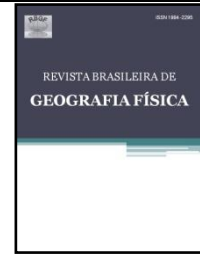




# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



## **Evolução Paleotopográfica da Margem Continental Brasileira durante o Fanerozoico: Evidências a partir da Termocronologia por Traços de Fissão em Apatitas**

Andréa Ritter Jelinek. Professora Titular, Bolsista Produtividade CNPq, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [andrea.jelinek@ufrgs.br](mailto:andrea.jelinek@ufrgs.br)

Artigo recebido em 27/03/2019 e aceito em 24/10/2019

### **RESUMO**

Este trabalho explora banco de dados traços de fissão em apatitas com o objetivo de desenvolver uma visão sinóptica de padrões de denudação através do espaço-tempo na margem continental brasileira. A resposta geomorfológica aos processos de rifteamento e ruptura continental variou ao longo da margem continental brasileira. No processo de construção do relevo desta margem foram registrados três episódios de resfriamento acelerado, que são vinculados a processos denudacionais: Cretáceo Inferior, Cretáceo Superior e Paleógeno-Neógeno. As margens continentais sudeste e leste apresentam uma morfologia de margem continental passiva característica, com as bacias sedimentares *offshore* separadas da região continental elevada, composta pelas Serra do Mar e da Serra da Mantiqueira, por uma planície costeira relativamente estreita. As idades de soerguimento são mais jovens do que a idade do rifteamento. O resfriamento do Paleógeno-Neógeno é resultado do aumento nas taxas de denudação, que são relacionados à formação e reativação de blocos de falha de alto ângulo que se moveram em resposta às tensões intraplaca. A região do Arco de Ponta Grossa apresenta o relevo mais jovem de toda a margem, sendo um alto topográfico associado ao magmatismo Paraná-Etendeka e limitado por zonas de cisalhamento. Duas porções da margem apresentam relevo diferenciado, com episódios de denudação pré-rifte. A Depressão Sertaneja, na margem nordeste, típica região semi-árida do nordeste caracterizada como um pediplano, com vales estreitos e vertentes dissecadas, com resfriamento do Permiano-Jurássico Inferior; e a margem sul, local com topografia baixa, e soerguimento lento e contínuo do Paleozoico.

Palavras-chave: Paleotopografia, margem continental de rifte, traços de fissão em apatita

## **Paleotopographic Evolution of the Brazilian Continental Margin during the Phanerozoic: Evidence from Apatite Fission Track Thermochronology**

### **ABSTRACT**

This study explores apatite fission track database with the objective of developing a synoptic view of denudation patterns across space and time in the Brazilian continental margin. The geomorphological response to the continental rift and rupture processes varied along the Brazilian continental margin. In the construction of the relief of this margin were recorded three episodes of accelerated cooling, which are linked to denudational processes: Lower Cretaceous, Upper Cretaceous and Paleogene-Neogene episodes. The southeast and eastern continental margin presents a characteristic passive continental margin morphology, with the offshore sedimentary basins separated from the elevated continental region, Serra do Mar and Serra da Mantiqueira, for a relatively narrow coastal plain. The uplifting ages are younger than the rift age. Accelerated cooling during Paleogene-Neogene is a result of increased denudation rates, which are related to the formation and reactivation of high angle fault blocks that have moved in response to intraplate stresses. The region of the Ponta Grossa Arch presents the youngest relief of the entire continental margin. It is a high topographic associated with Paraná-Etendeka magmatism and limited by shear zones. There are two parts of the continental margin with differentiated relief, which present episodes of pre-rift denudation. The Sertaneja Depression, in the northeast margin, a typical semi-arid northeast region characterized as a pediplane, with narrow valleys and dissected slopes, where occurs a Permian-Lower Jurassic cooling episode; and the south continental margin, where the topography is relatively, registering a slow and continuous uplift during the Paleozoic.

Keywords: Paleotopography, rift continental margin, apatite fission tracks

## Introdução

A mudança topográfica é uma das medidas mais informativas da deformação continental, porém os registros paleotopográficos são escassos ou, até mesmo, inexistentes na maioria dos cinturões orogênicos. O recente desenvolvimento de técnicas para medir a paleoelevação prometem progressos significativos na compreensão dos processos tectônicos continentais e sua interação com a erosão, e como estes processos juntos atuam para moldar a superfície da Terra. A presença atual de escarpas ao longo de margens passivas maduras suscita a questão de como o relevo se desenvolveu nos últimos 100 Ma, ou seja, qualquer topografia inicial ou topografia relacionada ao rifteamento persistiu desde a separação dos continentes, ou houve algum soerguimento pós-rifte. Para responder a estas questões pode-se considerar a história da erosão na região da margem continental, conseqüentemente, previsões acerca da evolução topográfica. Algumas das técnicas mais recentes incluem a termocronologia de baixa temperatura, em especial a análise por traços de fissão em apatita.

As escarpas das margens do tipo rifte são grandes características geomorfológicas que separam os platôs interiores de alta elevação de planícies costeiras baixas ao longo de margens continentais do tipo rifte em todo o mundo (p. ex., Austrália, oeste da África, Noruega, Índia Ocidental). Nossa compreensão básica da evolução destas escarpas em margens do tipo rifte melhorou consideravelmente nas últimas duas décadas, à medida que um extenso conjunto de dados de denudação de longo prazo foi disponibilizado. Esses dados foram obtidos utilizando principalmente termocronologia por traços de fissão em apatitas (p. ex., Dumitru et al., 1991; Gallagher et al., 1994; Brown et al., 2002; Gunnell et al., 2003). A história denudacional inferida a partir desses dados é consistente com as previsões de modelos numéricos de evolução da paisagem (p. ex., Gilchrist e Summerfield, 1990; Kooi e Beaumont, 1994; Tucker e Slingerland, 1994; van der Beek e Braun, 1999; van der Beek et al., 2002; Sacek et al., 2012). As escarpas refletem o desenvolvimento morfotectônico de margens passivas e esses estudos demonstraram que as escarpas das margens de tipo rifte são características de erosão de longo prazo associadas à elevação do comprimento de onda na escala de quilômetro da margem e seu interior continental. No entanto, tanto o tempo como os mecanismos de elevação continuam a ser discutidos. O tempo de

elevação foi interpretado de forma variável como pré, sin ou pós-rifte; embora o registro de denudação da maioria das escarpas de margem do tipo rifte possa ser explicado sem invocar a elevação pós-rifte (p. ex., Brown et al., 2002; van der Beek et al., 2002; Jelinek et al., 2014; Oliveira et al., 2016b), vários pesquisadores interpretaram o registro geomorfológico das margens rifte em termos de significativa elevação pós-rifte (por exemplo, Japsen et al., 2009; 2012a; Green et al., 2018).

A margem continental brasileira tem sua topografia e relevo atuais semelhantes em muitos aspectos àqueles de outras margens continentais tipo rifte ao redor do globo terrestre e denota estruturas geomorfológicas moldadas durante vários episódios de atividade tectônica iniciados no Neoproterozoico. Ela faz parte do sistema de riftes do Atlântico Sul, originado pela separação do Gondwana Ocidental no Cretáceo Inferior, cuja abertura iniciou-se no sul e propagou-se ao norte ao longo de reativações tectônicas de antigos lineamentos (Nürnberg e Müller, 1991; Meisling et al., 2001; Torsvik et al., 2009). A natureza da margem influenciou o desenvolvimento das bacias sedimentares *offshore* e de bacias intracontinentais. A separação do paleocontinente há aproximadamente 130 Ma foi afetada por rifteamento generalizado e pelo vulcanismo da Província Paraná-Etendeka (Zalán et al., 1991; Macdonald et al., 2003). A atividade vulcânica relacionada à pluma causou a subida da crosta, incluindo a exposição do embasamento Pré-Cambriano, seguido de erosão e deposição.

Esta revisão explora um extenso banco de dados de termocronologia por traços de fissão em apatitas na margem continental brasileira e pode ser utilizado como exemplo-chave de como a paleotopografia se relaciona com questões pendentes na tectônica continental. A base de dados utilizada foi compilada por Oliveira e Jelinek (2017), compreendendo um total de 742 amostras com idades traços de fissão em apatitas, que foram interpretadas por estas autoras em um contexto de tectônica regional. Neste trabalho este banco de dados é revisitado, agora com um olhar na relação que as idades têm com aspectos geomorfológicos, resultando na história de evolução paleotopográfica da margem continental brasileira durante o Fanerozoico. A densidade de dados é suficiente para desenvolver uma visão sinóptica de padrões de denudação através do espaço e do tempo na margem continental brasileira. Faz-se uma discussão dos resultados em termos dos

mecanismos responsáveis pela topografia atual e sua relação com a ruptura do Gondwana. Nossos dados indicam uma história prolongada de desenvolvimento da paisagem na margem continental brasileira, em que os eventos pré e pós-rifte tiveram, pelo menos, tanta influência quanto o soerguimento e denudação sin-rifte.

