
PKS
PUBLIC
KNOWLEDGE
PROJECT

**Revista de GEOGRAFIA
(RECIFE)**
<http://www.revista.ufpe.br/revistageografia>

OJS
OPEN
JOURNAL
SYSTEMS

**A CRONOLOGIA DA EVOLUÇÃO DA PAISAGEM NO CONTEXTO
DOS AVANÇOS DAS GEOCIÊNCIAS E A GEOMORFOLOGIA
TECTÔNICA DA MARGEM CONTINENTAL
DO SUDESTE DO BRASIL**

Laura Delgado Mendes¹

¹*Instituto Multidisciplinar, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
Email: lauradmendes@gmail.com*

Artigo recebido em 17/07/2018 e aceito em 18/08/2018

RESUMO

A partir de observações sobre o contexto de evolução das Geociências e do desenvolvimento de métodos de quantificação para a cronologia da evolução da paisagem ao longo de escala de tempo longa, o presente artigo, baseado na palestra ministrada no Simpósio Nacional de Geomorfologia em 2018, tem o objetivo de discutir a evolução da margem continental do Sudeste de Brasil a partir da abordagem da Geomorfologia Tectônica, apresentando e destacando a contribuição da termocronologia de baixa temperatura nos estudos sobre processos superficiais, soerguimento, denudação. A evolução da área indica uma combinação de episódios que se alternaram e/ou atuaram em conjunto em determinados períodos, com eventos de reativação mais antigos, combinados com os mais recentes, e que apresentam os seus remanescentes na paisagem (serras da Mantiqueira e do Mar e os grábens e bacias sedimentares) e nos depósitos correlativos nas bacias sedimentares marginais e intracontinentais.

Palavras-chaves: Avanços das Geociências. Termocronologia. Reativação tectônica. Sistema de Riftes. Sudeste do Brasil.

**CHRONOLOGY OF LANDSCAPE EVOLUTION IN GEOSCIENCES
ADVANCES APPROACH AND TECTONIC GEOMORPHOLOGY OF
THE SOUTHEASTERN CONTINENTAL MARGIN OF BRAZIL**

ABSTRACT

Based on observations about advances in Geosciences and the development of methods for quantifying landscape evolution along a long-time scale, the objective of this article, based on the lecture given at the Simpósio Nacional de Geomorfologia, is to discuss the evolution of the continental margin of Southeastern Brazil from the approach of Tectonic Geomorphology. It is also sought to present and highlight the contribution of low temperature thermochronology in studies on surface processes, uplift, denudation. The evolution of the area indicates a combination of episodes that have alternated and/or acted together during certain periods, with older reactivation events, combined with the most recent, which led to the formation of important regional tectonic and geomorphological features (Mantiqueira Mountains, Serra do Mar Mountains, grabens, and sedimentary basins) and its correlated deposits in the continental margin.

Keywords: Geosciences advances. Thermochronology. Tectonic reactivation. Rift system. Southeastern Brazil.

INTRODUÇÃO

O presente artigo é baseado em palestra proferida no Simpósio Nacional de Geomorfologia de 2018, realizado na cidade do Crato, Ceará. Por essa razão, apresento inicialmente os meus agradecimentos pelo convite para participar desse evento importante para a comunidade geocientífica brasileira, que atua na Geomorfologia e em áreas afins, e além disso, tão especialmente preparado, com empenho e disposição para realizar uma edição de fato diferente de outras e deixar, assim, a sua marca. Agradeço também a oportunidade de voltar ao Cariri, estar entre colegas e amigos de muitos anos e poder compartilhar um pouco a minha visão da ciência, das Geociências em especial, dados produzidos e reflexões.

Destaco que alguns dados apresentados na palestra não serão detalhados devido à fase de publicação a que estão submetidos, com as devidas co-autorias, restringindo o artigo à outras discussões apresentadas e que poderão ser melhor exploradas nesse formato, com a inclusão de referências importantes que as sustentam e oferecem mais informações para aprofundamento.

Logo ao iniciar a reflexão sobre a minha proposta de apresentação nesse evento lembrei que a revista *Science* publicou um artigo muito interessante com o título “Atlas do mundo subterrâneo revela oceanos e montanhas perdidos na história da Terra” (VOOSEN, 2016), no qual o autor trata basicamente de pesquisas, com base em tomografia do manto, sobre os chamados “*slabs*”, que são fatias da crosta que mergulham no manto e que hoje se entende que têm um papel importante na geodinâmica que movimenta continentes, constrói e destrói relevo. Essas áreas com os *slabs* foram mapeadas e eles chamaram de “fantasmas de uma geografia do passado”. Esse assunto, além de fascinante, ainda se destaca mais e justifica a escolha ao apresentá-lo aqui por ser iniciado com a seguinte afirmação: “A Terra tem o hábito ruim de apagar a sua própria história”. De fato, sabe-se que isso ocorre e é possível analisar esse “apagamento” de outra maneira também (e não apenas com os *slabs* “desaparecendo” no manto!).

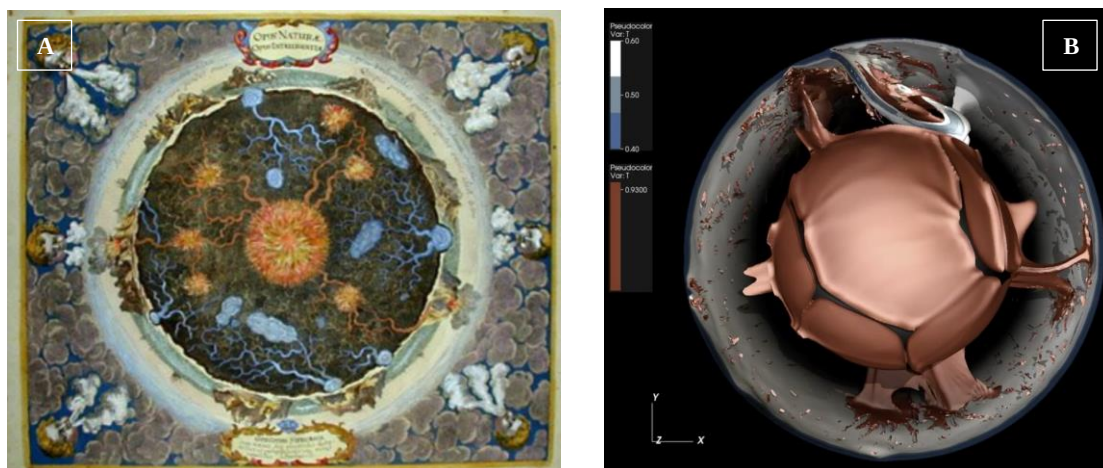
Assim, a proposta é: 1) Apresentar uma condição em que essa ideia de “apagamento” da história da Terra pode ser muito importante para se entender a evolução de uma área a partir de outra perspectiva; e 2) Apresentar a relação disso com a evolução geológico-geomorfológica (tectônica, magmática, estrutural e sedimentar, ou seja, a partir da perspectiva da Geomorfologia Tectônica) de uma parte da região Sudeste do Brasil.

