

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 05/03/2023.

RODRIGO IRINEU CERRI

Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente

**Gênese da tectonossequência Jaibaras (Ediacarano - Ordoviciano)
e sua herança na sedimentação da sequência Serra Grande
(Ordoviciano - Siluriano), borda nordeste da Bacia do Parnaíba**

Orientador: Prof. Dr. Lucas Veríssimo Warren

Coorientador: Prof. Dr. Mario Luis Assine

Rio Claro - SP

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas Câmpus
de Rio Claro

**Gênese da tectonossequência Jaibaras (Ediacarano - Ordoviciano)
e sua herança na sedimentação da sequência Serra Grande
(Ordoviciano - Siluriano), borda nordeste da Bacia do Parnaíba**

RODRIGO IRINEU CERRI

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador:

Prof. Dr. Lucas Verissimo Warren

Coorientador:

Prof. Dr. Mario Luis Assine

Rio Claro - SP

2021

C417g

Cerri, Rodrigo Irineu

Gênese da tectonossequência Jaibaras (Ediacarano - Ordoviciano) e sua herança na sedimentação da sequência Serra Grande (Ordoviciano - Siluriano), borda nordeste da Bacia do Parnaíba / Rodrigo Irineu Cerri. -- Rio Claro, 2021

110 p. + 1 CD-ROM

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Lucas Verissimo Warren

Coorientador: Mario Luis Assine

1. Bacias Intracratônicas. 2. Rutilo Detrítico. 3. Zircão Detrítico. 4. Proveniência Sedimentar. 5. SW Gondwana. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

RODRIGO IRINEU CERRI

**Gênese da tectonossequência Jaibaras (Ediacarano - Ordoviciano)
e sua herança na sedimentação da sequência Serra Grande
(Ordoviciano - Siluriano), borda nordeste da Bacia do Parnaíba**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Claudio Riccomini

Prof. Dr. Fabrício de Andrade Caxito

Prof. Dr. Luciano Alessandretti

Prof. Dr. Renato Paes de Almeida

Conceito: Aprovado

Rio Claro/SP, 05 de março de 2021

“Presentemente eu posso me considerar um sujeito de sorte
Porque apesar de muito moço me sinto são e salvo e forte”

Sujeito de Sorte, Belchior

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer meu orientador e amigo Lucas Warren, que durante estes 3 anos me ensinou, influenciou, estimulou e me transformou em um pesquisador melhor. Ao Mario Assine, pelas conversas e influências muito produtivas. Também não agradeço imensamente minha família, que contribuí sempre para meu crescimento pessoal e profissional, dando imenso apoio e suporte em todos os momentos. Agradeço também à minha companheira e amiga Jessica Braga, que sempre esteve ao meu lado contribuindo para meu aprendizado, e por me suportar e ajudar em todos os aspectos da minha vida. Aos meus colegas de departamento - Flávio Rodrigues, Filipe Varejão, Mariza Rodrigues, Alex Choupina, Lucas Inglez, André Santiago - pela amizade e companheirismo do dia a dia. A forma final desta tese, bem como dos produtos gerados a partir dela, contou com a grande ajuda, comentários e sugestões dos Profs. Drs. Claudio Riccomini, Luciano Alessandretti, Fabrício Caxito, Mario Assine, André Marconato e Renato Paes de Almeida. À **Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo número 2017/19550-1**, pelo financiamento de bolsa de doutorado e reserva técnica durante a execução desta tese. Ao Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento “Relações entre Tectônica e Sedimentação em Bacias do Interior do Nordeste do Brasil” (Petrobas; 2014/00519-9) pelo apoio durante os trabalhos de campo. Ao Laboratório de Geoquímica Isotópica da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) pelas análises isotópicas U-Pb em zircão detrítico, e ao Laboratório de Microsonda Eletrônica da Universidade Estadual Paulista (UNESP Campus Rio Claro) pelas análises de elementos traço em rutilo detrítico. Ao Departamento de Geologia da Universidade Estadual Paulista (UNESP Campus Rio Claro) pelo acesso aos equipamentos de separação de minerais pesados e preparação de amostras, bem como ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Caracterizadas pela longa duração no tempo geológico, sinéclises, bacias intracratônicas ou do tipo *sag* destacam-se por uma complexa história de subsidência e erosão, sendo sua origem e evolução objeto de intensa discussão. Historicamente debatida nas ciências geológicas, prevalece a hipótese controversa de que estas bacias se desenvolvem a partir de sistemas rifte sucedidos por fases de subsidência térmica ou mesmo flexural. No entanto, a complexidade destas bacias e o pouco conhecimento de suas evoluções geocronológicas, arquiteturais e de proveniência não permitem falsear de maneira satisfatória esta hipótese. Considerando esta problemática, a presente pesquisa buscou analisar de maneira integrada e utilizando uma metodologia multi-indicadores (*multi-proxy*) a implantação e história deposicional inicial de bacias intracratônicas, tendo como foco específico a Bacia do Parnaíba no Estado do Ceará. Para tanto, lançou-se mão de análises geocronológicas, estratigráficas e de proveniência sedimentar ainda inéditas, buscando identificar as diferenças e/ou similaridades entre o sinal deposicional e áreas fonte das bacias do Jaibaras (rifte) e Parnaíba (intracratônica). Especificamente, foram conduzidas análises detalhadas de proveniência sedimentar a partir de geoquímica de rutilo detrítico, geocronologia U-Pb em zircão detrítico, proveniência sedimentar macroscópica e análise de paleocorrentes nos depósitos sedimentares da Formação Aprazível (Ediacarano - Cambriano, topo da Bacia do Jaibaras) e da Formação Ipu (Ordoviciano, base da Bacia do Parnaíba). Os dados de proveniência sedimentar demonstram que os conglomerados depositados na fase final da Bacia do Jaibaras são predominantemente compostos de clastos de rochas vulcânicas, sedimentares e metamórficas, angulares a sub-angulares, indicando áreas fonte diversificadas e proximais. Por outro lado, os conglomerados depositados na fase inicial da Bacia do Parnaíba apresentam alta maturidade sedimentar, com grande predominância de clastos de quartzo arredondados e pequena presença de clastos de outras composições, sugerindo áreas fonte distais. A análise de proveniência sedimentar a partir de geoquímica de rutilo detrítico reforça a área fonte distinta para as duas bacias estudadas,

principalmente devido a: (i) importante diminuição da contribuição de rutilo advindos de rochas de fácies granulito nos sedimentos iniciais da Bacia do Parnaíba, e (ii) diminuição da contribuição de rutilo proveniente de fontes máficas nos depósitos sedimentares da Bacia do Parnaíba. As idades de máxima deposição obtidas pela análise geocronológica por U-Pb LA-ICP-MS em zircão detrítico indicam Cambriano Médio/Superior para a Formação Aprazível (*ca.* 499 ± 5 Ma), e Cambriano Inferior para a Formação Ipu (*ca.* 528 ± 11 Ma). O fato da idade de máxima deposição da Formação Ipu ser mais antiga que a obtida para a Formação Aprazível reflete fontes distais distintas daquelas presentes nos limites e interior da Bacia do Jaibaras. A comparação dos dados geocronológicos da Formação Ipu com idades palinológicas disponíveis para a Formação Tianguá sobreposta, revelou que o início da sedimentação da primeira unidade da Bacia do Parnaíba possivelmente se deu no Cambriano Superior/Ordoviciano Inferior. Os dados geocronológicos ainda confirmam que as fontes primárias de sedimentos para os depósitos iniciais da Bacia do Parnaíba estariam localizadas nas regiões elevadas e montanhosas relacionadas às orogêneses do Ciclo Brasileiro, a sul/sudeste da Província Borborema (como os cinturões metamórficos e faixas Rio Preto e Riacho do Pontal). No atual estágio desta pesquisa, os dados obtidos enfatizam mudanças importantes nas áreas fonte entre as bacias rifte e *sag*, indicando que não há continuidade de polaridade e registro sedimentar entre as duas bacias. Deste modo, pode-se afirmar que as análises geocronológicas e de proveniência revelam que a Bacia do Parnaíba não teve evolução inicial continuada ou profundamente influenciada pelos sistemas de riftes da Bacia do Jaibaras.

Palavras-chave: Bacias intracratônicas; Rutilo detrítico; Zircão detrítico; Proveniência sedimentar; SW Gondwana; Bacia do Jaibaras; Bacia do Parnaíba.

