

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 17/06/2027.



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

**Proveniência sedimentar e idades U-Pb de zircão detrítico no
registro aluvial de ergs marginais do Brasil e da África:
Formações Botucatu e Twyfelfontein**

LEANDRO GUSTAVO DA SILVA ALBINO

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

Rio Claro - SP
2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

LEANDRO GUSTAVO DA SILVA ALBINO

**Proveniência sedimentar e idades U-Pb de zircão detrítico no
registro aluvial de *ergs* marginais do Brasil e da África:
Formações Botucatu e Twyfelfontein**

Dissertação de Mestrado 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 Mestre
em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Irineu Cerri

Rio Claro – SP

2025

A336p

Albino, Leandro Gustavo da Silva

Proveniência sedimentar e idades U-Pb de zircão detrítico no registro aluvial de ergs marginais do Brasil e da África: Formações Botucatu e Twyfelfontein / Leandro Gustavo da Silva Albino. -- Rio Claro, 2025

127 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Rodrigo Irineu Cerri

1. Bacias sedimentares. I. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Este estudo contribui com novos dados sobre depósitos em margens de desertos formados em bacias envolvendo a fragmentação do supercontinente Gondwana. A compreensão desses depósitos auxilia no entendimento da dinâmica envolvendo a geração de depósitos siliciclásticos e o potencial como aquífero e petrolífero, beneficiando pesquisas acadêmicas e setores ligados à energia, hidrocarbonetos e água.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This study contributes new data on desert-margin deposits formed in basins related to the fragmentation of the Gondwana supercontinent. Understanding these deposits helps to elucidate the dynamics of siliciclastic systems and their potential as aquifers and petroleum reservoirs, benefiting academic research and sectors related to energy, hydrocarbons, and water.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

LEANDRO GUSTAVO DA SILVA ALBINO

**Proveniência sedimentar e idades U-Pb de zircão detrítico no
registro aluvial de *ergs* marginais do Brasil e da África:
Formações Botucatu e Twyfelfontein**

Dissertação de Mestrado 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 Mestre
em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Irineu Cerri

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Rodrigo Irineu Cerri (orientador)
IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Lucas V. Warren
IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini
IG / USP/São Paulo (SP)

Conceito: Aprovado

Rio Claro (SP) 17 de junho de 2025.

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer meu orientador Prof. Rodrigo Cerri, por todas as conversas, ensinamentos, sugestões e pela amizade. Agradeço ao o Prof. Luciano Alessandretti e Prof. Lucas Warren, que foram, mesmo que não oficiais, grandes orientadores. Agradeço a banca examinadora da defesa, composta pelo Prof. Lucas Warren e Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini. Agradeço também à minha companheira e melhor amiga Vanessa, por todo amor, carinho e apoio, me fornecendo suporte e força para superar qualquer dificuldade. Agradeço a minha mãe. Dona Iolanda me incentivou a lutar para percorrer o caminho que realmente me traria felicidade e satisfação, uma visão imprescindível durante estes anos e continuará sendo por toda vida. Aos antigos amigos, Pedro (Gepeto), Matheus (Capinha), Anselmo, Gabriel (Gordo), Leandro (Leleu) e Leonardo (Vovô), que independente da distância, tornaram cada dia difícil um pouco mais leve. Um profundo agradecimento ao Dr. Gabriel Bertolini, que cedeu amostras da Namíbia que compõem as amostras analisadas neste trabalho. Um agradecimento ao Departamento de Geologia da Universidade Estadual Paulista (UNESP - Campus Rio Claro), por disponibilizar o acesso aos equipamentos de para preparação de amostras, assim como ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e espectroscopia de raios-X (EDS). Um agradecimento também ao Laboratório de Microscopia Óptica e Fotomicrografia (LMOF) no Centro de Ciências Naturais Aplicadas (UNESPetro), do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (UNESP, Rio Claro, São Paulo). Agradeço também ao Laboratório de Espectrometria de Massa de Alta Resolução com Plasma Indutivamente Acoplado (LA-ICP-MS), do Departamento de Geologia, (UNESP – Rio Claro – SP). Um agradecimento também para o Laboratório de Microsonda Eletrônica (EPMA) do Departamento de Geologia da Universidade Estadual Paulista (UNESP – Rio Claro – SP) e Laboratório de Geologia Isotópica (LAGIS), da UNICAMP Campinas. Ao PRH 40.1 – Programa de Recursos Humanos – Acordos de cooperação entre Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), apoiado com investimento financeiro de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de PD&I da ANP (Resolução nº 50/2015), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2024/11391-5, vinculado ao processo número 2024/10498-0, pelo financiamento da bolsa de mestrado e taxa de bancada durante a execução do trabalho. As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