Compreende-se a Geomorfologia Tectônica como o estudo das formas e paisagens que registram um sinal tectônico mensurável (BURBANK e ANDERSON, 2001) ou das formas produzidas por processos tectônicos (KELLER e PINTER, 1996; BURBANK e ANDERSON, 2001), fundamental no estudo da evolução geomorfológica de margens passivas (SUMMERFIELD, 1986; 1989; 2000) como, por exemplo, a brasileira. Além disso, temos clareza que a tectônica e o clima, especialmente a partir das mudanças climáticas, são fatores fundamentais na evolução da paisagem geomorfológica. E, como observa Bigarella *et al.* (2003), a tectônica estará na origem do controle estrutural, ou seja, na influência das estruturas geológicas no modelado da paisagem, seja em áreas grandes ou pequenas e, além disso, de forma ativa, com estruturas influenciando diretamente a paisagem atual (associada à neotectônica) ou passivamente, quando as estruturas antigas interferem ou controlam essa evolução.

Evolução do conhecimento nas Geociências

Essas pesquisas, como as apresentadas no artigo citado anteriormente, entre tantas outras que poderiam ser utilizadas como exemplo, mostram uma importante conexão com a evolução do conhecimento nas Geociências. Nessa perspectiva, podemos observar e comparar visões sobre a dinâmica interna da Terra que, embora temporalmente tão distantes e, portanto, diferentes com relação à base de conhecimento existente, são marcantes. Na Figura 1 observamos a imagem do interior da Terra de 1664, de Athanasius Kircher, chamada “*Mundus Subterraneus*”, que mostra os canais internos interconectados a um núcleo central e à superfície onde aparecem os vulcões, numa visão de um sistema ideal (“*Systema Ideale*”). Ao lado, a imagem de um momento da animação baseada em modelo sísmico apresenta uma visualização que mostra a movimentação desse manto e a relação dele com a dinâmica da superfície, inclusive mostrando o mergulho dos “*slabs*” citado anteriormente, o que faz refletir sobre a relação dessa dinâmica mais interna com a de superfície, fundamentado em conhecimento muito recente.

Figura 1 – Visões do interior da Terra: de Kircher à modelagem sísmica



Fonte: A) Athanasius Kircher. *Mundus Subterraneus*. 1664. B) Imagem de animação disponível em: <http://www.ucl.ac.uk/seismin/explore/planet-interior-components.html>

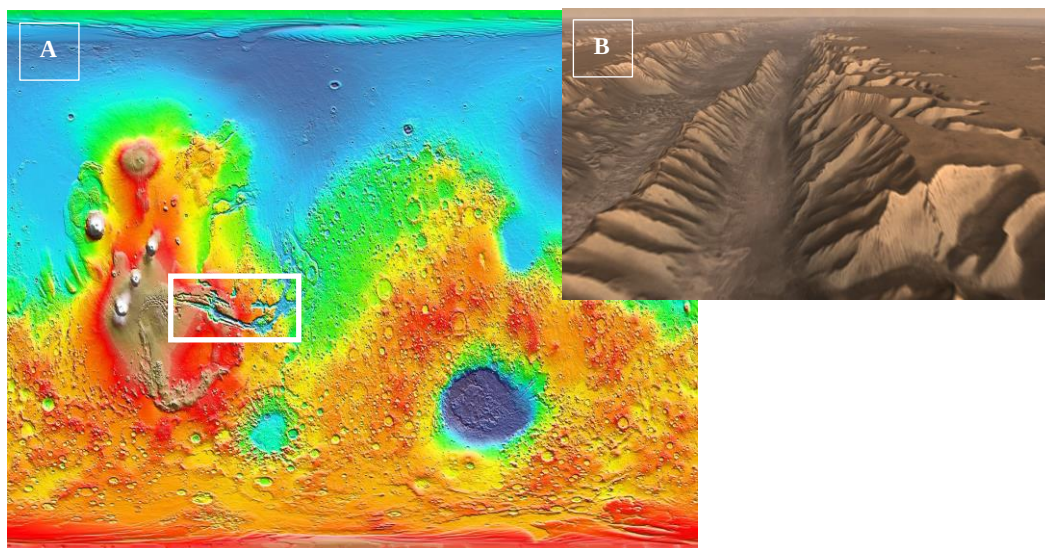
O grande destaque nessa evolução de conhecimento aparece com a proposição, consolidação e desdobramentos da Teoria da Tectônica de Placas. No ano de 2017 foram celebrados os 50 anos desse importante marco na “Revolução” do conhecimento geocientífico, do qual trata Amos (2017), e que acontece num contexto incrível de avanços na ciência, aprimoramentos tecnológicos etc, que nos permitem até mesmo explorar outros planetas.

Evolução do conhecimento nas Geociências – Outras fronteiras e desafios

A exploração desses planetas é possível hoje e nos permite observar feições como o “Valle Marineris” (Figura 2), já conhecido há quatro décadas, mas que têm a explicação para a sua gênese ainda incerta, como aponta Yin (2012) em sua revisão teórica e ao propor uma nova explicação para a sua origem. Esse é um exemplo de uma feição de proporções gigantescas, com 3000 km de comprimento e 8 km de profundidade, com uma dimensão que, para comparação, abrangeria os EUA de costa a costa. Também são observadas feições, depósitos, registros sedimentares que reforçam tais comparações. O Valle Marineris possui depósitos de escorregamentos gigantes, como pode ser observado em vídeo produzido pela equipe do *Solar System Visualization (SSV)* do *Jet Propulsion Laboratory* da *National*

Aeronautics and Space Administration (NASA) em parceria com o Mars Space Flight Facility da Arizona State University e disponível em <https://youtu.be/JUbQM47QXwQ>.