Abstract

Syneclises or intracratonic basins are long-lived sedimentary basins characterized by complex subsidence and erosion histories, and their origin is currently one of the most prolific topics in the geologic sciences. Historically debated, the controversial premise that these geotectonic units evolve by thermal (or flexural) subsidence after a primeval rift basin is widespread, and to this day remains a controversial issue. However, the complexity of these basins and the reduced knowledge about their geochronological, architectural and provenance evolutions do not allow to satisfactorily falsify this hypothesis. Considering this problematic, we proceeded a novel and integrated multi-proxy study, aiming to identify differences (and/or similarities) in the sedimentary signal and source areas of the Jaibaras (rift) and Parnaíba (intracratonic) basins, Ceará State, Brazil. Thus, we performed a detailed analysis integrating geochemistry of trace elements in detrital rutile grains, U-Pb geochronology of detrital zircon, macroscopic provenance and paleocurrents from the sedimentary deposits of the Aprazível Formation (Ediacaran - Cambrian, top of Jaibaras rift Basin) and the Ipu Formation (Ordovician, basal unit of Parnaíba intracratonic Basin). Our provenance analysis results demonstrate that conglomerates of the rift sequence are predominantly composed of volcanic, sedimentary, and metamorphic angular to sub-angular clasts, pointing to a diverse, nearby source area. On the other hand, conglomerates deposits of the initial sag sequence have greater sedimentary maturity, with dominant rounded quartz vein clasts and other subordinated lithologies, indicating provenance from distant source areas. The geochemistry of trace elements performed in detrital reinforce that the source areas of these two units were distinct, revealing an important decrease in the input of granulite facies and metamafic grains in the Parnaíba Basin comparing with the Jaibaras Basin. The maximum depositional age for the Aprazível Formation (ca. 499 ± 5 Ma) indicates Cambrian age for the upper part of the Jaibaras Basin succession, and Early Cambrian age for the Ipu Formation (ca. 528 ± 11 Ma). The fact that the maximum deposition age of the Ipu formation is older than the Aprazível Formation

reflects distal sources different from those present in the limits and interior of the Jaibaras Basin. The U-Pb data together with palynological ages of Tianguá Formation suggest that the deposition of Ipu Formation started at the Late Cambrian/Early Ordovician. The provenance analysis based on detrital zircon data also indicate that the orogenic mountains areas related to the Brasiliano Orogeny at the south/southeastern of Borborema Province (e.g., Rio Preto and Riacho do Pontal metamorphic belts), were the most probable primary source areas for the initial deposition of the Parnaíba Basin. Finally, our data emphasizes the key change in source areas from the rift to the sag phase, indicating that there is no continuity between the sedimentation of both basins and strongly suggesting that the Parnaíba Basin probably did not evolved from a precursor rift basin.

Keywords: Intracratonic basin; Detrital rutile; Detrital zircon; Sedimentary provenance; SW Gondwana; Jaibaras Basin; Parnaíba Basin.

Apresentação e organização da tese

A presente Tese de Doutorado foi organizada com o objetivo de apresentar os principais resultados obtidos em forma de artigos científicos. Os artigos constituem o capítulo de resultados, e possuem lista de referências bibliográficas que seguem os padrões e formatos específicos de cada periódico para o qual foram submetidos. A numeração de figuras e tabelas dos artigos também segue uma ordem própria. O índice de figuras e tabelas inseridas no presente trabalho são referentes aos demais capítulos.

Os Capítulos 1, 2 e 3 apresentam de forma breve as principais problemáticas envolvidas no presente trabalho, bem como os principais objetivos e justificativas.

O Capítulo 4 apresenta de forma geral todos os materiais e métodos utilizados no presente trabalho. As descrições específicas de todos os parâmetros analíticos utilizados são também apresentadas em detalhe nos artigos científicos, apresentados no capítulo de resultados.

O Capítulo 5 apresenta de forma geral os principais mecanismos envolvidos na formação de bacias do tipo rifte e intracratônicas, bem como o estado da arte dos modelos geodinâmicos que consideram a evolução integrada entre riftes e bacias intracratônicas, abordando também importantes características evolutivas das bacias do Parnaíba e Jaibaras.

O Capítulo 6 apresenta de forma geral todas as características geológicas e estruturais importantes para a contextualização regional da área de estudo. Neste capítulo são descritas as unidades das bacias do Jaibaras e Parnaíba, juntamente com uma breve descrição do seu contexto deposicional e tectônico, considerando a implantação e preenchimento destas bacias.

O Capítulo 7 apresenta os principais resultados obtidos neste trabalho. Ele foi dividido em dois subcapítulos que correspondem aos dois artigos científicos elaborados. O Subcapítulo 7.1 apresenta os resultados obtidos pelas análises de proveniência macroscópica e por análise geoquímica sistemática de elementos traço em rutilo detrítico, bem como dados sobre a estratigrafia e sedimentologia das formações Aprazível e Ipu. Os resultados referentes a este capítulo encontram-se no artigo intitulado “*Unraveling the origin of the Parnaíba Basin: testing*

the rift to sag hypothesis using a multi-proxy provenance analysis”, publicado, no ano de 2020, no periódico *Journal of South American Earth Sciences*. O Subcapítulo 7.2 apresenta os resultados obtidos através das análises geocronológicas U-Pb em LA-ICP-MS em zircões detríticos. Neste capítulo, os resultados abarcam as idades máximas de deposição das unidades estudadas, bem como a identificação das áreas fontes destas unidades. Os resultados compõem o manuscrito intitulado “*So close and yet so far: U-Pb geochronological constraints of the Jaibaras rift Basin and the Parnaíba intracratonic Basin in the Southwestern Gondwana*”, publicado, no ano de 2021, no periódico *Geological Magazine*.

O Capítulo 8 apresenta uma discussão integrada e as considerações finais da Tese de Doutorado, com base em todos os resultados obtidos.

No CD-ROM anexado à tese, encontram-se os resultados analíticos obtidos pela análise sistemática de elementos traço em rutilo detrítico por Microsonda Eletrônica - EPMA (Apêndices 1 e 2), e os dados referentes as análises U-Pb pelo método LA-ICP-MS em zircão detrítico (Apêndices 3 e 4). Por fim são apresentados os resultados referentes às análises dos padrões utilizados em cada método.

Sumário

Resumo.....	iv
Abstract	vi
Apresentação e organização da tese	viii
Índice de Figuras	xii
Índice de Tabelas.....	xii
Índice de Apêndices	xiii
1. Introdução.....	1
2. Objetivos	4
3. Justificativas	5
4. Materiais e Métodos	6
4.1. <i>Análise de fácies sedimentares</i>	6
4.2. <i>Análise de paleocorrentes</i>	6
4.3. <i>Proveniência sedimentar por análise de rutilo detrítico</i>	7
4.4. <i>Proveniência sedimentar macroscópica (Contagem de clastos - Gravel Composition Analysis)</i>	11
4.5. <i>Geocronologia U-Pb de zircões detríticos pelo método LA-ICP-MS</i>	12
5. Fundamentação Teórica - Mecanismos envolvidos na gênese das Bacias do Jaibaras e Parnaíba.....	15
5.1. <i>Bacia rifte do Jaibaras</i>	15
5.2. <i>Origem de bacias intracratônicas e o exemplo da Bacia do Parnaíba</i>	16
6. Contexto geológico regional	22
6.1. <i>Bacia do Jaibaras</i>	24
6.1.1. <i>Formação Massapê</i>	31
6.1.2. <i>Formação Pacujá</i>	32
6.1.3. <i>Formação Aprazível</i>	33
6.2. <i>Bacia do Parnaíba</i>	35
6.2.1. <i>Formação Ipu</i>	38
6.2.2. <i>Formação Tianguá</i>	40
6.2.3. <i>Formação Jaicós</i>	40
7. Resultados	42

<i>7.1. Desvendando a origem da Bacia do Parnaíba: testando a hipótese rift-to-sag por meio de análises de proveniência multi-proxy</i>	42
<i>7.2. Geocronologia U-Pb da Bacia rifte do Jaibaras e da Bacia intracratônica do Parnaíba no Gondwana Ocidental</i>	67
8. Considerações finais e conclusões	89
Referências bibliográficas	95
Apêndice 1: Resultados analíticos dos elementos traço em rutilo detrítico: Formação Aprazível	107
Apêndice 2: Resultados analíticos dos elementos traço em rutilo detrítico: Formação Ipu ..	108
Apêndice 3: Resultados analíticos da geocronologia U-Pb em zircões detrítico: Formação Aprazível	109
Apêndice 4: Resultados analíticos da geocronologia U-Pb em zircões detrítico: Formação Ipu	110

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa geológico da área de estudo com destaque para a borda leste da Bacia do Parnaíba e para a Bacia do Jaibaras.	23
Figura 2: Mapa geológico simplificado da porção norte da Província Borborema mostrando os domínios Ceará Central e Médio Coreau e Zonas de Cisalhamento Brasilianas.	25
Figura 3: Proposta de evolução tectono-sedimentar da Bacia do Jaibaras e eventos vulcânicos associados segundo Quadros (1996) e Barroso (2010).	27
Figura 4: Modelo geodinâmico para o final do Neoproterozoico e início do Cambriano (pós-Brasiliano) para a evolução da Bacia do Jaibaras.	28
Figura 5: Coluna estratigráfica esquemática, com bases nos resultados da presente tese de doutorado, das bacias do Jaibaras e Parnaíba na área de estudo, destacando (em vermelho) as formações Aprazível (topo da Bacia do Jaibaras) e Ipu (base da Bacia do Parnaíba)..	30
Figura 6: Carta estratigráfica simplificada da Bacia do Jaibaras e sequências sedimentares inferiores da Bacia do Parnaíba representadas pelo Grupo Serra Grande.....	37
Figura 7: Mapa de isópacas do Grupo Serra Grande no Ordoviciano e Siluriano, mostrando as principais falhas que compõe o Lineamento Transbrasiliano.	38
Figura 8: Evolução esquemática das bacias Jaibaras e Parnaíba, considerando o intervalo compreendido entre o término da deposição da Formação Aprazível e a deposição das camadas de topo da Formação Ipu.	94