“Vou mostrando como sou,
E vou sendo como posso”

Mistério do planeta, Novos Baianos

Resumo

A Formação Botucatu (Bacia do Paraná, Brasil) e a Formação Twyfelfontein (Bacia de Huab, Namíbia) representam registros sedimentares de um extenso paleodeserto que se desenvolveu no sudoeste do Gondwana durante o Cretáceo. Embora amplamente reconhecidas por seus depósitos eólicos, essas unidades preservam fácies aluviais marginais, cuja caracterização detalhada ainda é limitada. Este trabalho apresenta um estudo sedimentológico e de proveniência sedimentar, com o objetivo de compreender a gênese, deposição e contexto paleogeográfico, visto que esses registros fornecem informações sobre a dinâmica sedimentar em ambientes de margens de desertos. Foram realizadas análises de fácies sedimentares, paleocorrentes, contagem de litoclastos, petrografia, análise de minerais pesados e geocronologia U-Pb em zircão detrítico por LA-ICP-MS. Os resultados revelam sistemas deposicionais aluviais alimentados por áreas-fonte locais, oriundos de períodos de variações de umidade nas bordas das bacias do Paraná e Huab, com aporte de sedimentos provenientes de terrenos neoproterozoicos adjacentes (Faixa Brasília e Faixa Damara). As análises de proveniência sedimentar em conjunto com as idades máximas de deposição obtidas por U-Pb em zircão corroboraram com a correlação estratigráfica entre as unidades, reforçando sua conexão antes da fragmentação do Gondwana. Os resultados demonstram que os sistemas aluviais desempenharam um papel fundamental na alimentação sedimentar do paleoerg Botucatu e indicam que esses sistemas podem ter sido progressivamente desativados, de modo que as formações Botucatu e Twyfelfontein tenham sua gênese associada a um extenso sistema fluvial, posteriormente extinto e substituído pelo regime eólico. Essa hipótese, alinhada aos modelos de aridificação crescente no interior da porção ocidental do Gondwana, abre caminho para investigações futuras sobre a evolução inicial do paleodeserto Botucatu. A integração dos dados permitiu a construção de um modelo deposicional e paleogeográfico destacando a correlação entre as unidades contribuindo para a compreensão da evolução tectono-sedimentar das margens desérticas do Gondwana durante o início da fragmentação continental. Este trabalho não apenas aprimora a compreensão das formações Botucatu e Twyfelfontein, como também oferece um modelo análogo para a evolução de paleoergs antigos e modernos, destacando o papel fundamental dos sistemas aluviais marginais na dinâmica sedimentar de desertos. Os resultados ilustram como variações climáticas em um contexto de aridificação progressiva podem gerar sistemas aluviais desconectados, marcando a transição entre domínios fluviais e eólicos antes da ruptura final do Gondwana.

Palavras-chave: Formação Botucatu, Formação Twyfelfontein, paleodeserto, proveniência sedimentar, geocronologia U-Pb.

Abstract

The Botucatu Formation (Paraná Basin, Brazil) and the Twyfelfontein Formation (Huab Basin, Namibia) represent sedimentary records of an extensive paleodesert that developed in southwestern Gondwana during the Cretaceous. While widely recognized for their aeolian deposits, these units preserve marginal alluvial facies, of which the detailed characterization remains limited. This study presents an integrated sedimentological and sedimentary provenance analysis, aiming to understand their genesis, depositional processes, depositional age, and paleogeographic context, as these records provide insights into sedimentary dynamics in desert margin environments. Sedimentary facies analysis, paleocurrent measurements, lithoclast counting, petrography, heavy mineral analysis, and U-Pb detrital zircon geochronology by LA-ICP-MS were conducted. The results reveal alluvial depositional systems fed by local source areas, derived from periods of humidity variations along the margins of the Paraná and Huab basins, with sediment input from adjacent Neoproterozoic orogenic terrains (Brasília Belt and Damara Belt). Provenance analysis combined with maximum depositional ages obtained by U-Pb zircon dating supports the stratigraphic correlation between the two units, reinforcing their connection prior to the breakup of Gondwana. The findings demonstrate that alluvial systems played a fundamental role in sediment supply to the Botucatu paleoerg and suggest that these systems may have been progressively deactivated, with the Botucatu and Twyfelfontein formations initially associated with an extensive fluvial system that was later replaced by an aeolian regime. This hypothesis, aligned with models of increasing aridity in western Gondwana, opens avenues for future research on the early evolution of the Botucatu paleodesert. The integration of the obtained data enabled the construction of a depositional and paleogeographic model that highlights the correlation between the analyzed units and contributes to understanding the tectono-sedimentary evolution of Gondwana's desert margins during the early stages of continental breakup. This study not only enhances the understanding of the Botucatu and Twyfelfontein formations but also provides an analog model for the evolution of ancient and modern paleoergs, emphasizing the crucial role of marginal alluvial systems in desert sedimentary dynamics. The results illustrate how climatic variations in a context of progressive aridity can generate disconnected alluvial systems, marking the transition between fluvial and aeolian domains before the final breakup of Gondwana.