Figura 2 – Observação da superfície de Marte, com destaque para o Valle Marineris



Fonte: A) MOLA Science Team – NASA (<https://mars.jpl.nasa.gov/mgs/sci/mola/mar05-2000rel/shademap.html>); B) Mars Odyssey - THEMIS – Arizona State University (<http://themis.mars.asu.edu/node/5457>)

Ainda não se sabe sobre a existência de placas tectônicas nesses planetas rochosos, mas muito em breve poderemos ter informações porque uma sonda (*Insight*) foi lançada pela NASA no início de maio e está viajando para Marte, com chegada prevista para novembro, para realizar levantamento sísmico e começar a explorar o interior do planeta (DANTAS, 2018), marcando uma nova fase de exploração nos campos da Geologia e Geomorfologia Planetárias.

Esses avanços no conhecimento são relevantes porque também nos permitem olhar para as condições atuais predominantes e para o passado desses planetas, assim como nos estimula e colabora para entender as transformações às quais o nosso planeta também está submetido, como parte integrante de um sistema maior.

Mas é fundamental destacar que, embora sejam realidade, ainda temos desafios como os apresentados na interessante publicação *Landscapes on the Edge* (NRC, 2010), que destaca os “grandes desafios para a compreensão dos processos superficiais terrestres” e “iniciativas de pesquisa de alta prioridade”. Essa publicação também aborda a “reconstrução quantitativa das dinâmicas da paisagem ao longo de escalas de tempo” e do “renascimento dos

termocronômetros”, como métodos de datação da evolução da paisagem considerados como “revolução nas últimas décadas” por Anderson e Anderson (2010).

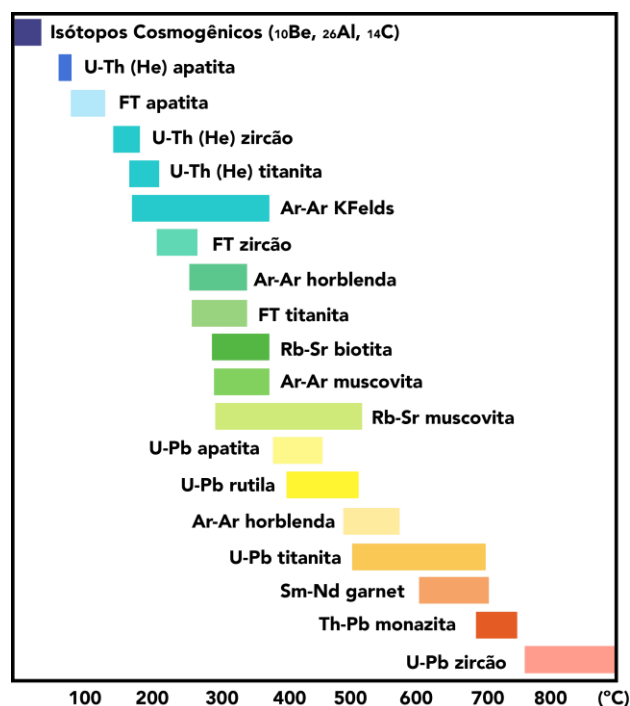
CRONOLOGIA DA EVOLUÇÃO DA PAISAGEM – GEOCRONOLOGIA E TERMOCRONOLOGIA

A “cronologia da evolução da paisagem” está baseada no conhecimento sobre a radioatividade e quantificação dos elementos e do seu decaimento isotópico, que ofereceu novas fronteiras para as pesquisas em Geociências, como métodos de GEOCRONOLOGIA e de TERMOCRONOLOGIA, esse último como uma derivação do primeiro.

Para diferenciá-los de uma forma simples pode-se afirmar que enquanto a “geocronologia” vai oferecer informações sobre a idade de cristalização de minerais e rochas, a “termocronologia” vai ajudar a decifrar a sua “história térmica”. Como exemplo, enquanto o granito Pedra Selada da Mantiqueira (HEILBRON, 1993) tem idade de 580 Ma pelo método $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ em zircão (MENDES *et al.*, 2006), a idade baseada em termocronologia (U-Th)/He em apatita de uma amostra dessa mesma unidade litológica tem 64 Ma (MENDES, 2013). Portanto, o significado da idade é diferente, ou seja, podemos dizer que em algum momento (em 64 Ma) o “relógio” da apatita foi zerado (“apagado”, para lembrar da ideia de apagamento abordada inicialmente) e ela começou a registrar uma idade que não é a idade de cristalização, mas sim uma idade relacionada a uma condição térmica, a uma “história térmica”.

Considerando a Termocronologia, atualmente temos a opção de utilizar métodos de “baixa temperatura”. E, nesse caso, destaca-se o método (U-Th)/He em apatita, relacionado a uma faixa de temperatura abaixo de 100 graus, que permite analisar processos que estarão relacionados à crosta superior, à processos superficiais, que atingem essa parte superior da crosta, mais rasa e, portanto, mais fria. Na Figura 3 pode ser observado um diagrama com os principais termocronômetros utilizados e as faixas de temperatura que abrangem.

Figura 3 – Principais termocronômetros e relação com temperatura



Fonte: Pollard *et al.*, 2002 (Dados reunidos de P. Fitzgerald, S. Baldwin, G. Gehrels, P. Reiners, M. Ducea)

A termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He em apatita (ApHe)

Como geocronômetro baseado no decaimento de isótopos, a termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He é um método de datação baseado na produção do He radiogênico resultante do decaimento de isótopos de U, Th e Sm. Sabendo-se a quantidade de He e dos isótopos pais e a taxa de decaimento, que é conhecida com eficácia, podemos calcular o tempo de acúmulo do He, ou seja, a sua idade, expressa na equação da idade.

Esse método que tem como fundamento a acumulação e perda por difusão do hélio (^4He) foi reconhecido no início do século passado (RUTHERFORD, 1905; STRUT, 1905) mas a sua utilização como método de baixa temperatura só foi adotada a partir da década de 1980 (ZEITLER *et al.*, 1987; LIPPOLT *et al.*, 1994; FARLEY *et al.*, 1996; WOLF *et al.*, 1997; entre outros). A incredibilidade naquele período inicial se deve aos primeiros resultados que apontavam idades erradas e, geralmente, baixas, provavelmente resultantes da perda de He associada aos efeitos dos danos da radiação (*radiation damage*), o que resultou no abandono da técnica por muitos anos. O seu “ressurgimento” teve destaque com o trabalho de Lippolt *et al.* (1982 *apud* Lisker *et al.*, 2009), que propôs a sua aplicação como uma ferramenta para

termocronologia de baixa temperatura (*low-temperature thermochronology*), seguido por Zeitler *et al.* (1987), que observaram que a sistemática (U-Th)/He representava um valioso recurso para permanecer negligenciado, levando-se em consideração as vantagens que apresentava. Ressalta-se a baixa concentração do He na atmosfera (5 ppm), resultando numa baixa contaminação das amostras, e a rápida taxa de produção de He a partir do decaimento de cada átomo de ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th , que envolve a produção de oito, sete e seis partículas alfa, respectivamente.