Índice de Tabelas

Tabela 1: Relação das atividades referentes a preparação de amostras, obtenção do concentrado e análise de rutilo para fins de proveniência sedimentar.....	10
Tabela 2: Tabela cronoestratigráfica da Bacia do Parnaíba. Esta interpretação admite a Bacia do Jaibaras (sequência rifte, em cinza claro) como sequência inferior na evolução da bacia intracratônica.	36

Índice de Apêndices

Apêndice 1: Tabela de dados analíticos brutos e resultados de elementos traço em rutilo detrítico obtidos por meio de EPMA das amostras da Formação Aprazível, Bacia do Jaibaras..	107
Apêndice 2: Tabela de dados analíticos e resultados de elementos traço em rutilo detrítico obtidos por meio de EPMA das amostras da Formação Ipu, Bacia do Parnaíba.	108
Apêndice 3: Dados analíticos brutos e resultados das análises geocronológicas U-Pb LA-ICP-MS em zircões detríticos das amostras da Formação Aprazível, Bacia do Jaibaras.	109
Apêndice 4: Dados analíticos brutos e resultados das análises geocronológicas U-Pb LA-ICP-MS em zircões detríticos das amostras da Formação Ipu, Bacia do Parnaíba.	110

1. Introdução

A origem de sinéclises, bacias intracratônicas ou do tipo *sag* é usualmente interpretada como diretamente relacionada com esforços tectônicos atuantes nos estágios finais da evolução de bacias do tipo rifte (Leighton e Kolata, 1990; Oliveira e Mohriak, 2003). A particular associação entre bacias intracratônicas e bacias do tipo rifte é observada em diversos exemplos ao redor do mundo, nos quais sucessões sedimentares depositadas em bacias tipo rifte são sobrepostas diretamente por unidades sedimentares paleozoicas, à exemplo das bacias de Michigan, Illinois, Amazonas, Paraná e Parnaíba (e.g., Oliveira e Mohriak, 2003; Milani *et al.*, 2007; Daly *et al.*, 2018). Por outro lado, diferente dos modelos bem estabelecidos para gênese de bacias do tipo rifte e *foreland*, a origem destas grandes bacias intracratônicas ainda permanece controversa e atualmente é objeto de intenso estudo e debate (Daly *et al.*, 2018).

Durante os eventos distensivos pós-orogênicos ocorridos na porção ocidental do Supercontinente Gondwana, procedeu-se a formação de inúmeras bacias de rifte acompanhadas por intensos eventos magmáticos. Neste contexto, a separação entre Laurentia e Báltica da margem proto-Andina ocasionou a formação do Oceano Iapetus (Bond *et al.*, 1984; Dalziel, 1997) resultando em, ao menos, dois pulsos de subsidência mecânica responsáveis pela formação da Bacia do Jaibaras no nordeste do atual território brasileiro (Oliveira *et al.*, 2001). Após este evento inicial, sucedeu-se uma importante mudança no campo de esforços, ocasionando a estabilização da litosfera e o início da subsidência térmica que resultou na instalação da Bacia do Parnaíba durante o Cambriano tardio e início do Ordoviciano (Brito Neves *et al.*, 1984). Segundo Oliveira e Mohriak (2003) e Castro *et al.* (2016), a reativação das falhas associadas às duas fases rifte formadoras da Bacia do Jaibaras controlaram a deposição da fase *sag* inicial da Bacia do Parnaíba.

A Bacia, ou Gráben do Jaibaras, faz parte de um complexo sistema de riftes continentais de idade ediacarana - cambriana que, atualmente, se encontra parcialmente sob a Bacia do

Parnaíba. Este sistema é constituído por diversas pequenas bacias alongadas de direção NE-SW aflorantes no Estado do Ceará, destacando as bacias do Jaibaras, Cococi, Rio Jucá, Sairi, Jaguarapi, Catolé, São Julião e Iara (Chamani, 2011, 2015; Castro *et al.*, 2014, 2016). Prospecções geofísicas indicam que este sistema de riftes se prolonga para além dos limites aflorantes e ocorrem sob os sedimentos basais da Bacia do Parnaíba (e.g., Pedrosa Junior *et al.*, 2015, 2017). Estes pequenos riftes possivelmente se desenvolveram a partir de esforços distensivos atuantes em zonas de cisalhamentos pós-colisionais (Brito Neves *et al.*, 1984), relacionadas diretamente a evolução de sistemas de falhas associados ao Lineamento Transbrasiliano (Oliveira e Mohriak, 2003; Chamani, 2015). No entanto, é importante ressaltar que apesar de diversas hipóteses recentemente aventadas para a origem da Bacia do Parnaíba (e.g., Castro *et al.*, 2014, 2016; Tozer *et al.*, 2017; Coelho *et al.*, 2018; Daly *et al.*, 2018; McKenzie e Tribaldos, 2018; Menzies *et al.*, 2018; Watts *et al.*, 2018), não existe um consenso formal sobre quais mecanismos foram responsáveis pela implantação desta unidade geotectônica.

A Bacia do Jaibaras, com aproximadamente 120 km de extensão e 15 km de largura, apresenta forma alongada na direção NE-SW seguindo o *trend* de direção N40E do Lineamento Transbrasiliano (que localmente recebe o nome de Falha Sobral - Pedro II). É basicamente constituída por depósitos siliciclásticos continentais imaturos do Grupo Jaibaras (formações Massapê, Pacujá e Aprazível) depositados exclusivamente em ambientes continentais de leques e planícies aluviais, com ocorrência de fandeltas nas fases lacustres (Teixeira *et al.* 2004). Ocorrem também rochas vulcânicas de composição andesítica, basaltos andesíticos, riolitos e rochas vulcanoclásticas pertencentes à Formação Parapuí, que seccionam toda a sucessão do Grupo Jaibaras.

Considerando as idades disponíveis e ausência de estudos sedimentológicos e estratigráficos de detalhe, permanece a dúvida quanto a real influência da evolução da Bacia do Jaibaras na instalação da Bacia do Parnaíba. Deste modo, este trabalho buscou conduzir uma

análise integrada utilizando técnicas e procedimentos sedimentológicos, estratigráficos, geoquímicos e geocronológicos, visando a caracterização da evolução tectono-estratigráfica da unidade de topo da Bacia do Jaibaras (Formação Aprazível) e da unidade sedimentar associada à deposição inicial da Bacia do Parnaíba (Formação Ipu, unidade inferior do Grupo Serra Grande). Esta análise integrada (*multi-proxy*) utilizando diferentes métodos e abordagens buscou elucidar importantes questões ainda pendentes envolvendo a evolução de sistemas de rifte pós-ruptura de Gondwana, e a implantação de bacias cratônicas interiores subsequentes.

Buscando elucidar estas importantes questões, os dados obtidos foram analisados e interpretados procurando identificar similaridades e diferenças entre a sucessão sedimentar final da fase rifte (Formação Aprazível) e os depósitos sedimentares iniciais da fase *sag* (Formação Ipu). A aquisição de seções colunares de detalhe, aliada a análise de paleocorrentes e estudos de proveniência sedimentar macroscópica e a partir de elementos traço em rutilo detrítico, resultaram na identificação de mudanças e padrões de dispersão sedimentar e área fontes entre tais unidades. A geocronologia U-Pb por LA-ICP-MS em zircões detríticos foi fundamental para definir, pela primeira vez, as idades de máxima deposição das formações Aprazível e Ipu. Estes dados também auxiliaram sobremaneira na definição de um quadro deposicional compatível das unidades, refinamento das áreas fontes obtidas pelas análises de proveniência em rutilo detrítico e composição de um quadro paleogeográfico adequado para a passagem *rift-to-sag* na porção SW do supercontinente Gondwana.

8. Considerações finais e conclusões

Os dados de proveniência sedimentar obtidos a partir de diferentes técnicas analíticas (contagem de clastos, geoquímica em rutilo e análises geocronológicas em zircão) demonstram que entre a fase rifte da Bacia do Jaibaras e a primeira fase de subsidência correspondente à deposição inicial da Bacia do Parnaíba, houveram grandes mudanças de áreas fonte e distância de transporte sedimentar. Ademais, os dados sugerem que ambas sucessões são separadas por um intervalo de não deposição e/ou erosão entre 15 a 29 Ma.