Keywords: Botucatu Formation, Twyfelfontein Formation, paleodesert, sedimentary provenance, U-Pb geochronology.

Lista de Figuras

- Figura 1– Paleogeografia do Gondwana permo-carbonífero. CT = Terreno Cuyania. PT = Terreno Patagônia. AC = Cráton Amazônico. SFC = Cráton São Francisco. RPC = Cráton do Rio de la Plata. RAC = Cráton Rio Apa. DFB = Cinturão Dom Feliciano. RB = Cinturão Ribeira. BB = Cinturão Brasília. PB = Cinturão Paraguai. (modificado de Cichowolski et al., 2018).20
- Figura 2 – (A) Localização da Bacia do Paraná no continente sul-americano, destacando a área de afloramento da Formação Botucatu. (Modificado de Scherer, 2000; Bertolini et al., 2020). (B) Localização geográfica da porção oeste do estado de Minas Gerais e do afloramento estudado no limite nordeste da Bacia do Paraná. (C) Localização do afloramento estudado em um corte de ferrovia na Ferrovia Centro Atlântica – FCA, cidades de Araguari e Uberlândia (coordenadas UTM: 790638E/7924922S). A imagem foi obtida do Google Earth.21
- Figura 3 – (A) Transectos estratigráficos utilizados na construção das cartas estratigráficas. (B) Carta estratigráfica Oeste-Leste na porção sul da Bacia do Paraná. Nota-se o contato marcado por um hiato entre a Formação Botucatu e as formações Guará e Pirambóia. (C) Carta estratigráfica Nordeste-Sudoeste. Neste caso, observa-se o contato da Formação Botucatu com as formações Caturrita e Santa Maria, além dos arenitos Pedreira. (D) Carta estratigráfica Oeste-Leste na porção norte da Bacia do Paraná (modificado de Scherer et al., 2023).23
- Figura 4 – (A) Mapa geológico simplificado da área de estudo. (B) Ampliação da região indicada em “A”. (Modificado de Famelli et al. 2021).25
- Figura 5 – Reconstrução paleogeográfica do Permiano-Triássico da porção SW do supercontinente Gondwana. Explicação: BP – Bacia do Paraná; BCP – Bacia do Chaco-Paraná; BH – Bacia de Huab; BC – Bacia do Congo; BKL – Bacia do Kalahari; BAP – Bacias de antepaís. (Modificado de Faure e Cole, 1999; Scherer et al., 2023; Christofolletti et al. 2024).27
- Figura 6 – (A) Localização dos afloramentos na região noroeste da Namíbia. Note o contorno da Bacia de Huab e o conteúdo litológico da bacia compreendendo rochas vulcânicas do Grupo Etendeka em associação com os arenitos da Formação Twyfelfontein margeados à sul pelo Cinturão Damara. (B) Posição da quadrícula “A” à noroeste da Namíbia, África.28
- Figura 7 – Perfil estratigráfico esquemático da litologia da Bacia do Huab. (Modificado de Salomon et al. 2016).29
- Figura 8 – Termos estratigráficos usados para os depósitos do Cretáceo Inferior na Bacia do Huab. (Modificado de Jerram, 2000).30
- Figura 9 – Amostras analisadas na Formação Botucatu (BOT-01, BOT-02 e BOT-03) e na Formação Twyfelfontein (TWY-01, TWY-02 e TWY-03) nos diagramas ternários. (A) Diagrama ternário de proveniência tectônica (Dickinson, 1985). (B) Diagrama ternário de classificação de rochas terrígenas (Folk, 1968).100
- Figura 10 – Fotomicrografias das fácies fluviais da Formação Twyfelfontein. (A) Estrutura do arenito conglomerático (amostra TWY-01; polarizadores cruzados) mostrando a predominância de grãos de quartzo monocrystalino. Alguns grãos de quartzo detrítico exibem crescimento sintaxial descontínuo de sílica (setas verdes). Note a ocorrência de grão de zircão ao centro (seta amarela). Detalhe também para a ocorrência de grão arredondado e com alta esfericidade (seta vermelha), pouco observados nas amostras. (B) Mesmo que A, mas com luz natural/polarizadores descruzados. (C) Detalhe de um litoclasto de rocha vulcânica (amostra TWY-02; polarizadores cruzados; seta rosa). (D) Mesmo que C, mas com luz natural/polarizadores descruzados. (E) Detalhe da predominância de grãos de quartzo com arredondamento e esfericidade de baixo a intermediário (amostra TWY-03). (F) Mesmo que E, mas com luz natural/polarizadores descruzados. 104

