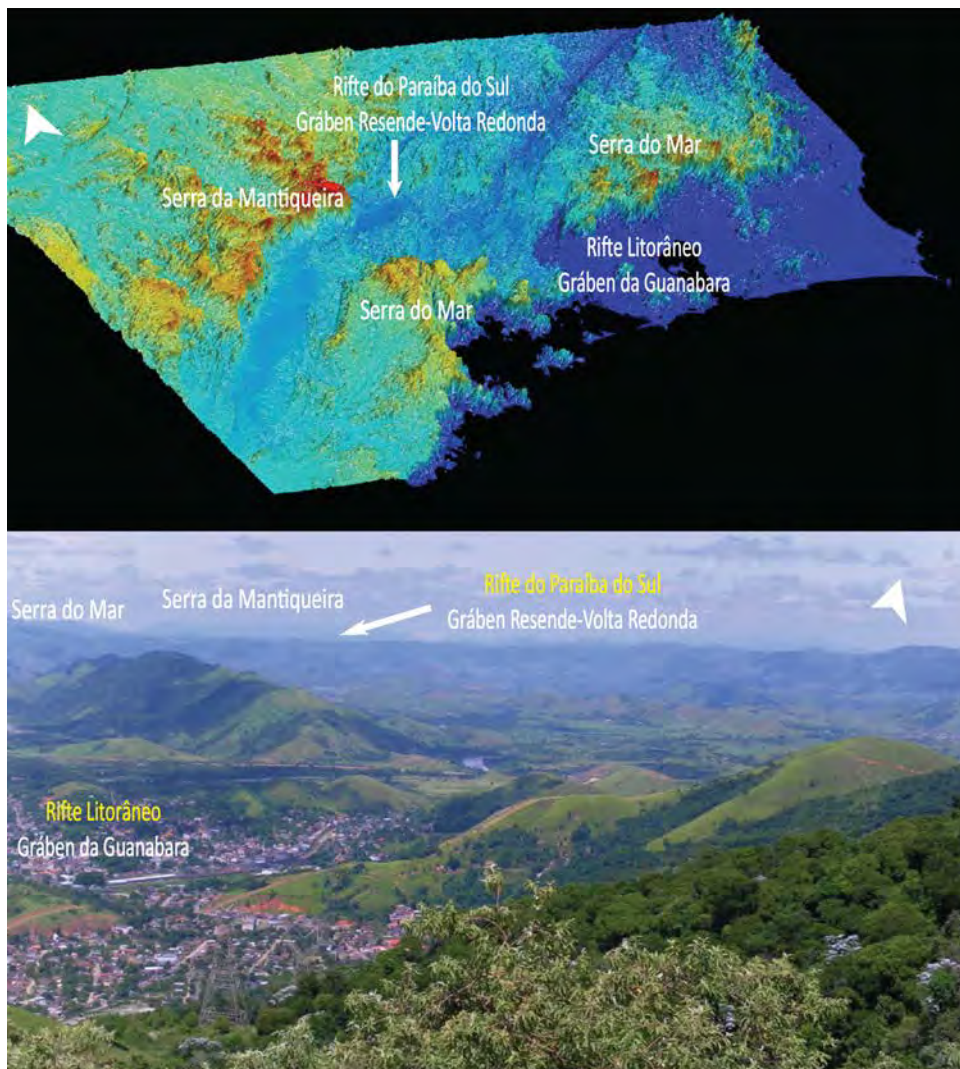
até as áreas deprimidas do Gráben da Guanabara, compreendendo, portanto, importantes segmentos do sistema de riftes cenozóicos (Figuras 1 e 2).

Figura 1 - Localização da área de estudo em Modelo Digital de Elevação



Fonte: Modelo Digital de elevação gerado a partir de imagem SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* (NASA/USGS/CGIAR).

Figura 2 - Visualização 3D a partir de imagem Modelo Digital de Elevação - *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (sem escala) e fotografia dos principais segmentos que compõem a área de estudo.