Do ponto de vista da proveniência macroscópica, observa-se que os conglomerados representativos do último evento de sedimentação da Bacia do Jaibaras (Formação Aprazível), são compostos por um arcabouço polimítico (com rochas do embasamento Pré-Cambriano, granitos de idade Cambriana, e rochas vulcânicas e sedimentares da própria bacia), em sua maioria angulosos e de tamanhos que podem ultrapassar 30 - 40 cm. Estes depósitos são predominantemente interpretados como depositados por fluxos coesivos e incoesivos em sistemas de leques aluviais condicionados por escarpas de falhas. Depósitos subordinados de arenitos estratificados correspondem a deposição em sistema fluvial axial ou em canais distributivos efêmeros associados ao próprio sistema de leques.

Já na unidade que corresponde à primeira fase de sedimentação da Bacia do Parnaíba, representada pela Formação Ipu, os conglomerados apresentam uma predominância de clastos arredondados a sub-arredondados de composição quartzosa, com tamanhos significativamente menores, e com pouca participação de clastos do embasamento. Os depósitos da Formação Ipu são predominantemente compostos por fácies possivelmente depositadas em sistema fluvial entrelaçado de grande porte, ocorrendo predominância de depósitos deltaicos no topo da unidade. Essas características apontam uma importante mudança de área fonte, distância de transporte e padrão de dispersão sedimentar entre as duas bacias.

Os dados de proveniência sedimentar a partir de geoquímica de elementos traço em rutilo detrítico também reforçam essa mudança de áreas fontes entre as bacias de rifte e

intracratônica. A Formação Aprazível apresenta maior concentração de rutilos oriundos de fontes máficas (28%) em comparação com a Formação Ipu, que apresenta apenas 6%. Observando os rutilos advindos de fontes félsicas, as formações Aprazível e Ipu apresentam, respectivamente, 72% e 94%. Neste sentido, a contribuição de fontes félsicas passa a ser preponderante nos depósitos da fase *sag*, reforçando a mudança significativa de áreas fontes entre as duas bacias. Os dados do geotermômetro *Zr-in-rutile* também indicam esta mudança de áreas fonte. A Formação Aprazível apresenta aproximadamente a mesma proporção de grãos de rutilo formados em fácies anfibolito/eclogito (58%) e granulito (42%), ao passo que a Formação Ipu apresenta um padrão bastante variável quanto a origem metamórfica do rutilo ao longo de sua sucessão. Na base desta unidade a concentração de grãos de rutilo formados em fácies anfibolito/eclogito e granulito são, respectivamente, 80% e 20%, enquanto para a porção intermediária estas concentrações são de 90,5% e 9,5%, respectivamente. Na porção superior da Formação Ipu, caracterizada por arenitos médios a finos dispostos em camadas amalgamadas possivelmente depositadas em contexto deltaico (Assis *et al.*, 2019), a concentração de rutilos gerados em condições metamórficas distintas se inverte. Assim, no topo desta unidade, a concentração de grãos de rutilo formados em rochas das fácies anfibolito/eclogito e granulito são de, respectivamente, 39% e 61%. É digno de nota que a mudança da participação de fontes granulíticas diminui da Formação Aprazível para a base da Formação Ipu, e aumenta drasticamente no topo desta última.

Os dados geocronológicos obtidos a partir das análises U-Pb em zircão detrítico permitiram identificar com precisão as áreas fonte das formações Aprazível e Ipu, bem como aproximar suas respectivas idades de máxima deposição e mudanças no padrão de proveniência. As idades dos grãos de zircão demonstram que fontes neoproterozoicas, em especial ediacaranas, e cambrianas, foram importantes fornecedoras de sedimentos para os depósitos da Formação Aprazível, enquanto fontes paleoproterozoicas foram pouco significativas. Já para a Formação Ipu, a contribuição mais expressiva é representada por fontes neoproterozoicas, com

destaque a fontes ediacaranas, juntamente com o aumento considerável na participação de fontes paleoproterozoicas e desaparecimento de grãos de zircão de idade cambriana. É digno de menção o retorno na presença, mesmo que em pequena concentração, de fontes cambrianas apenas no topo da Formação Ipu. O desaparecimento no registro sedimentar de grãos de zircão de idade cambriana, juntamente com o aumento significativo de grãos de zircão de idade paleoproterozoica, também corrobora a mudança significativa de áreas fonte entre a bacia rifte e a bacia *sag*.

Os dados geocronológicos obtidos para a Formação Ipu mostram predominância de grãos de zircão de idades que correspondem aos eventos orogênicos ligados ao Ciclo Brasileiro, e ajudaram a compor um quadro paleogeográfico factível para a deposição do primeiro ciclo sedimentar da Bacia do Parnaíba. Neste cenário, os sistemas fluviais da Formação Ipu (com paleocorrentes indicando paleofluxo para NW) teriam como área fonte (cabeceira) rochas constituintes das então áreas elevadas associadas ao recém findado Ciclo Brasileiro, localizadas a sudeste/sul da Província Borborema. Estas correspondem principalmente aos sistemas colisionais do Cinturão Rio Preto e Riacho do Pontal, que perfazem o limite norte do craton do São Francisco e sul da Província Borborema. Estes sistemas fluviais associados à deposição da Formação Ipu evoluíram para um sistema deltaico dominado por rios, que progradavam em direção ao ambiente marinho plataformar presente na borda oeste e noroeste do Gondwana (existentes a partir da consolidação deste supercontinente acerca de *ca.* 510 Ma).

Este quadro paleogeográfico se baseia na hipótese de que bacias intracratônicas (ou do tipo *sag*) usualmente se iniciam na forma de uma grande e extensa região inclinada do continente para o oceano (“*tilted ramp*” na acepção de Sloss, 1963, 1988; Allen e Armitage, 2012). Exemplos considerados aqui como análogos ao do Grupo Serra Grande da Bacia do Parnaíba são aqueles das sucessões da Sequência Sauk, Proterozoico a Ordoviciano Inferior das bacias intracratônicas norte americanas (Sloss, 1963, 1988), bem como das sucessões basais das bacias do tipo *sag* do norte africano (Allen e Armitage, 2012). Nestes casos, os sedimentos

associados ao primeiro ciclo de subsidência da bacia foram depositados em uma grande porção inclinada do continente em direção ao oceano (*tilted ramp*). Os padrões integrados de paleocorrentes entre as formações Ipu, Tacaratu e Cariri, consideradas unidades coevas e que apresentam grandes similaridades sedimentares e estratigráficas, indicam consistência do transporte e polaridade sedimentar em direção às áreas rebaixadas marginais do supercontinente Gondwana correspondentes hoje à atual área da Bacia do Parnaíba.

Finalmente, podemos destacar as seguintes considerações acerca da evolução *rift-to-sag* das bacias do Jaibaras e Parnaíba (Figura 8):

- i. De acordo com os dados de idade de máxima deposição (*ca.* 499 ± 5 Ma), a deposição da Formação Aprazível ocorreu partir do Ediacarano final, se estendendo até o Cambriano médio a superior (Figura 8, *Stage 1*);
- ii. Apesar da idade de máxima deposição da Formação Ipu (*ca.* 528 ± 11 Ma) ser mais antiga que a obtida para a Formação Aprazível, as correlações de idade entre a Formação Tianguá (Siluriano Inferior), e a camada de diamictitos/tilitos (Ordoviciano Superior; Hirnantiano) nas porções superiores da Formação Ipu, permite concluir que esta formação pode ter sido depositada entre o Cambriano médio a superior (ou mais conservadoramente entre o Ordoviciano Inferior) e o Ordoviciano Superior. A presença de idades de deposição Eocambrianas reforça a influência de fontes desta idade na sedimentação da unidade;
- iii. Entre o final da deposição da Formação Aprazível, no Cambriano médio a superior, e o início da deposição da Formação Ipu, possíveis eventos de soerguimento foram responsáveis pela criação da discordância erosiva ou superfície de não deposição regional entre as bacias do Jaibaras e Parnaíba (Figura 8, *Stage 2*). Este soerguimento foi responsável não só pela formação da discordância regional entre as duas bacias, mas também pela mudança no estilo de deposição e distância de transporte sedimentar, bem como na mudança das áreas fonte. Tentativamente, e com base nos dados de idades disponíveis para as duas formações, estima-se que o intervalo entre o termino da deposição

- da fase rifte e o início da deposição da fase sinéclise, compreenda um intervalo de erosão ou não deposição entre 15 e 29 Ma;
- iv. Após os eventos de soerguimento responsáveis pela discordância entre estas bacias, os sistemas fluviais da Formação Ipu alimentados pelas áreas orogênicas elevadas do Ciclo Brasileiro localizadas a sul/sudeste da Província Borborema, passam a ser importantes fontes de sedimentos (Figura 8, *Stage 3*). Grandes rios fluem para oeste/noroeste (como indicado pelas paleocorrentes das formações Ipu, Tacaratu e Cariri) em uma extensa região da plataforma continental inclinada homoclinalmente em direção ao oceano na borda oeste/noroeste do Gondwana. Estes sistemas fluviais, segundo Assis *et al.* (2019), apresentam um aumento de espessura quando atravessam os sistemas de riftes cambrianos, como a Bacia do Jaibaras. Tal característica pode ser claramente observada no mapa geológico da área de estudo (Figura 1), no qual a Formação Ipu apresenta grande extensão e espessura, recobrando a Bacia do Jaibaras na sua porção sul, onde é influenciada pela Falha Sobral - Pedro II;
 - v. Deste modo, até o Ordoviciano Superior, os sistemas fluviais advindos das áreas orogênicas brasileiras gradam, da base para o topo, de conglomerados e arenitos grossos conglomeráticos até arenitos médios a finos dispostos em barras amalgamadas, correspondendo à porção de frente deltaica desenvolvida em deltas dominados por rios (Figura 8, *Stage 4*);
 - vi. Os depósitos dos sistemas fluviais da Formação Ipu são influenciados pela glaciação Hirnantiana do Ordoviciano Superior, com a deposição de diamictitos (tilitos). Com o fim dos sistemas glaciais, já no Siluriano, ocorre uma transgressão marinha que é responsável pela abertura de espaço de acomodamento e deposição da Formação Tianguá encerrando o primeiro grande ciclo transgressivo da Bacia do Parnaíba. No topo do Grupo Serra Grande, a Formação Jaicós representa o registro final deste ciclo regressivo transgressivo, caracterizado por depósitos de arenitos costeiros.