Figura 11 – Fotomicrografias das fácies fluviais da Formação Twyfelfontein. (A) Detalhe de um litoclasto de rocha vulcânica (amostra TWY-01; polarizadores cruzados; seta amarela). (B) Mesmo que A, mas com luz natural/polarizadores descruzados. (C) Contatos concavo-convexo (amostra TWY-02; setas vermelhas e rosas). (D) Mesmo que C, mas com luz natural/polarizadores descruzados. (E) Detalhe de estrutura com arredondamento e esfericidade de baixo a intermediário (amostra TWY-03). Note a ocorrência de raros grãos com alto arredondamento e esfericidade (seta branca). (F) Mesmo que E, mas com luz natural/polarizadores descruzados.105

Figura 12 – (A) Gráfico de análise de componentes principais (PCA) indicando a composição principal da Formação Botucatu e Formação Twyfelfontein. (B) Gráfico de análise de componentes principais (PCA) indicando assembleia de minerais pesados da Formação Botucatu e Formação Twyfelfontein. Quartzo (Qtzo); Quartizito (Qtzt); Microclínio (Merc); Muscovita (Mscv); Xisto (Xist); Granada (Grnd); Estauroclita (Estr); Plagioclásio (Pgcl); Apatita (Aptt); Biotita (Biot); Zircão (Zrcn); Sílica Diagenética (Dsil); Feldspato Diagenético (Dfel); Porosidade (Poro); Cimentação de óxido de ferro (Cife); Rutilo (Rutl); Arenito (Arnt); Granito (Gran); Argila Diagenética (Argl); Monazita (Mnzt); Hornblenda (Horn); Andaluzita (Andl); Anatásio (Ants); Titanita (Ttnt); Epidoto (Epdt); Turmalina (Trml); Sillimanita (Sill); Cianita (Cian); Topázio (Topz); Augita (Augt); Actinolita (Actn); Tremolita (Trem).....106

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Concentração e composição dos componentes presentes nas amostras analisadas da Formação Botucatu e Formação Twyfelfontein. GM: Grão monomineralico; FRM: Fragmento de rocha metamórfica; FRV: Fragmento de rocha vulcânica; FRS: Fragmento de rocha sedimentar.102

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DA TESE	14
2. INTRODUÇÃO	16
3. OBJETIVOS	18
4. CONTEXTO GEOLÓGICO	18
4.1. Bacia do Paraná	19
4.1.1. Formação Botucatu	21
4.2. Bacia de Huab	27
4.2.1. Formação Twyfelfontein	27
5. MATERIAIS E MÉTODOS	31
5.1. Levantamento bibliográfico	32
5.2. Aquisição de seção colunar e análise de fácies sedimentares	32
5.3. Coleta de amostras	33
5.3.1. Preparação de amostras	32
5.4. Proveniência sedimentar	34
5.4.1. Paleocorrentes	35
5.4.2. Contagem de litoclastos	36
5.4.3. Contagem modal da composição detrítica (método Gazzi-Diclinson)	36
5.4.4. Análise convencional de minerais pesados	37
5.4.5. Análise de componentes principais (PCA)	38
5.4.6. Geocronologia U-Pb em zircão detrítico	38
6. RESULTADOS	40
6.1. Processos sedimentares fluviais em margem de ergs: o exemplo da Formação Botucatu, Bacia do Paraná	42
6.2. Além das dunas: assinatura aluvial nas margens do paleoerg Cretáceo do Gondwana e dados U-Pb das formações Botucatu e Twyfelfontein	62
6.3. Dados adicionais	101
6.3.1. Contagem modal da composição detrítica (Método Gazzi-Dickinson)	101
6.3.2. Análise petrográfica – Formação Twyfelfontein	105
6.3.1. Análise de componentes principais por “chi-square distance”	108
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	109
Referências Bibliográficas	111
Apêndices	118