Relação Temperatura – Idade ApHe e aplicação na Geomorfologia

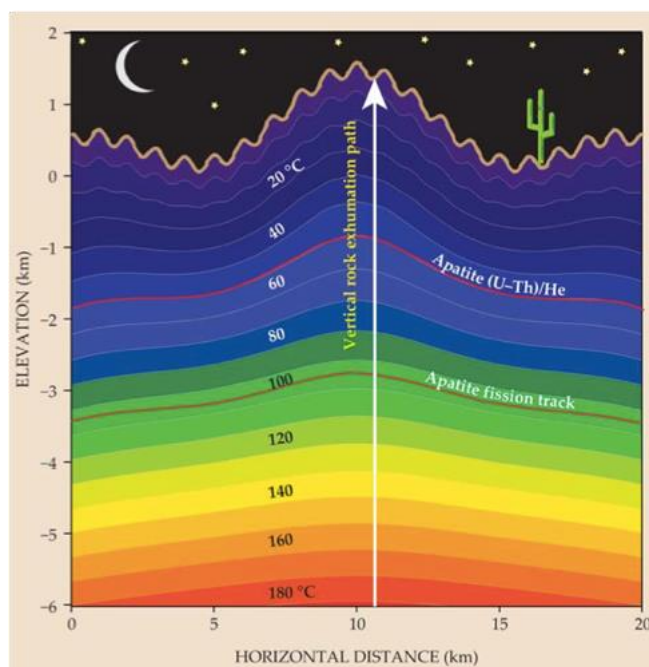
Com base no que foi apresentado anteriormente pode-se notar que existe uma correlação entre temperatura de idade. A progressão da acumulação e/ou perda do He pode ser visualizada dessa maneira: Se o mineral está numa zona de temperatura elevada, não há retenção, ou seja, não há registro de idade (idade = zero). Observe que o hélio é um gás e que escapa facilmente em temperaturas mais elevadas. Quando atinge a área chamada de “Zona de Retenção Parcial” (ZRP), que pode variar um pouco de acordo com algumas condições (ZRP He entre $\sim 40^{\circ}\text{C}$ - $\sim 80^{\circ}\text{C}$, segundo Wolf *et al.*, 1998; Farley, 2000; Stockli *et al.*, 2000 e ZRP He entre 55°C – 80°C , com base em Flowers *et al.*, 2009; Gautheron *et al.*, 2009), inicia o acúmulo do He na estrutura cristalina do mineral a partir da emissão das partículas alfa. Ele não é mais perdido como antes e o “relógio” da idade começa a funcionar. O aquecimento e a perda por difusão podem resultar no apagamento da idade, similar ao processo de apagamento (*annealing*) que ocorre com os traços de fissão.

Então, qual é o significado da idade ApHe? O que se obtêm é o registro do momento no qual o mineral passou pela “Temperatura de Fechamento” (Tc), que no caso desse método é de, aproximadamente, 70°C . Aquela idade de 64 Ma do Granito Pedra Selada, baseada em Mendes (2013), significa que a amostra analisada estava nessa temperatura há 64 Ma.

É importante observar a relação do método com o conceito de “Gradiente Geotérmico”, ou seja, com a dinâmica de transferência de calor na crosta, que aumenta de 20 a $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ em profundidade. As rochas sofrem resfriamento com a aproximação da superfície, à medida em que são trazidas de maiores profundidades para a superfície por eventos de soerguimento tectônico ou expostas por processos erosivos que resultam na denudação. Sendo assim, a Tc desse termocronômetro o caracteriza como muito apropriado para identificar episódios de

reativações tectônicas na crosta superior (Figura 4). Então, pode ser extremamente útil em estudos sobre processos superficiais, soerguimento, denudação, o que ajuda a decifrar a história térmica dessa amostra e de uma área.

Figura 4 – Perfil de temperatura x profundidade como auxiliar na determinação da história das rochas



Fonte: Reiners e Shuster (2011)

Outras possíveis aplicações do método são: termocronologia detrítica; cronologia de intemperismo; eventos de erupção; história térmica de bacias sedimentares; impactos de meteoritos; incêndios florestais; entre outras.

DECIFRANDO A HISTÓRIA TÉRMICA DE UM SETOR DA MARGEM CONTINENTAL DO SUDESTE DO BRASIL

A região Sudeste do Brasil apresenta uma evolução muito complexa associada a importantes eventos termo-tectônicos, antigos episódios de rifteamento, inversão e tectônica compressiva, o que justifica o interesse em investigar a história térmica dessa área e, com isso, episódios de reativação ao longo do Mesozoico-Cenozoico. E, nesse sentido, como observam Zalán e Oliveira (2005), a margem continental do Sudeste do Brasil não se constitui

numa típica “margem passiva”, tendo sido submetida à diversos períodos de instabilidade crustal com variabilidade espacial e temporal. A margem atlântica da América do Sul é reconhecida como uma margem rifteada que sofreu deformação significativa durante e após o rifteamento intracontinental (BROWN *et al.*, 2000). Tais eventos estão registrados na história térmica das rochas da região e a fase de exumação pós-rifte, especialmente, é fundamental para o entendimento da história tectônica da margem continental, assim como sobre a proveniência dos sedimentos detríticos que foram depositados na área *offshore* (COBBOLD *et al.*, 2001).

Nas últimas décadas, diversos pesquisadores vêm utilizando a termocronologia para oferecer novas contribuições para a compreensão sobre evolução do Sudeste brasileiro (VIGNOL- LELARGE *et al.*, 1994; GALLAGHER *et al.*, 1994; GALLAGHER *et al.*, 1995; GALLAGHER e BROWN, 1997; HACKSPACHER *et al.*, 1999; HACKSPACHER e RIBEIRO, 2003; TELLO SAENZ *et al.*, 2003; RIBEIRO, 2003; HACKSPACHER *et al.*, 2004; SILVA, 2006; RIBEIRO, 2007; entre outros). Embora a maior parte dos estudos tenham se baseado na aplicação do método de Traços de Fissão em Apatita (TFA), pode ser observada a introdução da sistemática (U-Th)/He e a sua contribuição com dados complementares para a interpretação sobre evolução da região.