## A margem continental Brasileira

### *Contexto Geomorfológico*

As margens em torno do Oceano Atlântico Sul foram o foco de atenção considerável no debate sobre a origem e evolução das escarpas de margem do tipo rifte (p. ex., Gilchrist e Summerfield, 1990; Gallagher e Brown, 1999; Brown et al., 2000; Jelinek et al., 2014; Oliveira et al., 2016b). As margens do Atlântico Sul são caracterizadas por uma intensa atividade ígnea coincidente com a ruptura entre a América do Sul e África (Hawkesworth et al., 1992), mas também por magmatismo mais localizado em 80 e 50-40 Ma (Misuzaki et al., 1992; 2002). Vários autores exploraram os vínculos entre este magmatismo, a história de soerguimento e denudação da margem continental e o registro sedimentar das bacias adjacentes a esta margem (p. ex., Chang et al., 1992). No entanto, os padrões de soerguimento e denudação ao longo das margens do Atlântico Sul também parecem ser controlados pela reativação sin e pós-rifte das principais estruturas pré-existentes formadas no Proterozoico (Gallagher et al., 1994; Harman et al., 1998; Gallagher e Brown, 1999; Raab et al., 2002; Cobbold et al., 2007; Cogné et al., 2011).

A margem continental brasileira tem topografia variável desde o norte até o sul. Na região nordeste (Figura 1) não exibe topografia elevada próximo ao litoral, mas é caracterizada por dois planaltos costeiros, o Planalto da Borborema, a nordeste, e o Planalto da Conquista-Jequitinhonha, a sudoeste, que se elevam desde a planície costeira até elevações de aproximadamente 1200 m e 400-800 m, respectivamente. Um terceiro platô, a Chapada Diamantina, está localizado no interior e é caracterizado por uma superfície de cúpula de baixo relevo em altitudes de aproximadamente 1500-2000 m. A Chapada Diamantina é limitada a leste por uma escarpa de orientação norte-sul, localizada a 300-400 km no interior e incitada pelas cabeceiras dos rios Itapicuru e Jacuípe-Paraguaçu. Estes três planaltos cercam uma área de baixa

altitude, conhecida como Depressão Sertaneja. Embora as escarpas estejam desenvolvidas localmente em litologias mais resistentes, não há relação direta entre o tipo litológico e a ocorrência dos planaltos quando atravessam rochas de diferentes idades (principalmente do Proterozoico). As superfícies do platô foram interpretadas como peneplanos elevados (*sensu* King, 1967), o que teria registrado elevação cenozoica extensa (Peulvast et al., 2008; Japsen et al., 2012b).

O sistema de drenagem do nordeste do Brasil é composto principalmente de rios fluviais com direção WNW-ESE. A maior captação é a do rio São Francisco, que drena a Chapada Diamantina e uma grande parte do Craton de São Francisco, antes de atravessar a Depressão Sertaneja em um curso do sudeste para o Atlântico. O São Francisco é um sistema fluvial de longa duração, que evoluiu desde o meio do Cretáceo (Potter, 1997) e seu curso atual tem sido sugerido como resultado da captura precoce do rio Parnaíba no Cenozoico, no nordeste (cf. Karner e Driscoll, 1999). Outros rios principais presentes na área de estudo com uma tendência similar são os rios Jequitinhonha, Doce, Almada, Contas, Paraguaçu, Jacuípe, Itapicuru, Vaza-Barris e Sergipe. Semelhante aos planaltos, o controle estrutural nos sistemas fluviais é variável; por exemplo, os rios atravessam o rifte Mesozoico do Recôncavo-Tucano-Jatobá na Depressão Sertaneja, embora os Rios São Francisco, Vaza-Barris e Itapicuru sigam parcialmente os limites do segmento neste sistema de rifte. Da mesma forma, alguns rios (Jequitinhonha, Contas, Paraguaçu) cortam a Chapada Diamantina e o Planalto Conquista-Jequitinhonha, enquanto os rios Doce e São Francisco fluem ao redor da Serra da Mantiqueira e da Chapada Diamantina, respectivamente.

Já a região leste e sudeste da margem continental brasileira (Figura 2) tem relevo bastante acidentado, formado por serras cristalinas, composta por rochas antigas. As serras mais conhecidas são a Serra do Mar (1000 a 1500 m de altitude), escarpa orientada segundo o Oceano Atlântico, Serra da Mantiqueira (em média 2000 m, com picos que atingem até 2800 m), em Minas Gerais e São Paulo, Serra de Paranapiacaba, Serra do Espinhaço em Minas Gerais e na Bahia, Serra da Canastra, em São Paulo e Minas Gerais, e Serra dos Órgãos, no Rio de Janeiro.

A Serra do Mar constitui o divisor de águas entre os pequenos cursos de água que drenam para o litoral e aqueles que, embora oriundos de áreas próximas ao litoral, correm para

o interior como formadores dos tributários do rio Paraná.

A região sul da margem continental brasileira (Figura 3) é formada pela extensa área de terrenos Pré-Cambrianos que ocupam o Estado do Paraná, como continuidade das escarpas da Serra do Mar, da margem sudeste, estreitando-se no sul de Santa Catarina, à medida que as formações pertencentes a Bacia do Paraná se aproximam do oceano. O Planalto Cristalino Atlântico Paranaense ou Primeiro Planalto no Paraná, é formado pela Serra do Mar e de suas escarpas, com altitudes médias de 850-950 metros, sendo constituído por rochas cristalinas. Em Santa Catarina, o Planalto Cristalino se restringe a parte nordeste do Estado. É aí encontrada uma das mais importantes ocorrências de rochas Eopaleozoicas, no vale do Itajaí-Açu, na Bacia de Itajaí. A Bacia de Itajaí é uma unidade tectonoestratigráfica limitada por falhas, alongada ao longo da direção ENE. Em direção a sul, de maneira geral, a Borda oeste da Bacia do Paraná forma uma continuação dos maciços do Sudeste brasileiro.

As escarpas da Serra do Mar tem redução das altitudes em Santa Catarina, e são parcialmente descontínuas pela dissecação mais ampla do sistema de drenagem do Rio Itajaí e seus formadores, que tem nascentes nas formações Paleozoicas e corre em direção leste.

Os terrenos do escudo Pré-cambriano reaparecem no estado do Rio Grande do Sul (Figura 3), na latitude de Porto Alegre, e estende-se até o Uruguai, chamado de Escudo Sul-Riograndense. O relevo nesta região é suavemente ondulado, com altitudes entre 200-400 m, nos quais os divisores mais elevados não alcançam 500 m.

A Bacia do Paraná tem seu relevo constituído por altos planaltos (~1200 m), o Planalto Meridional, e cuestas concêntricas drenados pelos rios Uruguai e Paraná.

### *Contexto geológico*

A margem continental brasileira resulta da ruptura do paleocontinente Gondwana e está assentada sobre as rochas do embasamento Pré-Cambriano. O processo de ruptura do Gondwana Ocidental e consequente abertura do Oceano Atlântico Sul teve início na parte sul da América do Sul, durante o Triássico Superior-Jurássico Inferior, e propagou-se ao norte, alcançando a margem equatorial no Aptiano Superior-Albiano Inferior (Nürnberg e Müller, 1991; Meisling et al., 2001; Torsvik et al., 2009). A abertura do Oceano Atlântico Sul foi precedida

por volumoso magmatismo toleítico induzido pela Pluma Tristão da Cunha entre 145 e 130 Ma, originando a Província Paraná-Etendeka, localizada no sul da América do Sul e oeste da África (Zalán et al., 1991; Meisling et al., 2001; Macdonald et al., 2003).

As rochas do embasamento revelam uma segmentação ao longo da margem continental brasileira que reflete diferentes províncias estruturais (Figura 4). Essas províncias foram esboçadas pela primeira vez no trabalho de Almeida et al. (1981), com base na natureza do embasamento cristalino e da cobertura sedimentar. Recentemente, no contexto da colagem do Neoproterozoico, Brito Neves e Fuck (2013) revisaram este conceito.

A Província da Mantiqueira ocupa a maior parte da margem, estendendo-se desde o estado do Rio Grande do Sul até parte do estado da Bahia, e é afetada principalmente pelo Ciclo Brasileiro. Na parte sudeste, na área da Bacia de Santos, onde a escarpa da margem tipo rifte é mais claramente expressa, esta província apresenta altitudes superiores a 1500 m (Serra do Mar e Serra da Mantiqueira).