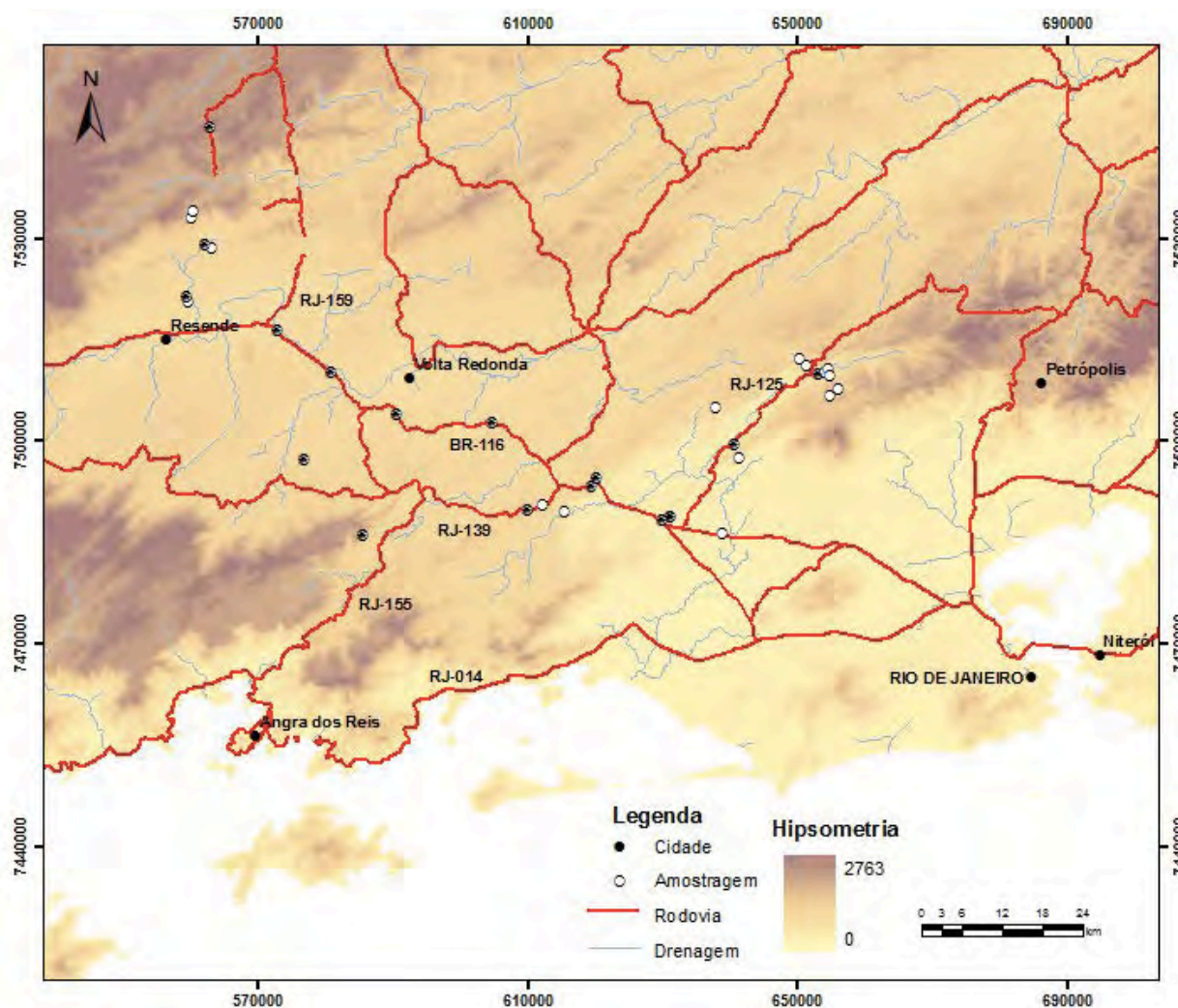


Legenda: A fotografia foi feita com visada NW a partir do Pico da Coragem (Japeri - RJ), numa altitude de 503 m. A área de estudo de tese está compreendida entre a Serra da Mantiqueira, gráben de Resende-Volta Redonda, Serra do Mar e Gráben da Guanabara, considerando a classificação das principais estruturas do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil.

Fonte: Gerado a partir de imagem SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* (NASA/USGS/CGIAR).

Considerando as Regiões de Governo do Estado do Rio de Janeiro (CIDE, 2009), a área pesquisada abrange parte das regiões Metropolitana, Centro-sul Fluminense, Médio Paraíba e Costa Verde. Os principais acessos à área, partindo da cidade do Rio de Janeiro, são realizados pelas rodovias federais Presidente Dutra (BR-116), rodovias estaduais e municipais, assim como estradas vicinais (Figura 3).

Figura 3 - Localização da área de estudos com acessos e amostragem inicial.



Legenda: Os círculos preenchidos com asterístico indicam a localização das amostras utilizadas nas análises de termocronologia (U-Th)/He em apatita apresentadas nesse trabalho. Hipsometria gerada a partir de imagem Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (NASA/USGS/CGIAR).

2.3 Levantamento e análise de informações preexistentes

Todas as etapas foram executadas a partir de pesquisa bibliográfica temática, conceitual e metodológica, assim como cartográfica, que precedeu e acompanhou as etapas desenvolvidas em gabinete, campo e laboratório.