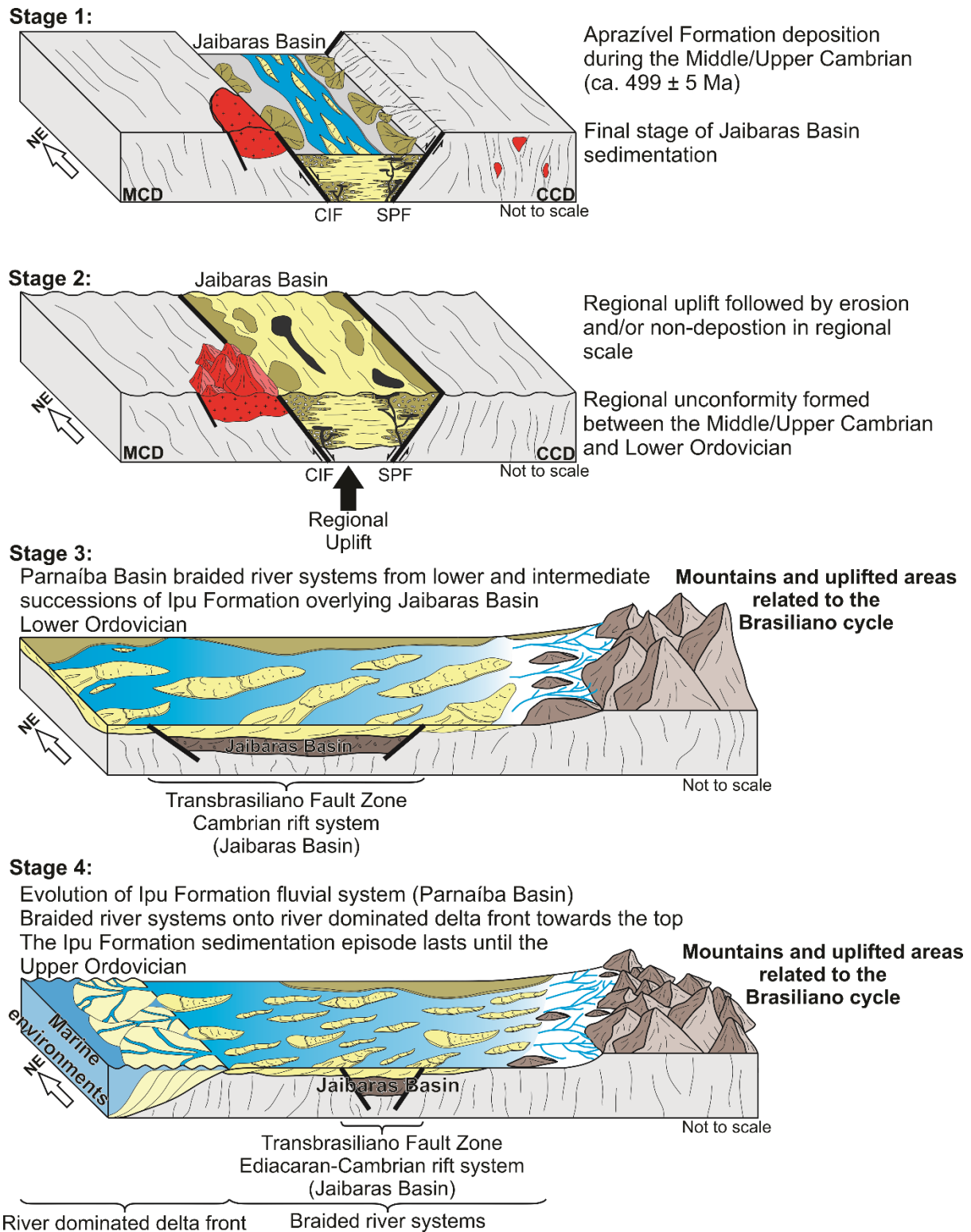


Figura 8: Evolução esquemática das bacias Jaibaras e Parnaíba, considerando o intervalo compreendido entre o término da deposição da Formação Aprazível e a deposição das camadas de topo da Formação Ipu. As figuras esquemáticas não estão em escala.

Referências bibliográficas

- Abreu, F. D. A. M. D., Nascimento, R. D. S., Santos, M. V. D., Veloso, C. A., Vilas, R. N. N. (2014). Carta Geológica: folha Ipu - SB. 24-VA-III. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17767/1/ipu.pdf>
- Allen, P. A., Heller, P. L. (2011). Dispersal and preservation of tectonically generated alluvial gravels in sedimentary basins. *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*, 111-130.
- Allen, P. A., Armitage, J. J. (2012). Cratonic basins. *Tectonics of sedimentary basins: Recent advances*, 602-620.
- Allen, P. A., Allen, J. R. (2013). *Basin analysis: Principles and application to petroleum play assessment*. John Wiley & Sons.
- Almeida, F. D. (1969). Diferenciação tectônica da plataforma brasileira. In *Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 23, No. 1969, pp. 29-46).
- Antunes, A. F., Jardim de Sá, E. F., Nascimento da Silva, C. C., Lira Lins, F. A. P. (2016). Interpretação Sismoestrutural da Porção Central da Bacia do Parnaíba (NE do Brasil). *XLVIII Congresso Brasileiro de Geologia*. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia - SBG.
- Araújo, C. E. G., Cordani, U. G., Basei, M. A., Castro, N. A., Sato, K., Sproesser, W. M. (2012). U-Pb detrital zircon provenance of metasedimentary rocks from the Ceará Central and Médio Coreaú Domains, Borborema Province, NE-Brazil: tectonic implications for a long-lived Neoproterozoic active continental margin. *Precambrian Research*, 206, 36-51.
- Archanjo, C. J., Launeau, P., Hollanda, M. H. B., Macedo, J. W. P., Liu, D. (2009). Scattering of magnetic fabrics in the Cambrian alkaline granite of Meruoca (Ceará state, northeastern Brazil). *International Journal of Earth Sciences*, 98(8), 1793-1807.
- Armitage, J. J., Allen, P. A. (2010). Cratonic basins and the long-term subsidence history of continental interiors. *Journal of the Geological Society*, 167(1), 61-70.
- Artyushkov, E. V., Tesakov, Y. I., Chekhovich, P. A. (2008). Ordovician sea-level change and rapid change in crustal subsidence rates in East Siberia and Baltoscandia. *Russian Geology and Geophysics*, 49(9), 633-647.
- Assine, M. L. (1996). Aspectos da estratigrafia das seqüências pré-carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil (Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo).