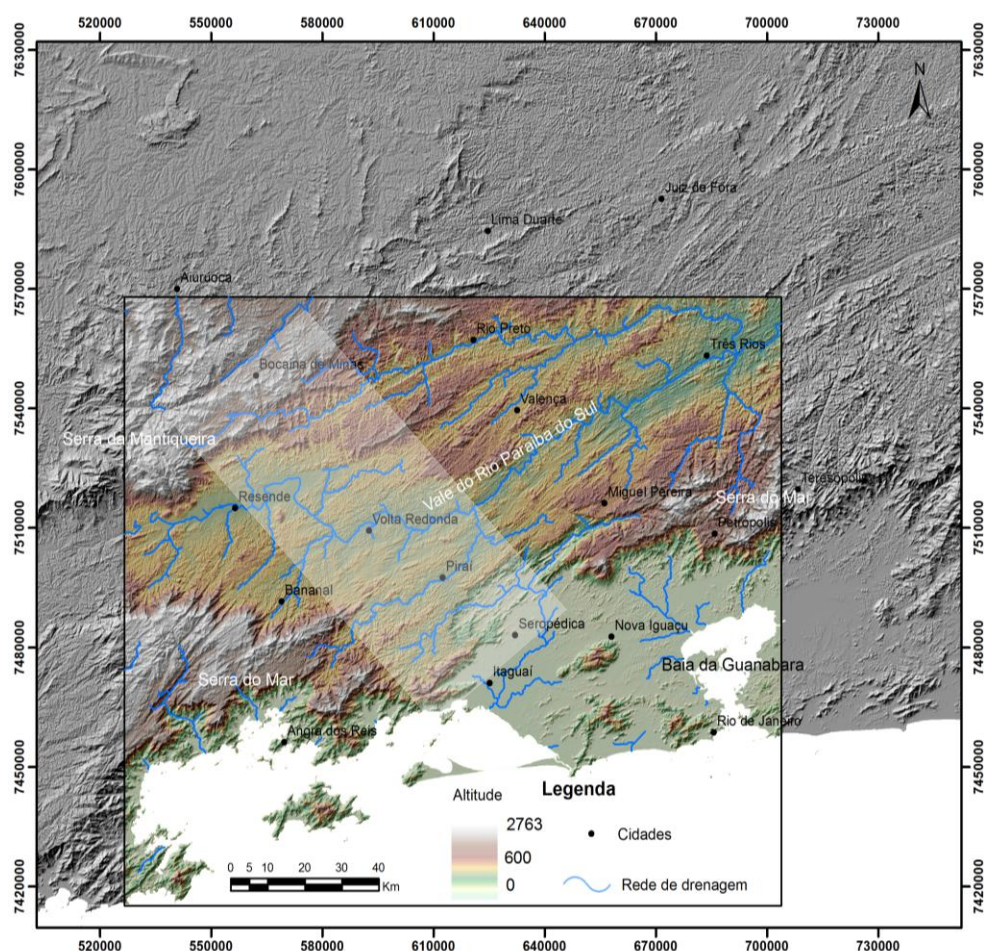
Estudos realizados por Mendes (2013) a partir da termocronologia de baixa temperatura (U-Th)/He registram um conjunto de idades baseadas em amostras do embasamento coletadas ao longo de um perfil com orientação NW-SE, entre a Serra da Mantiqueira e o Gráben da Guanabara (Figura 5), que registram eventos que mostram correlação direta com episódios de reativação tectônica e soerguimento na margem continental, assim como registros sedimentares e discordâncias nas bacias continentais e marginais.

Eventos térmicos mais antigos em áreas elevadas das serras do Mar e da Mantiqueira indicam correlação com o contexto de transição da fase rifte para a fase pós-rifte, assim como se correlacionam com registros como os derrames basálticos eocretáceos que aparecem no preenchimento de praticamente toda a bacia de Santos (MOREIRA *et al.*, 2007; PEREIRA e FEIJÓ, 1994).

Outros registros corroboram com a importância do magmatismo na história térmica dessa área com atuação de uma pluma mantélica (GUEDES *et al.*, 2005), responsável pelo soerguimento regional (ALMEIDA e CARNEIRO, 1998; ZALÁN, 2004; ZALÁN e OLIVEIRA, 2006), e que deu origem a “Serra do Mar Cretácea” (ZALÁN e OLIVEIRA, 2006), num contexto de litosfera fina e enfraquecida (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2004) e que se

refletem no aumento da espessura de sedimentos nas bacias marginais (PEREIRA E FEIJÓ, 1994), com resultante subsidência associada à reativação da área fonte (MOREIRA *et al.*, 2007). Esse soerguimento também foi indicado em estudos termocronológicos que utilizaram o método de termocronologia de traços de fissão em apatita (VIGNOL-LELARGE *et al.*, 1994; GALLAGHER *et al.*, 1994; RIBEIRO, 2003; FRANCO, 2006; SILVA, 2006; RIBEIRO, 2007), assim como pesquisas também baseadas no método (U-Th)/He (COGNÉ *et al.*, 2011; COGNÉ *et al.*, 2011).