2.3.1 Levantamento Bibliográfico

O levantamento bibliográfico temático, conceitual e metodológico é uma etapa de execução da pesquisa que precedeu e acompanhou a execução das outras etapas, de acordo com as necessidades apresentadas. O enfoque da pesquisa bibliográfica se referiu a trabalhos relacionados aos temas a serem discutidos, considerando abordagens associadas ao contexto tanto local como regional ou mesmo internacional que poderiam ser utilizadas no desenvolvimento da pesquisa.

2.3.2 Levantamento de material cartográfico e de sensores remotos

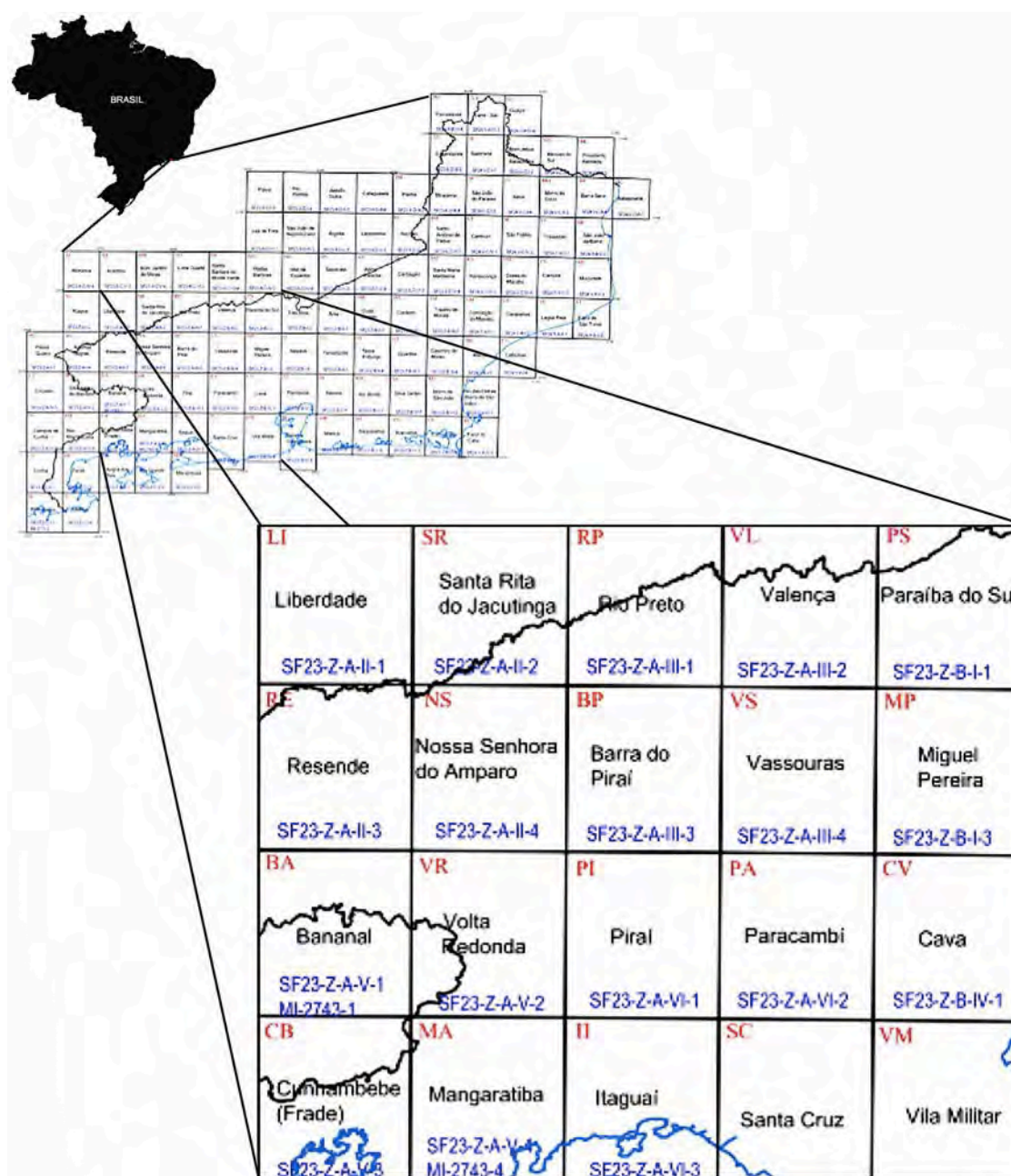
O material cartográfico utilizado constitui-se por:

- Cartas topográficas na escala de 1:50.000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (Figura 4).
- Mapeamento geológico realizado pelo TEKTOS-UERJ (Grupo de Pesquisa em Geotectônica da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro), vinculadas ao Mapa Tectônico da Faixa Ribeira Central (FGEL-UERJ-TEKTOS);
- Imagens de satélite do projeto *Shuttle Radar Topography Mission - Digital Elevation Database* (DEM - SRTM), 90 m, obtidas na página do *Consortium for Spatial Information* (<http://www.cgiar-csi.org/>) (NASA/USGS/CGIAR).
- Mapa geomorfológico (SILVA, 2002).