- Assis, A. P., Porto, A. L., Schmitt, R. S., Linol, B., Medeiros, S. R., Martins, F. C., Silva, D. S. (2019). The Ordovician-Silurian tectono-stratigraphic evolution and paleogeography of eastern Parnaíba basin, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 102241.
- Assumpção, M., Bianchi, M., Julià, J., Dias, F. L., França, G. S., Nascimento, R., Drouet, S., Pavão, C. G., Albuquerque, D. F., Lopes, A. E. (2013). Crustal thickness map of Brazil: Data compilation and main features. *Journal of South American Earth Sciences*, 43, 74-85.
- Baird, D. J., Knapp, J. H., Steer, D. N., Brown, L. D., Nelson, K. D. (1995). Upper-mantle reflectivity beneath the Williston basin, phase-change Moho, and the origin of intracratonic basins. *Geology*, 23(5), 431-434.
- Barroso, F. R. G. (2010). Fauna de Ediacara na Bacia do Jaibaras, Noroeste do Ceará: A primeira ocorrência no nordeste brasileiro (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco).
- Barroso, F. R., Viana, M. S. S., Lima Filho, M. F., Agostinho, S. M. (2014). First Ediacaran fauna occurrence in northeastern Brazil (Jaibaras Basin, ? Ediacaran-Cambrian): preliminary results and regional correlation. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86(3), 1029-1042.
- Beaumont, C., Quinlan, G.M., Hamilton, J. (1987). The Alleghanian orogeny and its relationship to evolution of the Eastern Interior, North America, in Beaumont, C., and Tankard, A.J., eds., *Sedimentary basins and basin-forming mechanisms*. Memoir, 12. Canadian Society Petroleum Geologists, 425-445.
- Bond, G. C., Nickeson, P. A., Kominz, M. A. (1984). Breakup of a supercontinent between 625 Ma and 555 Ma: new evidence and implications for continental histories. *Earth and Planetary Science Letters*, 70(2), 325-345.
- Brito Neves, B. B., Long, L. L., Kawashita, K., Sial, A. N., Cordani, U. G., Pessoa, R. J. R. (1978). Estudo da geocronologia da faixa costeira pre-cambriana do Nordeste. Unpublished. CNPq, Recife, p. 14.
- Brito Neves, B., Fuck, R. A., Cordani, U. G., Thomaz, A. (1984). Influence of basement structures on the evolution of the major sedimentary basins of Brazil: a case of tectonic heritage. *Journal of Geodynamics*, 1(3-5), 495-510.
- 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.
- Burgess, P. M., Gurnis, M., Moresi, L. (1997). Formation of sequences in the cratonic interior of North America by interaction between mantle, eustatic, and stratigraphic processes. *Geological Society of America Bulletin*, 109(12), 1515-1535.

- Cacama, M. S. J. B., Jardim de Sá, E. F., Alves da Silva, F. C., Lira Lins, F. A. P. (2015). Assinatura estrutural e geofísica da Porção Norte (fronteira Ceará-Piauí) do Lineamento Transbrasiliano: reativação na Bacia do Parnaíba. *Geologia USP. Série Científica*, 15(3-4), 67-81.
- Caputo, M. V., Lima, E. C. (1984). Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande – Bacia do Parnaíba. In *Congresso Brasileiro de Geologia* (Vol. 33, pp. 740-753).
- Castro, D. L., Fuck, R. A., Phillips, J. D., Vidotti, R. M., Bezerra, F. H., Dantas, E. L. (2014). Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. *Tectonophysics*, 614, 128-145.
- Castro, D. L. D., Bezerra, F. H. R., Fuck, R. A., Vidotti, R. M. (2016). Geophysical evidence of pre-sag rifting and post-rifting fault reactivation in the Parnaíba basin, Brazil. *Solid Earth*, v. 7, p. 529-548.
- Chamani, M. A. C. (2011). Tectônica intraplaca e deformação sinsedimentar induzida por abalos sísmicos: o Lineamento Transbrasiliano e estruturas relacionadas na Província Parnaíba, Brasil (Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo).
- Chamani, M. A. C. (2015). Tectônica sinsedimentar no Siluro-Devoniano da Bacia do Parnaíba, Brasil: o papel de grandes estruturas do embasamento na origem e evolução de bacias intracratônicas (Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo).
- Coelho, D. L., Julià, J., Rodríguez-Tribaldos, V., White, N. (2018). Deep crustal architecture of the Parnaíba basin of NE Brazil from receiver function analysis: implications for basin subsidence. *Geological Society, London, Special Publications*, 472(1), 83-100.
- Costa, M. J., França, J. D., Lins, C. A. C., Bacchiegga, I. F., Habekost, C. R., Cruz, W. D. (1973). *Geologia da Bacia Jaibaras; Ceará, Piauí e Maranhão. Projeto Jaibaras. DNPM/CPRM. Recife. Relatório final* (5 vol.).
- Costa, M. J., França, J. B., Lins, C. A. C., Bacchiegga, I. F., Habekost, C. R., Cruz, W. B. (1979). *Geologia da Bacia de Jaibaras, Ceará, Piauí e Maranhão: Projeto Jaibaras. In: Série Geologia 14, Seção Geologia Básica, vol. 11. MME/DNPM, Brasília, Brasil, p. 106.*
- Coutts, D. S., Matthews, W. A., Hubbard, S. M. (2019). Assessment of widely used methods to derive depositional ages from detrital zircon populations. *Geoscience Frontiers*.
- Crosby, A. G., Fishwick, S., White, N. (2010). Structure and evolution of the intracratonic Congo Basin. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(6).
- Daly, M. C., Andrade, V., Barousse, C. A., Costa, R., McDowell, K., Piggott, N., Poole, A. J. (2014). Brasiliano crustal structure and the tectonic setting of the Parnaíba basin of NE Brazil: Results of a deep seismic reflection profile. *Tectonics*, 33(11), 2102-2120.

- Daly, M. C., Fuck, R. A., Julià, J., Macdonald, D. I., Watts, A. B. (2018). Cratonic basin formation: a case study of the Parnaíba Basin of Brazil. Geological Society, London, Special Publications, 472(1), 1-15.
- Dalziel, I. W. (1997). OVERVIEW: Neoproterozoic-Paleozoic geography and tectonics: Review, hypothesis, environmental speculation. Geological Society of America Bulletin, 109(1), 16-42.
- Delgado, I. D. M., Souza, J. D., Silva, L. D., Silveira Filho, N. D., Santos, R. A. D., Pedreira, A. J., ... Lacerda Filho, J. D. (2003). Geotectônica do escudo atlântico. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil, 5, 227-334.
- Dewey, J. F. (1982). Plate tectonics and the evolution of the British Isles: Thirty-fifth William Smith Lecture. Journal of the Geological Society, 139(4), 371-412.
- Farrington, R. J., Stegman, D. R., Moresi, L. N., Sandiford, M., May, D. A. (2010). Interactions of 3D mantle flow and continental lithosphere near passive margins. Tectonophysics, 483(1-2), 20-28.
- Ferguson, R., Hoey, T., Wathen, S., Werritty, A. (1996). Field evidence for rapid downstream fining of river gravels through selective transport. Geology, 24(2), 179-182.
- Ferry, J. M., Watson, E. B. (2007). New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. Contributions to Mineralogy and Petrology, 154(4), 429-437.
- Fetter, A. H., Van Schmus, W. R., dos Santos, T. J. S., Neto, J. A. N., Arthaud, M. H. (2017). U-Pb and Sm-Nd Geochronological Constraints on the Crustal Evolution And Basement Architecture of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications For The Existence of the Paleoproterozoic Supercontinent Atlantica. Revista Brasileira de Geociências, 30(1), 102-106.
- Folk, R. L. (1980). Petrology of sedimentary rocks. Hemphill Publishing Company.
- Gac, S., Huismans, R. S., Simon, N. S., Podladchikov, Y. Y., Faleide, J. I. (2013). Formation of intracratonic basins by lithospheric shortening and phase changes: a case study from the ultra-deep East Barents Sea basin. Terra Nova, 25(6), 459-464.
- Garcia, M. G. M., Parente, C. V., Silva Filho, W. F., Almeida, A. R. (2010). Idade do vulcanismo ácido da Formação Parapuí: implicações na estratigrafia da Bacia Eopaleozóica Jaibaras-CE. In XLV Congresso Brasileiro de Geologia, Belém-PA.
- Garcia, L. C. R. (2016). Estilos estruturais relacionados à tectônica formadora e deformadora da bacia de Jaibaras, Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

- Garcia, M.G.M., Parente, C.V., Silva Filho, W.F., Almeida A.R. (2018) Age of magmatic events in the Eopaleozoic Jaibaras Basin, NE Brazil: Constraints from U-Pb zircon geochronology. *Journal of South American Earth Sciences* 84, 113–26.
- Gawthorpe, R. L., Leeder, M. R. (2008). Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins. *Basin Research*, 12(3-4), 195-218.
- Góes, A. M. O., Feijó, F. J. (1994). Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, 8(1), 57-67.
- Grahn, Y., Melo, J. D., Steemans, P. (2005). Integrated chitinozoan and miospore zonation of the Serra Grande Group (Silurian-Lower Devonian), Parnaíba Basin, northeast Brazil. *Revista Española de Micropaleontologia*, 37(2), 183-204.
- Gorayeb, P. S. S., Abreu, F. A. M., Correa, J. A. M., Moura, C. A. V. (1988). Relações estratigráficas entre o Granito Meruoca e a sequência Ubajara-Jaibaras. In SBG, Congresso Brasileiro de Geologia (Vol. 35, pp. 2678-2688).
- Gorayeb, P. S. S., Abreu, F. A. M., Hasui, Y. (1993). A tectônica distensiva e a geração de granitos eopaleozóicos no oeste do Ceará. *Atas XV Simp. Geol. Nordeste*, 255-257.
- Gorayeb, P. S. D. S., Abreu, F. D. A. M. D., Santos, M. V. D., Silva Junior, O. G. D. (2014). Carta Geológica: folha Sobral - SA.24-YD-IV. Serviço Geológico do Brasil (CPRM).
- Hartley, R. W., Allen, P. A. (2007). Interior cratonic basins of Africa: Relation to continental break-up and role of mantle convection. *Basin Research*, 6(2-3), 95-113.
- Haughton, P. D. W., Todd, S. P., Morton, A. C. (1991). Sedimentary provenance studies. *Geological Society, London, Special Publications*, 57(1), 1-11.
- Haxby, W. F., Turcotte, D. L., Bird, J. M. (1976). Thermal and mechanical evolution of the Michigan Basin. In *Developments in Geotectonics* (Vol. 12, pp. 57-75). Elsevier
- Howard, J. L. (1993). The statistics of counting clasts in rudites: a review, with examples from the upper Palaeogene of southern California, USA. *Sedimentology*, 40(2), 157-174.
- Inglez, L., Warren, L. V., Okubo, J., Simões, M. G., Quaglio, F., Arrouy, M. J., Netto, R. G. (2019). Discs and discord: The paleontological record of Ediacaran discoidal structures in the south American continent. *Journal of South American Earth Sciences*, 89, 319-336.
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L., Belousova, E. A. (2004). The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211:47-69.
- Janikian, L, Almeida, R. P., Galeazzi, C. P., Tamura, L. N., Ardito, J. C., Chamani, M. A. C. (2019). Variability of fluvial architecture in a poorly vegetated Earth: Silurian sheet-