A Serra da Mantiqueira expõe principalmente unidades da Faixa Araçuaí, junto com blocos crustais paleoproterozoicos retrabalhados e rochas sedimentares intracratônicas paleoproterozoicas e mesoproterozoicas (Alkmin et al., 2006; Noce et al., 2007; Chemale Jr. et al., 2012). O cinturão Araçuaí é constituído por depósitos de rochas neoproterozoicas, tipo rifte passivo e depósitos sedimentares, granitos pré-, sin- e pós-cinemáticos neoproterozoicos a cambrianos, rochas vulcano-sedimentares e sedimentares imaturas, que foram interpretadas como depositadas em bacias de retro-arco e intramontanas (Pedrosa-Soares e Wiedemann-Leonardos, 2000).

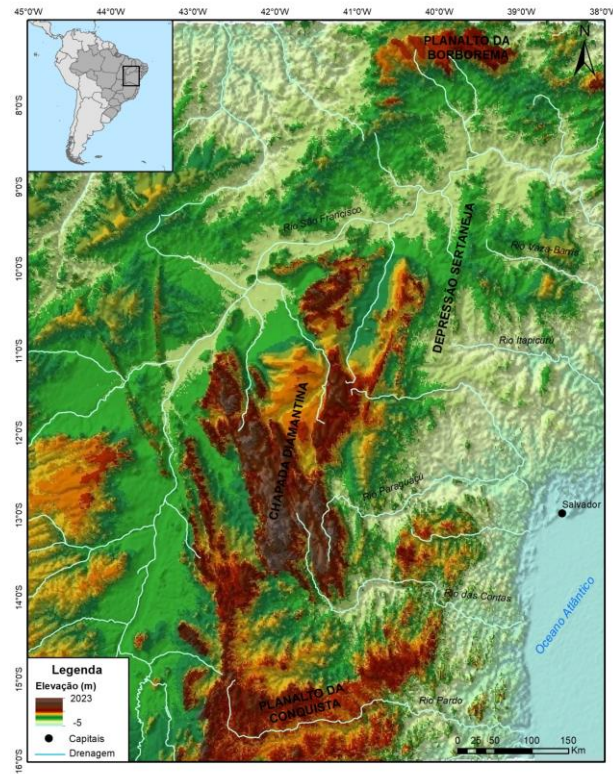


Figura 1. Mapa da margem continental nordeste do Brasil, destacando-se os elementos fisiográficos. Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000, Projeção UTM.

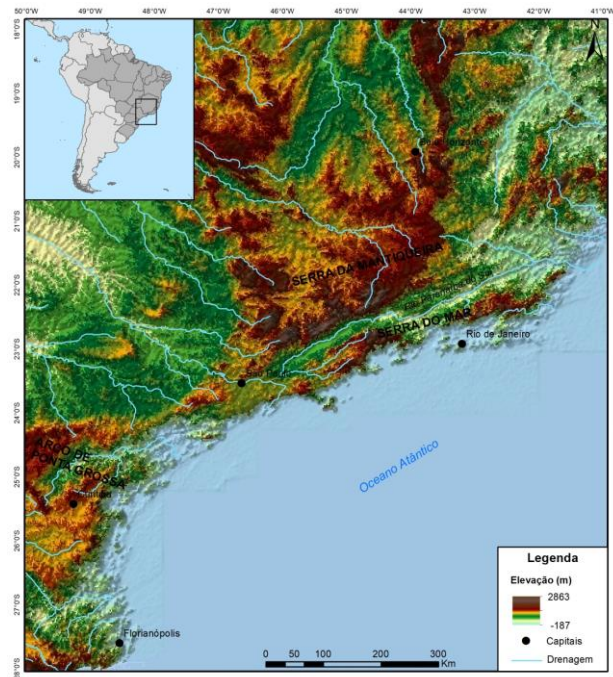


Figura 2. Mapa da margem continental leste-sudeste do Brasil, destacando-se os elementos fisiográficos. Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000, Projeção UTM.

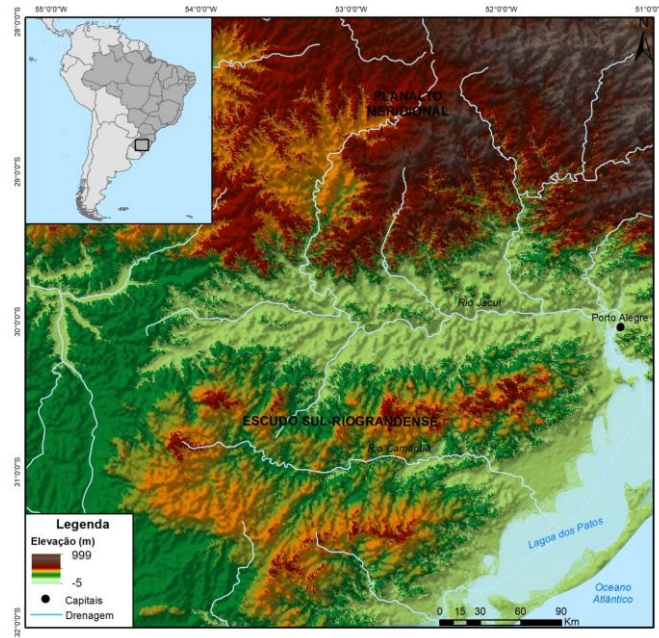


Figura 3. Mapa da margem continental sul do Brasil, destacando-se os elementos fisiográficos. Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000, Projeção UTM.

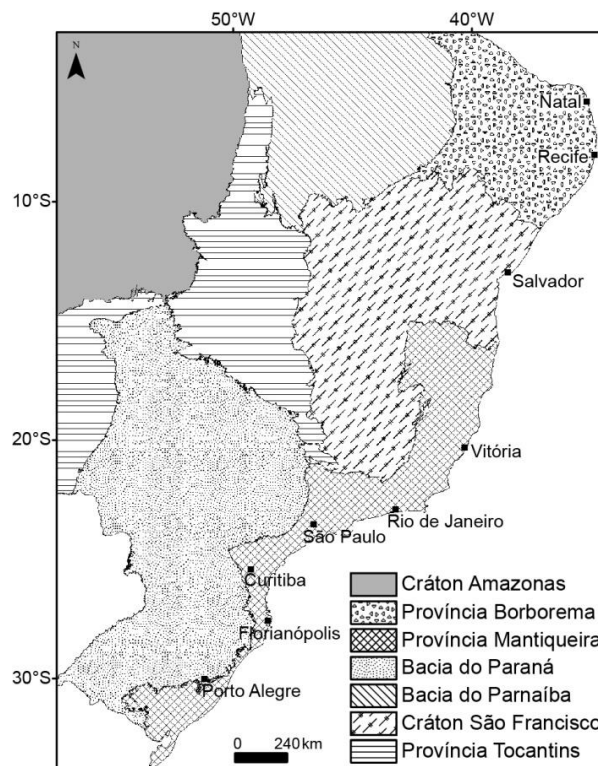


Figura 4. Mapa geotectônico das províncias da margem continental brasileira (Modificado de Brito Neves e Fuck, 2013; Oliveira e Jelinek, 2017).

O cráton São Francisco cobre quase todo o estado da Bahia e grande parte do estado de Minas Gerais, e é caracterizado por uma vasta planície interna e alguns platôs com elevações entre 500 e 1000 m na parte centro-leste (Almeida, 1977; Almeida et al., 1981). É constituído por rochas intensamente deformadas e metamorizadas de idade Arqueana a Paleoproterozoica, sobrepostas pelos sedimentos plataformais Meso- e Neoproterozoicos dos supergrupos de Espinhaço e São Francisco e limitado por cinturões de dobramento Brasileiro Neoproterozoicos desenvolvidos durante as orogênias colisionais que resultaram na formação do Gondwana Ocidental.

A Província da Borborema, localizada na margem nordeste brasileira, foi afetada intensamente pelo Ciclo Brasileiro, sendo coberta a oeste por rochas sedimentares Fanerozoicas e vulcânicas da Bacia do Parnaíba, e ao norte e leste por depósitos costeiros Meso-Cenozoicos.

A Bacia do Paraná é uma das maiores bacias intracratônicas originada do Ordoviciano ao Cretáceo e localizada na porção sudoeste do supercontinente Gondwana durante o Éon Fanerozoico (Milani, 1997). A presença dos maiores fluxos de lava basáltica da Província Paraná-Etendeka na crosta continental e dos milhares de corpos intrusivos de diabásio associados, evidenciam uma história térmica incomum que resultou na deformação dos estratos.

As áreas costeiras baixas ao sul de 15°S são cobertas por sedimentos costeiros recentes que incluem depósitos de praia e deltaicos.