2.4 Instrumentos e softwares utilizados

Foram utilizados os seguintes softwares ao longo de desenvolvimento da pesquisa: *Arc GIS* (ESRI); *HeFTy* (versão 1.7.5 - Julho/2012) (KETCHAM, 2012); *Microsoft Office* (Word/Excel); *Adobe Illustrator*, *Adobe Acrobat X Pro*; e *Google Earth* (<http://earth.google.com>).

Figura 4 - Mosaico das cartas topográficas utilizadas na pesquisa (escala 1:50 000).



Fonte: Modificado do mosaico do Laboratório de Estudos Tectônicos (LET-TEKTOS) da UERJ.

2.5 Atividades de campo

As atividades em campo objetivaram a coleta de amostras para as análises termocronológicas e a observação das condições associadas ao quadro geológico-estrutural e geomorfológico. E com o suporte de material cartográfico preexistente e de procedimentos e técnicas da Geologia Estrutural e Tectônica foram observados afloramentos e reconhecidas estruturas como foliação, planos de falhas, inclusive com estrias e indicadores cinemáticos, fraturas e diques.

Foram coletadas 33 amostras de rochas em trabalhos de campo, cujo o peso variou entre 11 a 38 Kg, de acordo com o tipo de rocha e o nível de dificuldade para realização da coleta. Os pontos de coleta foram definidos considerando-se, essencialmente, os desnivelamentos topográficos na área de estudos, já que são importantes elementos nas análises termocronológicas. Em alguns casos, a amostragem foi realizada em pontos próximos de outros, com o objetivo de minimizar os riscos, tendo em vista que algumas amostras poderiam não conter cristais de apatita para as análises ou mesmo apresentar grãos inadequados que poderiam comprometer os resultados, caso fossem utilizados inapropriadamente. A figura 3 apresenta a amostragem inicial realizada em campo, assim como destaca as amostras que foram selecionadas para as análises de termocronologia (U-Th)/He em apatita.

2.6 Atividades de laboratório

As atividades de laboratório incluíram a preparação das amostras coletadas em campo e posterior execução das análises baseadas no método de termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He. A preparação inicial das amostras foi realizada no Laboratório Geológico de Preparação de Amostras - LGPA, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. As análises termocronológicas foram realizadas nas instalações do *ASU Noble Gas Geochemistry and Geochronology Laboratories* e no *W. M. Keck Foundation Laboratory for Environmental Geochemistry* da *School of Earth and Space Exploration* da *Arizona State University*, a partir de colaboração iniciada entre os professores Mônica Heilbron, orientadora da tese, e Kip Hodges, coordenador daquele laboratório e apoiada pelo Programa Capes-Fulbright de estágio de doutorando (*Visiting Student Researcher*), no período 2011-2012.

2.7 Geologia de campo

Os trabalhos de mapeamento detalhado realizados pelo Grupo de Pesquisa em Geotectônica (TEKTOS) da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, vinculados ao Mapa Tectônico da Faixa Ribeira Central - 1:250.000 (UERJ-TEKTOS) foram utilizados como base de dados geológicos.

2.7.1 Litologias

As informações foram compiladas do Mapa Tectônico da Faixa Ribeira Central - 1:250.000 (UERJ-TEKTOS), produzido pelo Grupo de Pesquisa em Geotectônica da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

2.7.2 Estruturas

Os dados estruturais foram compilados do projeto “Tectônica rúptil meso-cenozóica e magmatismo associado: estudo integrado do embasamento adjacente à bacia de Santos, S-SE do Brasil” (Convênio Petróleo Brasileiro S.A - PETROBRÁS e Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ - N°0050.0022710.06.4) coordenado pelos professores Dra. Mônica Heilbron (UERJ) e Dr. Julio Cesar Horta de Almeida (UERJ) e que se basearam em diferentes fontes para a integração geológica.

2.8 Termocronologia de baixa temperatura - (U-Th)/He em apatita (AHe)

O detalhamento sobre o método de termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He em apatita será apresentado a seguir.