- braided and meandering ancestor river deposits recorded in northeastern Brazil. *Terra Nova* 32, 187–97.
- Kosler J., Fonneland H., Sylvester P., Tubrett M., Pedersen R. B. (2002). U-Pb dating of detrital zircons for sediment provenance studies – a comparison of laser ablation ICPMS and SIMS techniques. *Chemical Geology*, 182, 605-618.
- Lambeck, K. (1983). The role of compressive forces in intracratonic basin formation and mid-plate orogenies. *Geophysical Research Letters*, 10(9), 845-848.
- Leighton, M. W., Kolata, D. R. (1990). Selected interior cratonic basins and their place in the scheme of global tectonics: A synthesis. In M. W. Leighton, D. R. Kolata, D. F. Oltz, J. J. Eidel (Eds.), *Interior cratonic basins* (pp. 729-797). American Association of Petroleum Geologists, Memoir, 51.
- Lieberman, B. S. (1997). Early Cambrian paleogeography and tectonic history: a biogeographic approach. *Geology*, 25(11), 1039-1042.
- Luvizotto, G. L., Zack, T., Meyer, H. P., Ludwig, T., Triebold, S., Kronz, A. Jacob, D. E. (2009). Rutile crystals as potential trace element and isotope mineral standards for microanalysis. *Chemical Geology*, 261(3), 346-369.
- Lima, E. D. A. M., Leite, J. F. (1978). Projeto estudo global dos recursos Minerais da Bacia sedimentar do Parnaíba. Integração geológico-metalogenética. Relatório Final da etapa III. Recife, CPRM, 16 vol.
- Lima, F. G. F., Sá, E. F. J. (2017). Controle estrutural da borda sudeste da Bacia do Parnaíba, Nordeste do Brasil: relação com eventos geodinâmicos no Gondwana. *Geologia USP. Série Científica*, 17(3), 3-21.
- Ludwig, K. R. (2003). User's Manual for Isoplot/Ex Version 3.00 e A Geochronology Toolkit for Microsoft Excel, vol. 4. Berkeley Geochronological Center, Special Publication.
- Luvizotto, G. L., Zack, T., Meyer, H. P., Ludwig, T., Triebold, S., Kronz, A., Münker, C., Stockli, D. F., Prowatke, S., Klemme, S., Jacob, D. E., von Eynatten, H. (2009). Rutile crystals as potential trace element and isotope mineral standards for microanalysis. *Chemical Geology*, 261(3-4), 346-369.
- Marques, A., Zanotto, O. A., França, A. B., Astolfi, M. A. M., Paula, O. B. (1993). Compartimentação tectônica da Bacia do Paraná. Relatório Interno PETROBRAS, Núcleo de Exploração da Bacia do Paraná.
- McKenzie, D. (1978). Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary science letters*, 40(1), 25-32.
- McKenzie, D., Priestley, K. (2016). Speculations on the formation of cratons and cratonic basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 435, 94-104.

- McKenzie, D., Tribaldos, V. R. (2018). Lithospheric heating by crustal thickening: a possible origin of the Parnaíba Basin. Geological Society, London, Special Publications, 472(1), 37-44.
- Menzies, L. A., Carter, A., MacDonald, D. I. (2018). Evolution of a cratonic basin: insights from the stratal architecture and provenance history of the Parnaíba Basin. Geological Society, London, Special Publications, 472(1), 157-179.
- Miall, A. D. (1974). Paleocurrent analysis of alluvial sediments: a discussion of directional variance and vector magnitude. *Journal of Sedimentary Research*, 44(4).
- Miall, A.D. (1996) The geology of fluvial deposits. Sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology. *Sedimentary Petrology*, 110 (1): 582.
- Miall, A. D. (2002). An introduction to rift basins and their sediments. *SedG*, 147(1), 3-8.
- Milani, E. J., Thomaz Filho, A. (2000). Sedimentary basins of South America. In: U. G. Cordani, E. J. Milani, A. Thomaz Filho, D. A. Campos (Eds.). *Tectonic evolution of South America*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências e Departamento Nacional da Produção Mineral. v. 1. p. 389-449.
- Milani, E. J., Rangel, H. D., Bueno, G. V., Stica, J. M., Winter, W. R., Caixeta, J. M., Neto, O. P. (2007). Bacias sedimentares brasileiras: cartas estratigráficas. Anexo ao Boletim de Geociências da Petrobrás, 15(1), 183-205.
- Mizusaki, A. M. P., Saracchini, F. E. (1990). Catálogo geral de dados geocronológicos da Petrobrás. Petrobrás/Cenpes, Rio de Janeiro, p. 24 Relatório Interno. Unpublished.
- Nascimento, R. D. S., Gorayeb, P. S. D. S. (2016). Basaltos da Suíte Parapuí, Gráben Jaibaras, noroeste do Ceará: caracterização, petrografia, geoquímica e química mineral. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(4), 459-468.
- Neumann, E. R., Olsen, K. H., Balbridge, W. S., Sundvoll, B. (1992). The Oslo Rift: a review, in *Geodynamics of rifting*, vol. 1, Case history studies of rifts: Europe and Asia (Ed. By Ziegler, P.A.), *Tectonophysics*, 208, 1-18.
- Novais, F. R. G., Brito Neves, B. D., Kawashita, K. (1979). Reconhecimento cronoestratigráfico na região Noroeste do Ceará. In SBG, *Simposio de Geologia do Nordeste* (Vol. 9, pp. 91-110).
- Nunes, K. C. (1993). Interpretação Integrada da Bacia do Parnaíba com Ênfase nos Dados Aeromagnéticos. In 3rd International Congress of the Brazilian Geophysical Society, *Expanded Abstracts*, p. 152 – 157.
- Oliveira, D. C. (2000). Stratigraphic interplays between igneous and sedimentary events in the early palaeozoic Jaibaras trough (Northeast Brazil). *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3), 427-431.

- Oliveira, D. C. (2001). Reavaliação da evolução tectono-magmática do Graben de Jaibaras (nordeste do Brasil). *Acta geológica hispánica*, 36(1), 53-95.
- Oliveira, D. C., Martins, G. M., Branco, R. M. G. C., Castro, D. L. (2001). Um modelo alternativo para a formação da Bacia do Jaibaras: implicações para a evolução final da cadeia Brasiliana/Pan-Africana no noroeste da Província Borborema. *Revista de Geologia*, 14(1), p. 11 - 21.
- Oliveira, D. C., Mohriak, W. U. (2003). Jaibaras trough: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag basin, Northern Brazil. *Marine and Petroleum geology*, 20(3), 351-383.
- Parente, C. V., Silva Filho, W. F., Almeida, A. R. (2004). Bacias do estágio de transição do domínio setentrional da Província Borborema. Mantesso Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, CDR, Brito Neves, BB-2004-Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Beca, 525-536.
- Pedrosa Junior, N. C. (2015). Interpretação e Modelagem de Dados Geofísicos no Estudo da Evolução Geotectônica do Rifte de Jaibaras-NE do Brasil. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília, Brasília (187pp).
- Pedrosa Junior, N. C., Vidotti, R. M., Fuck, R. A., Oliveira, K. M. L., Branco, R. M. G. C. (2015). Structural framework of the Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data. *Journal of South American Earth Sciences*, 58, 318-334.
- Pedrosa Junior, N. C., Vidotti, R. M., Fuck, R. A., Branco, R. C., de Almeida, A. R., Silva, N. C. V., Braga, L. R. (2017). Architecture of the intracontinental Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data. *Journal of South American Earth Sciences*, 74, 27-40.
- Pereira, E., Carneiro, C. D. R., Bergamaschi, S., Almeida, F. F. M. (2012). Evolução das sinéclises Paleozoicas: Províncias Solimões, Amazonas, Parnaíba e Paraná. In: Y. Hasui, C. D. R. Carneiro, F. F. M. Almeida, A. Bartorelli, (Eds.). *Geologia do Brasil*. São Paulo: BECA. v. 1. p. 374-394.
- Quadros, M. L. D. E. S. (1996). Estudo tectono-sedimentar da Bacia de Jaibaras, na região entre as cidades de Pacujá e Jaibaras, noroeste do estado do Ceará. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Belém, 141 p.
- Quadros, M. L. E. S., Abreu, F. A. M., Gorayeb, P. S. S. (1994). Considerações sobre os ambientes deposicionais das Formações Pacujá e Aprazível, Bacia de Jaibaras-NW do Ceará. In SBG, Congresso Brasileiro de Geologia (Vol. 38, pp. 240-242).
- Quadros, M. L. E. S., Abreu, F. A. M. (1995). Bacia de Jaibaras-NW do Ceará: considerações sobre a evolução tectono-sedimentar. *Anais do 5º Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, Gramado, 307-309.