## Material e métodos

*Termocronologia por traços de fissão em apatitas: o método e sua aplicação em processos superficiais*

O método de termocronologia por traços de fissão em apatitas (TFA) (Jelinek et al., 2010) baseia-se no fenômeno de que a fissão espontânea dos átomos de  $^{238}\text{U}$  contidos no retículo cristalino da apatita causa danos a este retículo (traços de fissão). Estes traços formam-se a uma taxa constante, determinada pela constante de decaimento da fissão espontânea do  $^{238}\text{U}$ . O número de traços presentes num dado cristal de apatita depende tanto da concentração de urânio quanto do tempo que estes traços levaram para acumular-se. Através da densidade de traços que interceptam a superfície interna do cristal e do seu conteúdo de urânio, a idade traços de fissão pode ser calculada.

A temperatura afeta significativamente a quantidade e o comprimento dos traços de fissão.

Quando os traços são submetidos a temperaturas superiores às de bloqueio para um dado termocronômetro,  $>60^\circ\text{C}$  no caso das apatitas, os traços sofrem encurtamento e redução na densidade, processo este chamado de *annealing* (Jelinek et al., 2010). A um elevado nível de *annealing*, acima de  $\sim 120^\circ\text{C}$ , durante escalas de tempo geológico, todos os traços são apagados e os seus comprimentos e idades são reduzidos a zero. Em síntese, a idade traços de fissão fornece informações quanto à época de resfriamento. Já o comprimento dos traços é utilizado para determinar a taxa de resfriamento, e consequentemente a história térmica da amostra, ou estilo do resfriamento. Maiores detalhes sobre o método são apresentados por Gleadow (1981), Green (1981), Laslett et al. (1987), Donelick et al. (2005), Tagami e O'Sullivan (2005) e Jelinek et al. (2010).

Nas últimas décadas, foram desenvolvidos métodos termocronológicos de baixa temperatura adequados à quantificação de histórias de resfriamento das rochas nos quilômetros superiores da crosta. Assim, a termocronologia de baixa temperatura, mais notadamente a termocronologia por TFA, ganhou o interesse de geomorfólogos, pela grande utilidade quando aplicada em estudos interdisciplinares de evolução da paisagem e geodinâmicos, possibilitando responder formulações quanto ao desenvolvimento de processos superficiais, ou seja, processos denudacionais de longa duração (escala de  $10^5$ ,  $10^8$  anos).

## *Termocronologia e a evolução superficial de longo termo*

O estágio atual de desenvolvimento de estudos que envolvam a termocronologia por TFA na margem continental brasileira nos permitiu acessar a um banco de dados enorme, conforme compilado por Oliveira e Jelinek (2017) (Figuras 5 e 6). Este número significativo de dados, quando analisados em conjunto, permite fazer uma abordagem regional, caracterizando períodos de resfriamento (soerguimento/denundação) e de reaquecimento (subsidência/anomalias térmicas), bem como quantificar os eventos erosivos das diferentes porções da margem continental brasileira. Desta forma, uma análise destes dados com um enfoque paleotopográfico foi possível de se realizar neste trabalho.

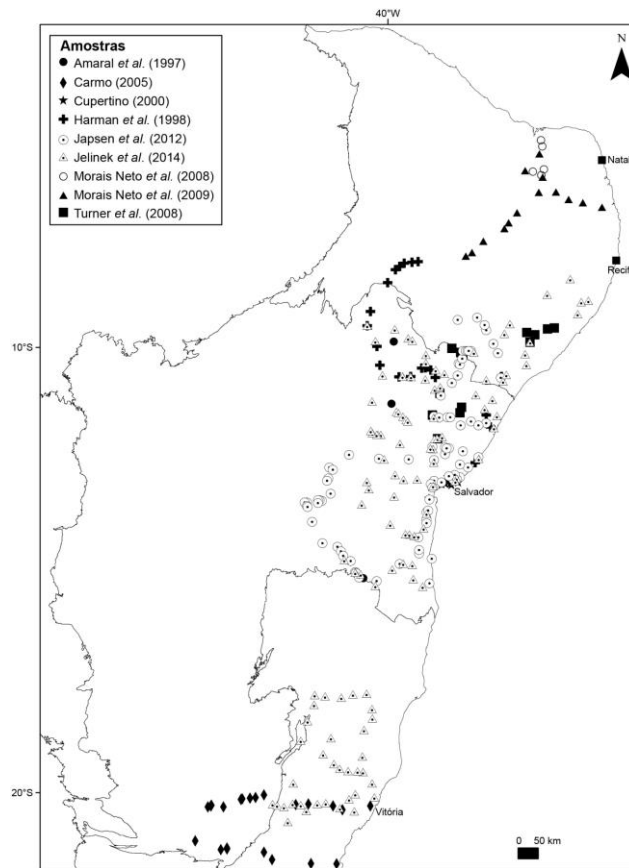


Figura 5. Mapa com a localização dos dados TFA publicados na região norte da Província Mantiqueira, cráton São Francisco e Província Borborema. Extraído de Oliveira e Jelinek (2017).

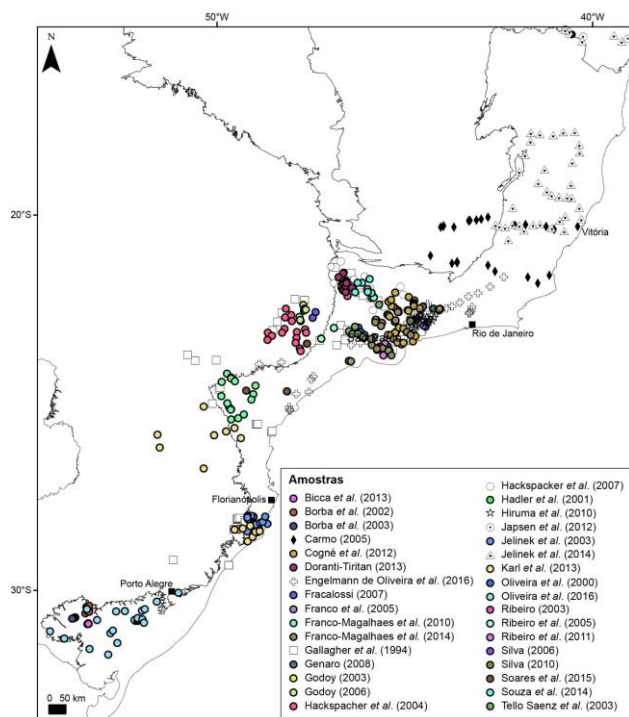


Figura 6. Mapa com a localização dos dados TFA publicados na margem sul, sudeste e leste do Brasil (Província Mantiqueira e Bacia do Paraná). Extraído de Oliveira e Jelinek (2017).