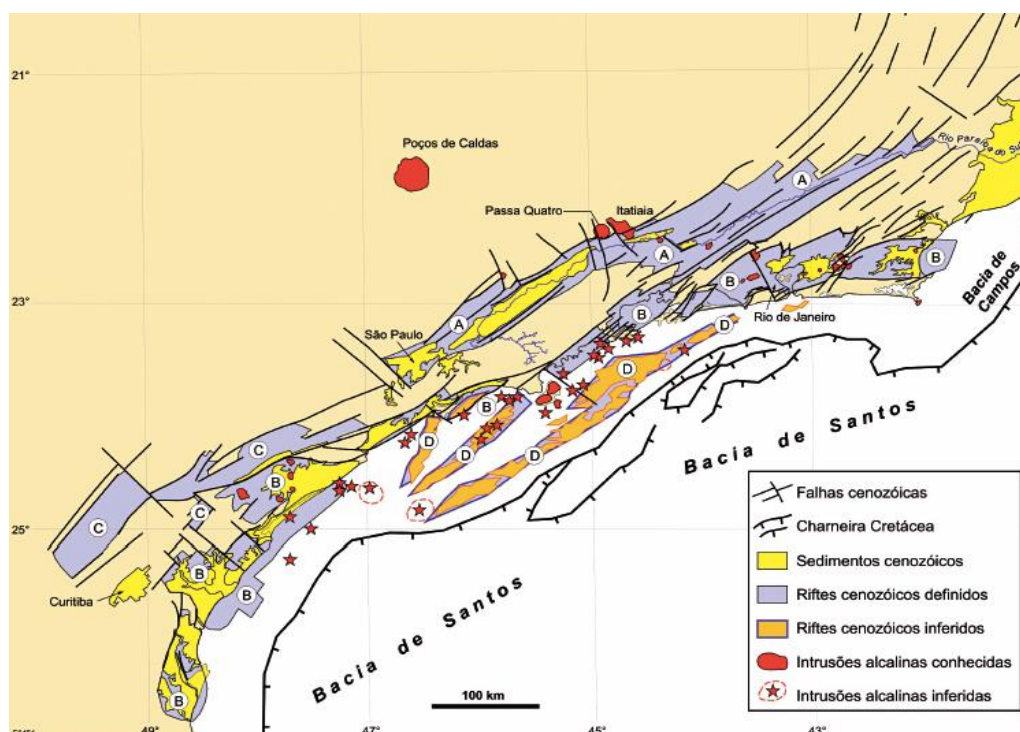
Figura 5 – Setor da margem continental emergsa com destaque para a seção entre a Serra da Mantiqueira e Gráben da Guanabara



Fonte: Modificado de Mendes (2013). Modelo Digital de elevação gerado a partir de imagem SRTM - Shuttle Radar Topography Mission (NASA/USGS/CGIAR).

Posteriormente, destaca-se a fase de reativação responsável pela deformação da Superfície Japi datada por Ferrari (2001) e implantação do sistema de riftes (ALMEIDA, 1976; RICCOMINI, 1989; ZALÁN e OLIVEIRA, 2005) (Figura 6), vinculado diretamente com o soerguimento no Neocretáceo que o precedeu (FERRARI, 2001).

Figura 6 – Sistema de Riftes Cenózoicos do Sudeste do Brasil.



Legenda: a – Paraíba do Sul; b – Litorâneo; c – Ribeira, d – Marinheiros. Fonte: Zalán e Oliveira (2005).

Em margens continentais passivas, especialmente as margens elevadas, é reconhecido o padrão de aumento progressivo das idades com o aumento da altitude e da distância da costa, como apresentado em diversos estudos baseados na análise de traços de fissão em apatita (GALLAGHER *et al.*, 1994, 1995, 1998; GALLAGHER e BROWN, 1997; BROWN *et al.*, 2000; GUNNEL, 2000). No entanto, segundo Mendes (2013) nessa área tal padrão apresenta uma fraca correlação positiva com dispersão nas idades que indicam a evolução complexa a que foi submetida.

Os processos de denudação e, portanto, as alterações na paisagem ao longo do tempo geológico, com registros de total de denudação e taxas de erosão, também são elementos fundamentais para que se possa interpretar a acumulação do volume de sedimentos depositado

nas bacias sedimentares na margem continental nessa área. A atuação tectônica - clima, com períodos nos quais a ação tectônica foi mais efetiva e, conseqüentemente, a denudação tectônica mais atuante e outros nos quais a ação climática foi fundamental para a disponibilização e remoção de material (denudação erosional). Nos períodos de quiescência a disponibilização de material é potencializada e resulta numa maior capacidade de denudação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A termocronologia, originada e aprimorada nesse importante contexto de evolução do conhecimento nas Geociências, com a “quantificação” fornecendo novos dados para o estudo da evolução da paisagem em escalas de tempo mais longas representa uma importante aplicação para a análise da relação entre tectônica e erosão que resulta da interação dinâmica entre soerguimento, subsidência, desnudação e sedimentação, como já destacado por Thomas e Summerfield (1987). Os dados que podem ser obtidos oferecem informações importantes sobre a evolução de uma área.

No entanto, reconhece-se as vantagens da integração com outros métodos, por oferecer perspectivas adicionais para a análise dos dados e ampliar as possibilidades de discussões e interpretações, para reconstrução quantitativa em escalas de tempo ainda maiores, inclusive para avaliação de dinâmicas mais recentes e estudos comparativos.

Os maiores desafios são os possíveis efeitos de diferentes fatores na dispersão das idades mas que podem ser controlados com estratégias de análise bem definidas. Embora reconhecidamente útil e com aplicação variada em diferentes contextos geológicos e geomorfológicos, a aplicação do método ainda apresenta desafios na medida em que envolve diversos fatores que podem interferir nos resultados. Alguns deles podem ser minimizados e controlados, mas outros devem ser analisados com cautela.

Os processos que causam o resfriamento das rochas no interior da crosta podem estar associados a diferentes mecanismos: (1) pulsos térmicos relacionados com magmatismo, hidrotermalismo ou metamorfismo ou (2) deslocamento das rochas para uma área próxima à superfície terrestre, como resultado de eventos tectônicos ou erosivos (BURBANK e ANDERSON, 2001). O método de termocronologia de baixa temperatura mostra-se como uma ferramenta muito útil para o estudo de eventos que resultaram em resfriamento de rochas. A evolução da margem continental do Sudeste do Brasil indica uma combinação de mecanismos que se alternaram e/ou atuaram em conjunto em determinados períodos e que

deixaram registros na topografia observada atualmente na área e nas bacias sedimentares marginais e intracontinentais e registrados nas histórias térmicas. Os eventos de reativação mais antigos, combinados com os eventos mais recentes, exibem os seus remanescentes na paisagem (como as serras da Mantiqueira e do Mar e os grábens e bacias sedimentares associados) e assumem papel fundamental na sua evolução.