- Ross, J. B., Ludvigson, G. A., Möller, A., Gonzalez, L. A., Walker, J. D. (2017). Stable isotope paleohydrology and chemostratigraphy of the Albian Wayan Formation from the wedge-top depozone, North American Western Interior Basin. *Science China Earth Sciences*, 60(1), 44-57.
- Santos, T. J. S. (1999). Evolução tectônica e geocronológica do extremo noroeste da Província Borborema (Tese de doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista. Área de Concentração em Geologia Regional).
- Santos, T. J. S., Fetter, A. H., Nogueira Neto, J. A. (2008). Correlation of the west margin of the Transbrasiliano–Kandi Lineament in the Borborema Province (NE Brazil) and Pharusian Belt (NW Africa). *West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. Geological Society, London. Special Publications, 294, 101-119.
- Santos, M. E. D. C. M., de Carvalho, M. S. S. (2009). Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís. CPRM Serviço Geológico do Brasil.
- Santos, R. D., Castro, D. D., Bezerra, F. H. R., Vidotti, R. M., Fuck, R. A., Dantas, E. L., Lima, T. D. (2013a). Influência do Lineamento Transbrasiliano na formação do arcabouço estrutural da Bacia Parnaíba. In *International Congress of the Brazilian Geophysical Society* (Vol. 13, pp. 1-6).
- Santos, R. V., de Oliveira, C. G., Parente, C. V., Garcia, M. D. G. M., & Dantas, E. L. (2013b). Hydrothermal alteration related to a deep mantle source controlled by a Cambrian intracontinental strike-slip fault: Evidence for the Meruoca felsic intrusion associated with the Transbrasiliano Lineament, northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 43, 33-41.
- Santos, M. M., Lana, C., Scholz, R., Buick, I., Schmitz, M. D., Kamo, S. L., Gerdes, A., Corfu, F., Tapster, S., Lancaster, P., Storey, C. D., Basei, M. A. S., Tohver, E., Alkmim, A. (2017). A new appraisal of Sri Lankan BB zircon as a reference material for LA-ICP-MS U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope tracing. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 41(3), 335-358.
- Selley, R. C. (1982). *Introduction to sedimentology*. Academic Press.
- Silva Junior, O. G. D., Santos, M. V. D., Moura, C. A. V., Nascimento, R. D. S., Vilas, R. N. N. 2014. Carta Geológica: folha Frecheirinha - SA.24-YC-VI. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). <http://dspace.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/17764/frecheirinha.pdf?sequence=1>

- Sláma, J., Košler, J., Condon, D. J., Crowley, J. L., Gerdes, A., Hanchar, J. M., Horswood, M. S. A., Morris, G. A., Nasdala, I., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M. N., Whitehouse, M. J. (2008). Plešovice zircon - a new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1-2), 1-35.
- Sleep, N. H., Snell, N. S. (1976). Thermal contraction and flexure of mid-continent and Atlantic marginal basins. *Geophysical Journal International*, 45(1), 125-154.
- Sleep, N. H., Sloss, L. L. (1980). The Michigan Basin, in dynamics of plate interiors (Eds. By Bally, A.W., Bender, P.L., Mcgetchin, T.R., and Walcott, R.I.), *American Geophysical Union/Geological Society of America Geodynamics Series*, 1, 93-97.
- Sloss, L. L. (1963). Sequences in the cratonic interior of North America. *Geological Society of America Bulletin*, 74(2), 93-114.
- Sloss, L. L. (1988). Introduction: In sedimentary cover-North American craton. *Geological Society of America, the Geology of North America*, D-2, 1-3.
- Stampfli, G. M., Hochard, C., Vérard, C., Wilhem, C. (2013). The formation of Pangea. *Tectonophysics*, 593, 1-19.
- Stel, H., Cloetingh, S. A. P. L., Heeremans, M., Van der Beek, P. (1993). Anorogenic granites, magmatic underplating and the origin of intracratonic basins in a non-extensional setting. *Tectonophysics*, 226(1-4), 285-299.
- Takenaka, L., Lana, C., Scholz, R. (2014). Optimization of the in-situ U-Pb age dating method via LA-Quadrupole-ICP-MS with applications to the timing of U-Zr-Mo mineralization in the Poços de Caldas Alkaline Complex, SE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 62, 70-79.
- Tavares Jr., S. S., Gorayeb, P. S. S., Lafon, J. M. (1990). Petrografia e geocronologia Rb/Sr do feixe de diques da borda oeste do Granito de Meruoca (CE). In: 36th Congresso Brasileiro de Geologia, Expanded Abstracts, pp. 337 e 338.
- Teixeira, A. L., Gaucher, C., Paim, P. S. G., Fonseca, M. D., Parente, C. V., Silva Filho, W. D., Almeida, A. D. (2004). Bacias do estágio da transição da Plataforma Sul-Americana. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca Produções Culturais, São Paulo, 487-537.
- Tozer, B., Watts, A. B., Daly, M. C. (2017). Crustal structure, gravity anomalies, and subsidence history of the Parnaíba cratonic basin, Northeast Brazil. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(7), 5591-5621.
- Tomkins, H. S., Powell, R., Ellis, D. J. (2007). The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer. *Journal of metamorphic Geology*, 25(6), 703-713.

- Triebold, S., von Eynatten, H., Zack, T. (2012). A recipe for the use of rutile in sedimentary provenance analysis. *Sedimentary Geology*, 282, 268-275.
- van Achterbergh, E. (2001). Data reduction software for LA-ICP-MS. *Laser Ablation-ICP-mass spectrometry in the earth sciences: principles and applications*, 239-243.
- Vaz, P. T., Rezende, N. G. A. M., Wanderley Filho, J. R., Travassos, W. S. (2007). Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociencias da PETROBRAS*, 15(2), 253-263
- Vermeesch, P., Resentini, A., Garzanti, E. (2016). An R package for statistical provenance analysis. *Sedimentary Geology*, 336, 14-25.
- Viana, M. S. S., de Oliveira, P. V., de Sousa, M. D. J. G., Barroso, F. R. G., Vasconcelos, V. Á., Melo, R. M., ... de Paulo Chaves, A. P. (2010). Ocorrências Icnofossilíferas do Grupo Serra Grande (Siluriano da Bacia do Parnaíba), Noroeste do Estado do Ceará. *Geologia*, 23(1).
- Watts, A. B., Tozer, B., Daly, M. C., Smith, J. (2018). A comparative study of the Parnaíba, Michigan and Congo cratonic basins. *Geological Society, London, Special Publications*, 472(1), 45-66.
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(5), 377-392.
- White, N., McKenzie, D. (1988). Formation of the "steer's head" geometry of sedimentary basins by differential stretching of the crust and mantle. *Geology*, 16(3), 250-253.
- Whittaker, A. C., Attal, M., Allen, P. A. (2010). Characterizing the origin, nature and fate of sediment exported from catchments perturbed by active tectonics. *Basin Research*, 22(6), 809-828.
- Zack, T., Kronz, A., Foley, S. F., Rivers, T. (2002). Trace element abundances in rutiles from eclogites and associated garnet mica schists. *Chemical Geology*, 184(1), 97-122.
- Zack, T., Moraes, R., Kronz, A. (2004a). Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(4), 471 - 488.
- Zack, T., Von Eynatten, H., Kronz, A. (2004b). Rutile geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies. *Sedimentary Geology*, 171(1), 37-58.
- Zack, T., Stockli, D. F., Luvizotto, G. L., Barth, M. G., Belousova, E., Wolfe, M. R., Hinton, R. W. (2011). In situ U–Pb rutile dating by LA-ICP-MS: 208Pb correction and prospects for geological applications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162(3), 515-530.
- Zack, T., Kooijman, E. (2017). Petrology and geochronology of rutile. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 83(1), 443-467.

Zhang, X., Pease, V., Skogseid, J., Wohlgemuth-Ueberwasser, C. (2016). Reconstruction of tectonic events on the northern Eurasia margin of the Arctic, from U-Pb detrital zircon provenance investigations of late Paleozoic to Mesozoic sandstones in southern Taimyr Peninsula. *GSA Bulletin*, 128(1-2), 29-46.