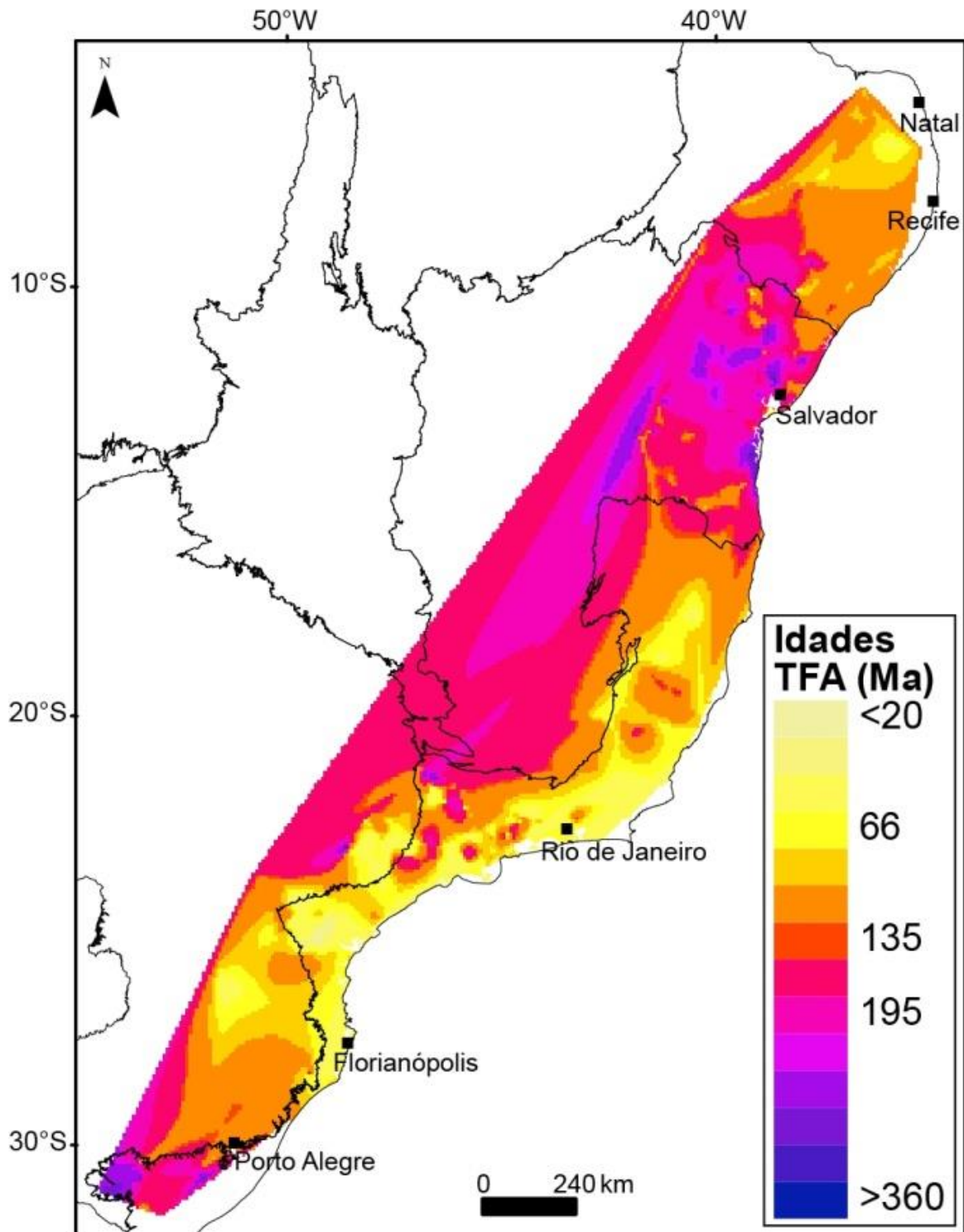


Figura 7. Mapa de contorno com as idades traços de fissão em apatitas compiladas ao longo da margem continental brasileira (Extraído de Oliveira e Jelinek, 2017).

Os padrões de idades observados ao longo da margem continental brasileira, e eventos de resfriamento associados, não estão apenas relacionados ao processo de rifteamento, mas envolvem outros processos importantes como o soerguimento isostático, em resposta à denudação da margem continental, e sedimentação nas bacias *onshore* e *offshore*, (Gilchrist e Summerfield, 1994; Gallagher et al., 1994). Estão também relacionados ao magmatismo pós-rifte e reativação tectônica das principais estruturas intracontinentais, que ocasionaram uma denudação localmente acelerada sobreposta ao padrão regional secular (Gallagher e Brown, 1999; Cobbold et al., 2001).

Em um contexto regional não se observa uma relação entre as idades e a altitude. No entanto, as idades mais jovens que 200 Ma tendem a estar associadas a altitudes inferiores a 500 m.

Todas as províncias estruturais presentes na margem continental brasileira apresentam idades que podem ser associadas com a separação continental entre América do Sul e África (~135-95 Ma), relacionadas ao episódio de resfriamento e denudação que levou à formação dessa margem. Outro episódio de resfriamento anterior presente na margem, exceto para a Bacia do Paraná, se deu durante o magmatismo do Cretáceo Superior e do Paleógeno.

A Bacia do Paraná registra apenas idades posteriores à ruptura do sudeste do Gondwana, coincidindo com aquelas atribuídas ao magmatismo Paraná-Etendeka, como consequência da influência térmica deste magmatismo, que zerou o termocronômetro TFA neste local.

## Discussão

### *Margem Continental Nordeste*

A região do nordeste do Brasil é aquela que possui a maior extensão de costa litorânea e, também, margem continental. O relevo nesta região é marcado pela existência do Planalto da Borborema e de áreas altas e planas, que constituem a Chapada Diamantina, mais interiorizada. Entre estas duas regiões, fica a Depressão Sertaneja, região do clima semi-árido do sertão nordestino.

O contexto geomorfológico da região não exhibe alto topográfico próximo ao litoral, mas é caracterizado pelo Planalto da Borborema, que se eleva da planície costeira até ~1000m ao norte do Rio São Francisco, cuja origem epirogênica está relacionada com a ruptura do supercontinente

Gondwana e ao magmatismo intraplaca Cenozoico (Lima et al., 2015). As idades neste local estão em sua maior parte relacionadas ao evento de resfriamento do Cretáceo, correspondente à abertura do Oceano Atlântico Sul. Lima et al. (2015), utilizando métodos sísmicos, sugerem que o soerguimento do Planalto da Borborema foi causado por desequilíbrio térmico na crosta durante a ruptura do Gondwana e abertura do Oceano Atlântico Sul, no período Cretáceo. O desequilíbrio térmico e o magmatismo sin- e pós-rifte (60-40 Ma) presentes ao longo da margem equatorial brasileira, na Província Borborema (Mizusaki et al., 2002), influenciaram a evolução dessa margem e registraram esses eventos nas idades observadas.

Diferentemente da região do Planalto da Borborema, na região do cráton São Francisco são registradas as idades mais antigas observadas, e um episódio de resfriamento durante o Permiano e Jurássico Inferior, reflexo da Orogenia Gondwanide (Jelinek et al., 2014). Esta região é típica da região do semi-árido do nordeste, caracterizada como um pediplano, com relevo monótono, vales estreitos e vertentes dissecadas, conhecida como Depressão Sertaneja. Não existe indício de que tenha havido um resfriamento significativo durante a formação das bacias de margem passiva nesta região, o que implica que a área não foi significativamente afetada pelos processos tectônicos e térmicos relacionados ao rifteamento. Disso, leva-se a crer que a denudação que ocorreu nesta área antecede a ruptura do Gondwana e abertura do Oceano Atlântico Sul, sendo de idade anterior ao Cretáceo. Aqui se conclui que essas são paisagens de baixo relevo, remanescentes, que podem ser de antes do início do Cenozoico, quando ocorre o aumento da erosão e incisão da margem. Neste sentido, embora seja óbvio que há platôs elevados na área de estudo, não acredito que seja possível correlacionar essas superfícies regionalmente ou usá-las como marcadores cronológicos e de paleo-elevação. A diferença fundamental nesta abordagem e aquelas que defendem a evolução da paisagem na margem continental a partir de superfícies de aplainamento (Valadão, 2009; Peulvast et al., 2008; Japsen et al., 2012a, 2012b) é que, nesta concepção da evolução da margem, variações espaciais na erosão (taxa) são permitidas e algumas partes da margem poderiam até estar erodindo, enquanto outras estariam coletando sedimentos. Além disso, uma vez que a margem sofreu vários km de denudação, baseado nos dados de termocronologia por traços de fissão em apatita, parece extremamente difícil reconstruir a paisagem, por exemplo, nos tempos

cretáceos tardios. Em contraste, estes outros autores extrapolam observações locais para torná-las válidas para toda a margem e desenvolvem uma história única de denudação (que é necessariamente complexa no tempo), enquanto desenvolvem seus argumentos baseados na topografia atual da margem.

#### *Margem continental Leste – Sudeste*

A margem continental leste e sudeste brasileira é formada por serras compostas por rochas cristalinas. As mais conhecidas são a Serra do Mar, com escarpa voltada para o Oceano Atlântico, e Serra da Mantiqueira, presente nos estados de Minas Gerais e São Paulo. Esta porção da margem continental apresenta uma morfologia de margem continental passiva característica, com as bacias sedimentares *offshore* (bacias de Santos, Campos e Espírito Santo) separadas da região continental elevada por uma planície costeira relativamente estreita. As idades refletem esta morfologia de margem passiva, com um aumento de 40-90 Ma na planície costeira, para idades superiores a 300 Ma no interior continental, configurando uma maior denudação na planície, como sugerido por diversos autores (Gallagher et al., 1994, 1995; Hiruma et al., 2010; Jelinek et al., 2014; Oliveira et al., 2016b). Em sua grande maioria, as idades desta região são significativamente mais jovens do que a idade do rifteamento que levou à formação da margem continental. Para a maior parte da margem, o resfriamento relativamente rápido durante o Paleógeno-Neógeno é interpretado como resultado de episódios de aumento nas taxas de denudação relacionados à formação e reativação de blocos de falha de alto ângulo que se moveram em resposta às tensões intraplaca. Estes autores discutem que as altas taxas de denudação pós-rifte indicadas para a margem, provavelmente refletem a geometria e o momento da reativação tectônica pós-rifte de estruturas intracontinentais maiores. Neste cenário, as taxas de denudação são correlacionáveis às espessuras do registro sedimentar *offshore* nas bacias de Santos e Espírito Santo.