AGRADECIMENTOS

Destaco os meus agradecimentos à comissão organizadora do SINAGEO e aos editores da Revista de Geografia (Recife) da UFPE pelo convite. Agradeço também às instituições e pesquisadores que me apoiaram e viabilizaram o processo de aprendizado e toda a infraestrutura para utilização de um importante método de pesquisa e que espero ajudar a divulgar através da palestra sintetizada nesse artigo: Monica da Costa Pereira Lavalle Heilbron, minha orientadora de doutorado, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, e Kip Hodges, do *ASU Noble Gas Geochemistry and Geochronology Laboratories* da *School of Earth and Space Exploration* da *Arizona State University*, além do apoio fundamental do Programa CAPES-Fulbright (*Visiting research Program*) e da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, onde atuo desde 2006.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 48, n. 1, p. 15–26, 1976.
- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. L. Origem e evolução da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28, n. 2, p. 135–150, 1998.
- AMOS, J. *Plate tectonics: When we discovered how the Earth really works*. BBC, 02/10/2017. Disponível em <<http://www.bbc.com/news/science-environment-41472281>> Acesso em 02 de abril de 2018.
- ANDERSON, R.S.; ANDERSON. S.P. *Geomorphology: The mechanics and chemistry of landscapes*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 637 p.

- ASSUMPÇÃO, M.; SCHIMMEL, M.; ESCALANTE, C.; BARBOSA, J. R.; ROCHA, M.; BARROS, L. V. Intraplate seismicity in SE Brazil: stress concentration in lithospheric thin spots. *Geophys. J. Int.*, v. 15, n. 9, p. 390–399, 2004.
- BIGARELLA, J.J. PASSOS, E.; HERRMANN, M.L.P.; SANTOS, G.; MENDONÇA, M.; SALAMUNI, E.; SUGUIO, K. *Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais*. Volume 3. Florianópolis: UFSC, 2003. p. 877-1436.
- BROWN, R. W.; GALLAGHER, K.; GLEADOW, A. J. W.; SUMMERFIELD, M. A. Morphotectonic evolution of the South Atlantic margins of Africa and South America. In: SUMMERFIELD, M. A. (Ed.) *Geomorphology and Global Tectonics*. Chichester: John Wiley e Sons, 2000. p. 255–281.
- BURBANK, D. W.; ANDERSON, R. S. *Tectonic Geomorphology*. Oxford: Blackwell Science Publications, 2001. 274 p.
- COBBOLD, P. R.; MEISLING, K. E.; MOUNT, V. S. Reactivation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos basins, southeastern Brazil. *AAPG Bulletin*, v. 85, n. 11, p. 1925– 1944, 2001.
- COGNÉ, N.; GALLAGHER, K.; COBBOLD, P. R. Post-rift reactivation of the onshore margin of southeast Brazil: Evidence from apatite (U–Th)/He and fission-track data. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 309, p. 118–130, 2011.
- COGNÉ, N.; GALLAGHER, K.; COBBOLD, P. R.; RICCOMINI, C.; GAUTHERON, C. Post-breakup tectonics in southeast Brazil from thermochronological data and combined inverse-forward thermal history modeling. *Journal Geophysical Research*, v. 117, p. 1–16, 2012.
- DANTAS, C. *NASA lança nova missão para investigar o interior e detectar terremotos em Marte*. Portal G1. Disponível em <<https://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/nasa-lanca-nova-missao-para-investigar-o-interior-e-detectar-terremotos-em-marte.ghtml>> Acesso em 04 de maio de 2018.
- FARLEY, K. A.; WOLF, R. A.; SILVER, L. T. The effects of long alpha-stopping distances on (U–Th)/He dates. *Geochim Cosmochim Acta*, v. 60, p. 1–7, 1996.
- FARLEY, K. A. Helium diffusion from apatite: general behavior as illustrated by Durango fluorapatite. *Journal of Geophysical Research*, v. 105, p. 2903–2914, 2000.

- FERRARI, A. L. *Evolução tectônica do Gráben da Guanabara*. 2001. 412 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- FLOWERS, R. M.; KETCHAM, R. A.; SHUSTER, D. L.; FARLEY, K. A. Apatite (U–Th)/He thermochronometry using a radiation damage accumulation and annealing model. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 73, p. 2347–2365, 2009.
- FRANCO, A. O. B. *Termocronologia por Traços de Fissão em Apatitas na região do Arco de Ponta Grossa, entre os Alinhamentos de Guapiara e São Jerônimo-Curiúva*. 2006. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) - Univesidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2006.
- GALLAGHER, K.; BROWN, R. The onshore record of passive margin evolution. *Journal of the Geological Society*, London, v. 154, p. 451–457, 1997.
- GALLAGHER, K.; HAWKEWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. The denudation history of onshore continental margin of S.E. Brazil inferred from fission track data. *Journal Geophysical Research*, v. B9, n. 99, p. 18117–18145, 1994.
- GALLAGHER, K.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. Denudation, fission track anlysis and the long-term evolution of passive margin topography: application to the Southeast Brazilian margin. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 8, n. 1, p. 65–77, 1995.
- GALLAGHER, K.; BROWN, R.; JOHNSON, C. Fission Track analysis and its applications to geological problems. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, v. 26, p. 519–572, 1998.
- GAUTHERON, C.; TASSAN-GOT, L.; BARBARAND, J.; PAGEL, M. Effect of alpha-damage annealing on apatite (U–Th)/He thermochronology. *Chemical Geology*, v. 266, p. 157–170, 2009.
- GUEDES, E.; HEILBRON, M.; VASCONCELOS, P. M.; VALERIANO, C. M.; ALMEIDA, J. C. H.; TEIXEIRA, W.; THOMAZ FILHO, A. K–Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of dikes emplaced in the onshore basement of the Santos Basin, Resende area, SE Brazil: implications for the South Atlantic opening and Tertiary reactivation. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 18, p. 371–382, 2005.
- GUNNEL, Y. Apatite fission track thermochronology: an overview of its potential and limitations in geomorphology. *Basin Research*, v. 12, p. 115–132, 2000.

- HACKSPACHER, P.; HADLER, J. C.; LUNES, J. P.; PAULO, S. R.; RIBEIRO, L. F. B.; TELLO, C. A. S. Alguns dados sobre o período Cretáceo na serra da Mantiqueira através de Análise de Traços de Fissão em Apatitas (ATFA). In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO NO BRASIL, 5., 1999, Serra Negra. *Anais...* Serra Negra, 1999. p. 33–37.
- HACKSPACHER, P. C.; RIBEIRO, L. F. B. A origem da Serra do Mar: termocronologia por traços de fissão em apatita. In: IX SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS / III INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECTONICS, 2003, Búzios. *Anais...* Búzios: SBG, 2003. p. 384–386.
- HACKSPACHER, P. C.; RIBEIRO, L. F. B.; FETTER, A. H.; HADLER, N. J. C.; TELLO, C. S. Consolidation and Break-Up of the South American Platform in Southeastern Brazil: Tectonothermal and Denudation Histories. *Gondwana Research*, v. 7, n. 1, p. 91 – 101, 2004.
- HEILBRON, M. Evolução tectono- metamórfica da seção Bom Jardim de Minas (MG) - Barra do Piraí (RJ). Setor central da Faixa Ribeira. 1993. 268 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, 1993.
- KELLER, E. A.; PINTER, N. (Eds). *Active tectonics. Earthquakes, uplift and landscape*. New Jersey: Prentice Hall, 1996, 338 p.
- KETCHAM, R. A. *HeFTy* (version 1.7.5). Disponível em: <<ftp://ctlab.geo.utexas.edu/Ketcham/ft/HeFTy>>. Acesso em 2012.
- LIPPOLT, H. J.; LEITZ, M.; WERNICKE, R. S.; HAGEDORN, B. (Uranium + thorium)/helium dating of apatite: experience with samples from different geochemical environments. *Chemical Geology* (Isotope Geoscience Section), v. 112, p. 179–191, 1994.
- LISKER, F.; VENTURA, B.; GLASMACHER, U. A. Apatite thermochronology in modern geology. In: LISKER, F.; VENTURA, B.; GLASMACHER, U. A. (Ed.). *Thermochronological Methods: From Palaeotemperature Constraints to Landscape Evolution Models*. London: Geological Society of London, 2009. p.1-23. (Geological Society Special Publications, v. 324)

- MENDES, J. C.; ÁVILA, C.A; PEREIRA, R.M.; HEILBRON, M.P.L.; MOURA, C.A.V. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -ages of zircons from syn-collisional I-type porphyritic granites of the central Ribeira belt, SE Brazil. *Gondwana Research*, 9: 326-336, 2006.
- 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) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- MOREIRA, J. L.; MADEIRA, C. V.; GIL, J. A.; MACHADO, M. A. P. Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 15, n. 2, p. 531–549, 2007.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Landscapes on the edge: New horizons for research on Earth's Surface*. Washington, DC: The National Academies Press. 2010.
- PEREIRA, M. J.; FEIJÓ, F. J. Bacia de Santos. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 8, n. 1, p. 219 – 234, 1994.
- REINERS, P. W.; SHUSTER, D. L. Thermochronology and landscape evolution. *Physics Today*, v. 62, n. 9, p. 31–36, 2009.
- RIBEIRO, M. C. S. *História tectônica e exumação das Serras da Bocaina e Mantiqueira, SP/RJ*. 2003. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2003.
- RIBEIRO, M. C. S. *Termocronologia e história denudacional da Serra do Mar e implicações no controle deposicional da bacia de Santos*. 2007. 225 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2007.
- RICCOMINI, C. O. Rift Continental do Sudeste do Brasil. 1989. 256 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- RUTHERFORD, E. *Radio-Activity*. London: Cambridge University Press, 1905. 580 p.
- SILVA, L. G. E. *A interação entre os eventos tectônicos e a evolução geomorfológica da serra da Bocaina, Sudeste do Brasil*. 2006. 272 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

- STOCKLI, D. F.; FARLEY, K.A.; DUMITRU, T. A. Calibration of the apatite (U-Th)/He thermochronometer on an exhumed fault block, White Mountains, California. *Geology*, v. 28, p. 983–986, 2000.
- STRUTT, R. J. On the radioactive minerals. *Proceedings of the Royal Society*, A788–101, 1905.
- SUMMERFIELD, M.A. Tectonic Geomorphology: macroscale perspective. *Progress in Physical Geography*, 10(2): 227-238, 1986.
- SUMMERFIELD, M.A. Tectonic Geomorphology – Convergent plate boundaries, passive continental margins and supercontinent cycles. *Progress in Physical Geography*, 13(3): 431-441, 1989.
- SUMMERFIELD, M.A. *Geomorphology and global tectonics*. Chichester: John Wiley e Sons, 2000. 367 p.
- TELLO SAENZ, C. A.; HACKSPACHER, P. C.; HADLER NETO, J. C.; IUNES, P. J.; GUEDES, S.; RIBEIRO, L. F. B.; PAULO, S. R. Recognition of Cretaceous, Paleocene, and Neogene tectonic reactivation through apatite fission-track analysis in Precambrian areas of southeast Brazil: association with the opening of the south Atlantic Ocean. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 15, p. 765–774, 2003.
- THOMAS, M. F.; SUMMERFIELD, M. A. *Long-term landform development key themes and reserach problems*: Proceedings of the first International Conference On Geomorphology, 1986. Chichester: John Wiley, 1987. p. 935–956.
- VIGNOL-LELARGE, M. L. M.; SOLIANI JR., E.; POUPEAU, G. Datação pelos traços de fissão do Domínio Meridional da Serra do Mar (Arco de Ponta Grossa - Brasil). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., 1994, Balneário Camboriú. *Anais...* Balneário Camboriú: SBG, 1994. p. 379–380.
- VOOSEN, P. Atlas of the Underworld' reveals oceans and mountains lost to Earth's history. *Science*, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/news/2016/11/atlas-underworld-reveals-oceans-and-mountains-lost-earths-history>> Acesso em 02 de abril de 2018.

- WOLF, R. A.; FARLEY, K. A.; SILVER, L. T. Assessment of (U-Th)/He thermochronometry: the low-temperature history of the San Jacinto Mountains, California. *Geology*, v. 25, p. 65–68, 1997.
- WOLF, R. A.; FARLEY, K. A.; KASS, D. M. Modeling of the temperature sensitivity of the apatite (U–Th)/He thermochronometer. *Chemical Geology*, v. 148, p. 105–114, 1998.
- YIN, A. Structural analysis of the Valles Marineris fault zone: Possible evidence for large-scale strike-slip faulting on Mars. *Lithosphere*, (4)4: 286-330, 2012.
- ZALÁN, P. V. O Gráben da Guanabara: uma feição tectônica modelar mas pouco apreciada e entendida. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42., 2004, Araxá. *Anais...* Araxá: Sociedade Brasileira de Geologia, 2004. p. S03:44.
- ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. B. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 13, n. 2, p. 269– 300, 2005.
- ZEITLER, P. K.; HERCZEG, A. L.; MCDOUGALL, I.; HONDA, M. U-Th-He dating of apatite: a potential thermochronometer. *Geochim Cosmochim Acta*, v. 51, p. 2865–2868, 1987.