A região do Arco de Ponta Grossa, no estado do Paraná, é um alto topográfico caracterizado por um grande número de diques associados ao magmatismo Paraná-Etendeka e limitado por zonas de cisalhamento NW-SE, sendo que apresenta as idades mais jovens de toda a margem continental (Franco-Magalhaes et al., 2010). Este arco influenciou no escalonamento do relevo nos três planaltos em escadaria (Primeiro,

Segundo e Terceiro Planalto Paranaense) e na concavidade do limite da Bacia do Paraná, que apresenta uma expressiva reentrância coincidente com o eixo mais elevado do arco, onde a erosão removeu as rochas mais soerguidas e expôs as rochas mais antigas do substrato.

#### *Margem continental Sul*

A margem continental sul brasileira, no estado do Rio Grande do Sul, é caracterizada por uma topografia relativamente baixa, conhecida como região do Escudo Sul-rio-grandense, e uma grande planície costeira, não apresentando características morfológicas típicas de margem continental passiva. As idades são bastante antigas e estão relacionadas ao resfriamento contínuo e relativamente lento durante o Paleozoico (Ordoviciano ao Permiano), refletindo um possível soerguimento da área em resposta à colisão entre o terreno Precordillera e o cráton Rio de la Plata, na margem oeste do Gondwana Ocidental, durante as orogenias Famatiniana e Gondwanide (Oliveira et al., 2016a). Este padrão de idades se estende ao longo da margem continental do Uruguai.

A parte mais interiorizada da margem sul, no limite entre os estados de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul, é composta por notáveis feições geomorfológicas formadas pelo corte abrupto do Planalto Meridional através de paredões verticalizados de rochas vulcânicas, que por uma grande extensão mostram uma sucessão de canions, próximos à planície do litoral atlântico. Este conjunto de cânions recebe o nome de Aparados da Serra e as idades observadas estão associadas ao magmatismo Paraná-Etendeka (Gallagher et al., 1994).

### **Conclusão**

Em escala regional, a resposta geomorfológica aos processos de rifteamento e ruptura continental, indicada pela termocronologia de baixa temperatura, variou significativamente ao longo da margem continental brasileira. No processo de construção do relevo desta margem foram registrados três episódios de resfriamento acelerado, que são vinculados a processos denudacionais: Cretáceo Inferior, Cretáceo Superior e Paleógeno-Neógeno. De modo geral, a margem continental sudeste e leste apresenta uma morfologia de margem continental passiva característica, com as bacias sedimentares *offshore* (Bacias de Santos, Campos e Espírito Santo)

separadas da região continental elevada (Serra do Mar e Serra da Mantiqueira) por uma planície costeira relativamente estreita. As idades de soerguimento são mais jovens do que a idade do rifteamento que levou à formação da margem continental. O resfriamento acelerado durante o Paleógeno-Neógeno é resultado de episódios de aumento nas taxas de denudação, relacionados à formação e reativação de blocos de falha de alto ângulo que se moveram em resposta às tensões intraplaca, resultando no relevo atual. A região do Arco de Ponta Grossa apresenta o relevo mais jovem de toda a margem continental. A região é um alto topográfico caracterizado por um grande número de diques associados ao magmatismo Paraná-Etendeka e limitado por zonas de cisalhamento NW-SE, e as idades refletem estes eventos mais recentes na evolução da margem. No entanto, existem duas porções da margem continental com relevo diferenciado, que apresentam episódios de denudação pré-rifte. Uma delas é na margem nordeste, na Depressão Sertaneja, onde ocorre um episódio de resfriamento do Permiano-Jurássico Inferior, reflexo da Orogenia Gondwanide. É uma típica região semi-árida do nordeste caracterizada como um pediplano, com relevo monótono, vales estreitos e vertentes dissecadas. Outra é a margem sul, onde ocorre um soerguimento lento e contínuo durante o Paleozoico, na margem oeste do Gondwana Ocidental durante as orogenias Famatiniana e Gondwanide. Neste local a topografia é relativamente baixa e observa-se uma planície costeira maior. Estes dois locais, coincidentemente, são relacionados com zonas cratônicas, o cráton do São Francisco e do Rio de La Plata, respectivamente; o que nos leva a fazer uma correlação entre zonas cratônicas e idades termocronológicas mais antigas.

### Agradecimentos

A autora agradece ao CNPq pelo apoio financeiro recebido para desenvolvimento do estudo.

### Referências

- Alkmin, F.F., Marshakk, S., Pedrosa-Soares, A.C., Peres, G.G., Cruz, S., Whittington, A., 2006. Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research* 149, 43-64.
- Almeida, F.F.M., 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências* 7, 349-364.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews* 17, 1-29.
- Amaral, G., Born, H., Hadler, J.C.N., Iunes, P.J., Kawashita, K., Machado Jr., D.L., Oliveira, E.P., Paulo, S.R., Tello, C.A.S., 1997. Fission track analysis of apatites from Sao Francisco craton and Mesozoic alkaline-carbonatite complexes from central and southeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 10, 285-294.
- Bicca, M.M., Chemale Jr., F., Jelinek, A.R., Oliveira, C.H.E., Guadagnin, F., Armstrong, R., 2013. Tectonic evolution and provenance of the Santa Bárbara Group, Camaquã Mines region, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 48, 173-192.
- Borba, A.W., Lima, E.F., Vignol-Lelargel, M.L.M., Mizusaki, A.M.P., Sparrenberg, I., Barros, C.E., 2003. Significance of Late Paleozoic Fission-track Ages in Volcanic Rocks from the Lavras Do Sul Region, Southernmost Brazil. *Gondwana Research* 6, 79-88.
- Borba, A.W., Vignol-Lelargel, M.L.M., Mizusaki, A.M.P., 2002. Uplift and denudation of the Caçapava do Sulgranitoids (southern Brazil) during Late Paleozoic and Mesozoic: constraints from apatite fission-track data. *Journal of South American Earth Sciences* 15, 683-692.
- Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 2013. Neoproterozoic evolution of the basement of the South-American platform. *Journal of South American Earth Sciences* 47, 72-89.
- Brown, R.W., Gallagher, K., Gleadow, A.J.W., Summerfield, M.A., 2000. Morphotectonic evolution of the South Atlantic margins of Africa and South America. In: Summerfield, M. A. (Org.). *Geomorphology and Global Tectonics*. John Wiley, New York, p. 255-281.
- Brown, R.W., Summerfield, M.A., Gleadow, A.J.W., 2002. Denudational history along a transect across the eastern margin (Drakensberg Escarpment) of southern Africa derived from apatite fission-track thermochronology. *Journal of Geophysical Research* 107, 2350.
- Carmo, I.O., 2005. *Geocronologia do Intemperismo Cenozóico no Sudeste do Brasil*. Rio de Janeiro, 134p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- Chang, H.K., Kowsmann, R.O., Figueiredo, A.M.F., Bender, A., 1992. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. *Tectonophysics* 213, 97-138.
- Chemale Jr., F., Dussin, I.A., Alkmin, F.F., Martins, M.S., Queiroga, G., Armstrong, R., Santos, M.N., 2012. Unravelling a Proterozoic basin history through detrital zircon geochronology: The case of the Espinhaço Supergroup, Minas Gerais, Brazil. *Gondwana Research* 22, 200-206.
- Cobbold, P.R., Meisling, K.E., Mount, V.S., 2001. Reactivation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos basins, southeastern Brazil. *AAPG Bulletin* 85, 1925-1944.
- Cobbold, P.R., Rossello, E.A., Roperch, P., Arriagada, C., Gómez, L.A., Lima, C., 2007. Distribution, timing, and causes of Andean deformation across South America. *Geological Society Special Publications* 272, 321-343.
- Cogné, N., Gallagher, K., Cobbold, P.R., 2011. 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* 309, 118-130.
- Cogné, N., Gallagher, K., Cobbold, P.R., Riccomini, C., Gautheron, C., 2012. Post-breakup tectonics in southeast Brazil from thermochronological data and combined inverse-forward thermal history modeling. *Journal of Geophysical Research* 117, B11413.
- Cupertino, J.A., 2000. Evolução tectono-climática na fase Rife das bacias de Camamu, parte norte, e sul do Recôncavo, com ênfase na utilização de isótopos estáveis e traços de fissão. Porto Alegre. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Donelick, R.A., O'Sullivan, P.B., Ketcham, R.A., 2005. Apatite Fission-Track Analysis. In: Reiners, P.W., Ehlers, T.A. (Org.). *Low-Temperature Thermochronology: Techniques, Interpretations, and Applications*. Washington: Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 58, p. 49-94.
- Doranti-Tiritan, C., 2013. Evolução Geomórfica e Modelagem Termocinemática 3D da Região do Maciço Alcalino de Poços de Caldas (SP/MG). Rio Claro, 160p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia Regional, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- Dumitru, T.A., Hill, K.C., Coyle, D.A., Duddy, I.R., Foster, D.A., Gleadow, A.J.W., Green, P.F., Kohn, B.P., Laslett, G.M., O'Sullivan, A.J., 1991. Fission track thermochronology: Application to continental rifting of South-eastern Australia. *Australian Petroleum Exploration Association Journal* 31, 131-142.
- Engelmann de Oliveira, C.H.E., Jelinek, A.R., Chemale, F., Cupertino, J.A., 2016. Thermotectonic history of the southeastern Brazilian margin: Evidence from apatite fission track data of the offshore Santos Basin and continental basement. *Tectonophysics* 685, 21-34.
- Fracalossi, C.P., 2007. Uso da termocronologia por traços de fissão em apatita no reconhecimento de áreas de recarga e análises isotópicas de  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  em águas subterrâneas do aquífero Itararé no município de Americana (SP). Rio Claro, 81p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- Franco-Magalhaes, A.O., Hackspacher, P.C., Godoy, D.F., Ribeiro, L.F.B., Guedes, S., 2005. História Térmica do Maciço Alcalino de Poços de Caldas (SP/MP) e Adjacências Através da Análise de Datação Por Traços de Fissão em Apatitas. *Revista Brasileira de Geociências* 35, 351-358.
- Franco-Magalhaes, A.O., Hackspacher, P.C., Glasmacher, U.A., Saad, A.R., 2010. Rift to post-rift evolution of a "passive" continental margin: the Ponta Grossa Arch, SE Brazil. *International Journal of Earth Sciences* 99, 1599-1613.
- Franco-Magalhaes, A.O.B., Cuglieri, M.A.A., Hackspacher, P.C., Saad, A.R., 2014. Long-term landscape evolution and post-rift reactivation in the southeastern Brazilian passive continental margin: Taubaté basin. *International Journal of Earth Sciences* 103, 441-453.
- Gallagher, K., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M., 1994. The denudation history of the onshore continental margin of SE Brazil inferred from apatite fission track data. *Journal of Geophysical Research* 99, 18117-18145.
- Gallagher, K., Brown, R., 1999. The Mesozoic denudation history of the Atlantic margins of southern Africa and southeast Brazil and the relationship to offshore sedimentation. *Geological Society Special Publications* 153, 41-53.
- Gallagher, K., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M., 1995. Denudation, fission track analysis and the long-term evolution of passive margin topography: application to the southeast

- Brazilian margin. *Journal of South America Earth Sciences* 8, 65-77.
- Genaro, D.T., 2008. Contribuição ao conhecimento de processos atuantes no rifteamento continental, por traços de fissão em zircões e apatitas, aplicados no rift continental do sudeste do Brasil, bacias de Taubaté, Resende, Volta Redonda e circunvizinhanças. Rio Claro, 131p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Estadual Paulista.
- Gilchrist, A.R., Summerfield, M.A., 1990. Differential denudation and flexural isostasy in formation of rifted-margin upwarps. *Nature* 346, 739-742.
- Gleadow, A.J.W., 1981. Fission-track dating methods: what are the real alternatives? *Nuclear Tracks* 5, 3-14.
- Godoy, D.F., 2003. História térmica e denudação do maciço alcalino de Poços de Caldas e circunvizinhanças: Área Norte. Rio Claro, 74p. Trabalho de conclusão de curso, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- Godoy, D.F., 2006. Termotectônica por traços de fissão em apatitas dos altos estruturais de Pitanga, Pau d'Álho e Jibóia-centro do Estado de São Paulo. Rio Claro, 86p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Estadual Paulista.
- Green, P.F., 1981. A new look at statistics in fission-track dating. *Nuclear tracks* 5, 77-86.
- Green, P.F., Japsen, P., Chalmers, J.A., Bonow, J.M., Duddy, I.R., 2018. Post-breakup burial and exhumation of passive continental margins: Seven proposition to inform geodynamics models. *Gondwana Research* 53, 58-81.
- Gunnell, Y., Gallagher, K., Carter, A., Widdowson, M., Hurford, A.J., 2003. Denudation history of the continental margin of western peninsular India since the early Mesozoic – reconciling apatite fission-track data with geomorphology. *Earth and Planetary Science Letters* 215, 187-201.
- Hackspacher, P.C., Godoy, D.F., Ribeiro, L.F.B., Neto, J.C.H., Franco, A.O.B., 2007. Modelagem térmica e geomorfologia da borda sul do Cráton do São Francisco: termocronologia por traços de fissão em apatita. *Revista Brasileira de Geociências* 37, 76-86.
- Hackspacher, P.C., Ribeiro, L.F.B., Ribeiro, M.C.S., Fetter, A.H., Hadler Neto, J.C., Tello Saenz, C.A., Dantas, E.L., 2004. Consolidation and break-up of the South American platform in Southeastern Brazil: tectonothermal and denudation histories. *Gondwana Research* 7, 91-101.
- Hadler Neto J.C., Paulo S.R., Iunes P.J., Tello Saenz C.A., Balestrieri M.L., Bigazzi G., Curvo E.A.C., Hackspacher P.C., 2001. A PC compatible Brazilian software for obtaining thermal histories using apatite fission track analysis. *Radiation Measurements* 34, 149-154.
- Harman, R., Gallagher, K., Brown, R., Raza, A., Bizzi, L., 1998. Accelerated denudation and tectonic/geomorphic reactivation of the cratons of northeastern Brazil during the Late Cretaceous. *Journal of Geophysical Research* 103, 27091-27105.
- Hiruma, S.T., Riccomini, C., Modenesi-Gauttieri, M.C., Hackspacher, P.C., Hadler Neto, J.C., Franco-Magalhaes, A.O.B., 2010. Denudation history of the Bocaina Plateau, Serra do Mar, southeastern Brazil: relationships to Gondwana breakup and passive margin development. *Gondwana Research* 18, 674-687.
- Hawkesworth, C.J., Gallagher, K., Kelley, S., Mantovani, M., Peate, D.W., Regelous, M., Rogers, N.W., 1992. Paraná magmatism and the opening of the South Atlantic. *Geological Society Special Publications* 68, 221-240.
- Japsen, P., Bonow, J.M., Green, P.F., Chalmers, J.A., Lidmar-Bergström, K., 2009. Formation, uplift and dissection of planation surfaces at passive continental margins – a new approach. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 683-699.
- Japsen, P., Chalmers, J.A., Green, P.F., Bonow, J.M., 2012a. Elevated, passive continental margins: Not rift shoulders, but expressions of episodic, post-rift burial and exhumation. *Global and Planetary Change* 90-9, 73-86.
- Japsen, P., Bonow, J.M., Green, P.F., Cobbold, P.R., Chiossi, D., Lilletveit, R., Magnavita, L.P., Pedreira, A., 2012b. Episodic burial and exhumation in NE Brazil after opening of the South Atlantic. *Geological Society of America Bulletin* 124, 800816.
- Jelinek, A.R., Chemale, F., Van Der Beek, P.A., Guadagnin, F., Cupertino, J.A., Viana, A., 2014. Denudation history and landscape evolution of the northern East-Brazilian continental margin from apatite fission-track thermochronology. *Journal of South American Earth Sciences* 54, 158-181.
- Jelinek, A.R., Bastos Neto, A.C., Poupeau, G., 2003. Análise por traços de fissão em apatitas do Distrito Fluorítico de Santa Catarina: relações entre hidrotermalismo e evolução da

- margem continental. *Brazilian Journal of Geology* 33, 289-298.
- Jelinek, A.R., Gomes, C.H., Dias, A.N.C., Guadagnin, F., Chemale Jr., F., Souza, I.A., 2010. Termocronologia aplicada às Geociências: análise por traços de fissão. *Pesquisas em Geociências* 37, 191-203.
- Karl, M., Glasmacher, U.A., Kollenz, S., Franco-Magalhaes, A.O., Stockli, D.F., Hackspacher, P.C., 2013. Evolution of the South Atlantic passive continental margin in southern Brazil derived from zircon and apatite (U–Th–Sm)/He and fission-track data. *Tectonophysics* 604, 224-244.
- Karnel, G.D., Driscoll, N.W., 1999. Tectonic and stratigraphic development of the West African and eastern Brazilian Margins: insights from quantitative basin modelling. *Geological Society Special Publications* 153, 11-40.
- King, L.C., 1967. *The morphology of the Earth*. Edinburgh: Oliver and Boyd, 699p.
- Kooi, H., Beaumont, C., 1994. Escarpment evolution on high-elevation rifted margins; insights derived from a surface processes model that combines diffusion, advection and reaction. *Journal of Geophysical Research* 99, 12191-12210.
- Laslett, G.M., Green, P.F., Duddy, I.R., Gleadow, A.J.W., 1987. Thermal annealing of fission tracks in apatite 2. A quantitative analysis. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section* 65, 1-13.
- Lima, M.V.A., Berrocal, J., Soares, J.E., Fuck, R.A., 2015. Deep seismic refraction experiment in northeast Brazil: New constraints for Borborema province evolution. *Journal of South American Earth Sciences* 58, 335-349.
- Macdonald, D., Gomez-Perez, I., Franzese, J., Spalletti, L., Lawver, L., Gahagan, L., Paton, D., 2003. Mesozoic break-up of SW Gondwana: implications for regional hydrocarbon potential of the southern South Atlantic. *Marine and Petroleum Geology* 20, 287-308.
- Meisling, K.E., Cobbold, P.R., Mount, V.S., 2001. Segmentation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos basins, southeastern Brazil. *AAPG bulletin* 85, 1903-1924.
- Milani, E.J., 1997. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental*. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 255p.
- Mizusaki, A.M.P., Thomaz-Filho, A., Milani, E.J., Cesero, P., 2002. Mesozoic and Cenozoic igneous activity and its tectonic control in northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 15, 183-198.
- Morais Neto, J.M., Green, P.F., Karner, G.D., Alkmim, F.F., 2008. Age of the Serra do Martins Formation, Borborema Plateau, northeastern Brazil: constraints from apatite and zircon fission track analysis. *Boletim de Geociências da Petrobras* 16, 23-52.
- Morais Neto, J.M., Hegarty, K.A., Karner, G.D., Alkmim, F.F., 2009. Timing and mechanisms for the generation and modification of the anomalous topography of the Borborema Province, northeastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology* 26, 1070-1086.
- Noce, C.M., Pedrosa-Soares, A.C., Silva, L.C., Armstrong, R., Piuzana, D., 2007. Evolution of polycyclic basement complexes in the Araçuaí Orogen, based on U–Pb SHRIMP data: Implications for Brazil–Africa links in Paleoproterozoic time. *Precambrian Research* 159, 60-78.
- Nürnberg, D., Müller, R.D., 1991. The tectonic evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to present. *Tectonophysics* 191, 27-53.
- Oliveira, S.G., Hackspacher, P.C., Neto, J.C.H., Iunes, P.J., Paulo, S.R., Ribeiro, L.F.B., Saenz, C. A.T., 2008. Constraints on the evolution and thermal history of the continental platform of southeast Brazil, Sao Paulo state, using apatite fission track analysis (AFTA). *Revista Brasileira de Geociências* 30, 107-109.
- Oliveira, C.H.E., Jelinek, A.R., Chemale, F., Bernet, M., 2016a. Evidence of post-Gondwana breakup in Southern Brazilian Shield: Insights from apatite and zircon fission track thermochronology. *Tectonophysics* 666, 173-187.
- Oliveira, C.H.E., Jelinek, A.R., Chemale, F., Cupertino, J.A., 2016b. Thermotectonic history of the southeastern Brazilian margin: evidence from apatite fission track data of the offshore Santos Basin and continental basement. *Tectonophysics* 685, 21-34.
- Oliveira, C.H.E., Jelinek, A.R., 2017. História termotectônica da margem continental brasileira a partir de dados de traços de fissão em apatita. *Pesquisas em Geociências* 44, 387-400.
- Pedrosa-Soares, A.C., Wiedemann-Leonardos, C.M., 2000. Evolution of the Araçuaí belt and its connection to the Ribeira Belt, Eastern Brazil. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Org.). *Tectonic Evolution of South America*. Sociedade

- Brasileira de Geologia, Rio de Janeiro, p. 265-285.
- Peulvast, J.P., Sales, V.C., Bâtard, F., Gunnell, Y., 2008. Low post-Cenomanian denudation depths across the Brazilian Northeast: Implications for long-term landscape evolution at a transform continental margin. *Global and Planetary Change* 62, 39-60.
- Potter, P.E., 1997. The Mesozoic and Cenozoic paleodrainage of South America: a natural history. *Journal of South American Earth Sciences* 10, 331-344.
- Raab, M.J., Brown, R.W., Gallagher, K., Carter, A., Weber, K., 2002. Late Cretaceous reactivation of major crustal shear zones in northern Namibia: constraints from apatite fission track analysis. *Tectonophysics* 349, 75-92.
- Ribeiro, L.F.B., 2003. Morfotectônica da região centro-leste do estado de São Paulo e áreas adjacentes de Minas Gerais: Termocronologia e Paleotensões. Rio Claro, 203p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- Ribeiro, L.F.B., Hackspacher, P.C., Ribeiro, M.C.S., Hadler Neto, J.C., Tello Saenz, C.A., Iunes, P.J., Franco, A.B., Godoy, D.F., 2005. Thermotectonic and fault dynamic analysis of Precambrian basement and tectonic constraints within the Parana basin. *Radiation Measurements* 39, 669-673.
- Ribeiro, M.C.S., Hackspacher, P.C., Ribeiro, L.F.B., Neto, J.C.H., 2011. Evolução tectônica e denudacional da Serra do Mar (SE/Brasil) no limite entre o Cretáceo Superior e Paleoceno, utilizando análises de traços de fissão e U-Th/He em apatitas. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 12, 3-14.
- Sacek, V., Braun, J., Van Der Beek, P.A., 2012. The influence of rifting on escarpment migration on high elevation passive continental margins. *Journal of Geophysical Research* 117, B04407.
- Silva, J.S., 2010. Reconstrução termocronológica do maciço alcalino de Poços de Caldas e áreas adjacentes por traços de fissão e (U-Th-Sm)/He em apatitas e zircão. Rio Claro. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- Silva, L.G.A.E., 2006. A Interação entre os Eventos Tectônicos e a Evolução Geomorfológica da Serra da Bocaina, Sudeste do Brasil. Rio de Janeiro, 273p. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- Soares, C.J., Guedes, S., Jonckheere, R., Hadler, J.C., Passarella, S.M., Dias, A.N.C., 2016. Apatite fission-track analysis of Cretaceous alkaline rocks of Ponta Grossa and Alto Paranaíba Arches, Brazil. *Geological Journal* 51, 805-810.
- Souza, D.H., Hackspacher, P.C., Doranti-Tiritan, C., Godoy, D.F., 2014. Comparação da dinâmica evolutiva, em longo e curto prazo, entre o Planalto de Poços de Caldas e o Planalto de São Pedro de Caldas. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 15, 251-272.
- Tagami, T., O'Sullivan, P.B., 2005. Fundamentals of fission-track thermochronology. In: Reiners, P.W., Ehlers, T.A. (Org.). *Low-Temperature Thermochronology: Techniques, Interpretations, and Applications*. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Washington, v. 58, p. 19-47.
- Tello Saenz, C., Hackspacher, P.C., Neto, J.H., Iunes, P.J., Guedes, S., Ribeiro, L.F.B., Paulo, S.R., 2003. 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* 15, 765-774.
- Torsvik, T.H., Rouse, S., Labails, C., Smethurst, M.A., 2009. A new scheme for the opening of the South Atlantic Ocean and the dissection of an Aptian salt basin. *Geophysical Journal International* 177, 1315-1333.
- Tucker, G.E., Slingerland, R.L., 1994. Erosional dynamics, flexural isostasy, and long-lived escarpments: a numerical modeling study. *Journal of Geophysical Research* 99, 12229-12243.
- Turner, J.P., Green, P.F., Holford, S.P., Lawrence, S.R., 2008. Thermal history of the Rio Muni (West Africa) e NE Brazil margins during continental breakup. *Earth and Planetary Science Letters* 270, 354-367.
- Valadão, R.C., 2009. Geodinâmica de superfícies de aplainamento, desnudação continental e tectônica ativa como condicionantes da megageomorfologia do Brasil oriental. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 10, 77-90.
- Van Der Beek, P.A., Braun, J., 1999. Controls on post-mid-Cretaceous landscape evolution in the



- southeastern highlands of Australia: Insights from numerical surface process models. *Journal of Geophysical Research* 104, 4945-4966.
- Van Der Beek, P.A., Summerfield, M.A., Braun, J., Brown, R.W., Fleming, A., 2002. Modeling post-break-up landscape development and denudational history across the southeast African (Drakensberg Escarpment) margin. *Journal of Geophysical Research* 107, 2351.
- Zalan, P.V., Wolff, S., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Conceição, J.C.J., Appi, V.T., Santos Neto, E.V., Cerqueira, J.R., Marques, A., 1991. The Paraná Basin, Brazil. In: Leighton, M.W., Kolata, D.R., Oltz, D.F., James Eidel, J. (Org.). *Interior Cratonic Basins. Memoir 51. AAPG, Tulsa, Oklahoma*, p. 681-708.