2. INTRODUÇÃO

O período Cretáceo foi caracterizado por uma completa reorganização do supercontinente Gondwana e, como consequência, por significativas mudanças climáticas (Scherer e Goldberg, 2007). Indicadores paleoclimáticos sugerem que o Cretáceo foi um dos períodos mais quentes do Fanerozoico (Scherer e Goldberg, 2007; Fluteau, et al., 2007). A reorganização das placas tectônicas relacionadas ao supercontinente Pangea foi responsável pela fragmentação de blocos continentais, gerando intensa atividade do efeito estufa resultante do aumento dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera durante períodos de intenso tectonismo (Veevers, 1990). Nesse contexto, essas condições associadas ao aprisionamento de bacias no interior árido dos continentes, propiciaram o desenvolvimento de amplos desertos, como o paleodeserto Botucatu (Scherer e Goldberg, 2007). Deste modo, sistemas deposicionais desérticos associados a mares de dunas *ergs*, ocorreram de modo intenso em todo Gondwana durante o Cretáceo devido ao clima quente e seco. Apesar de serem majoritariamente compostos por sistemas eólicos, os desertos podem estar associados a rios efêmeros ou perenes, originando depósitos de enxurrada, leques aluviais e rios entrelaçados nas bordas dos sistemas desérticos durante variações de umidade (Miyazaki e Basilici, 2015). Walker e Middleton (1977) ponderam que modelos de fácies para extensos depósitos antigos de areia eólica (*paleoerg*) devem ser baseados em *ergs* modernos. As regiões áridas modernas ocupam cerca de um terço da superfície terrestre atual e compreendem além de *ergs*, ambientes de leques aluviais, cursos de águas efêmeros e *playa lakes* (Walker e Middleton, 1977). Segundo Fernandes (2014), a presença da cordilheira pré-andina pode ter atuado como uma barreira topográfica, impedindo que os ventos do oeste deslocassem umidade para o interior do continente, produzindo uma ampla faixa de aridez e gerando imensos desertos que cobriam grande parte da Plataforma Sul-Americana. Como exemplo dessas amplas faixas áridas, temos o paleodeserto Botucatu.

Litoestratigraficamente, a Formação Botucatu (Cretáceo Inferior) está inserida na Supersequência Gondwana III, assim como os derrames basálticos da Formação Serra Geral (Milani et al., 2007). Esta unidade é constituída majoritariamente por quartzo-arenitos eólicos dispostos em camadas com estratificação cruzada planar e acanalada de médio a grande porte (Almeida, 1953; Assine et al., 2004; Scherer e Lavina, 2006; Milani et al., 2007). Em alguns locais restritos, afloram litofácies distintas das tradicionalmente descritas e atribuídas a essa unidade. Nas porções leste e nordeste da Bacia do Paraná (estados de São Paulo e Minas Gerais), e com menor frequência no Rio Grande do Sul e Paraná, a Formação Botucatu compreende raras ocorrências de arenitos médios a grossos e conglomeráticos, interpretados

como produzidos por fluxos torrenciais e correntes efêmeras (Bigarella e Salamuni, 1961; Soares, 1975; Almeida e Melo, 1981; Scherer e Goldberg, 2007). Segundo Soares (1975), a ocorrência destes pacotes de arenitos conglomeráticos pode atingir espessuras superiores a 8m no Paraná e espessuras métricas na base da Formação Botucatu em São Paulo. É importante destacar, entretanto, que estes depósitos no Paraná e em São Paulo foram posteriormente redefinidos como pertencente à Formação Guará (Reis et al., 2019). Afloramentos pouco espessos também foram encontrados no Rio Grande do Sul (Bortoluzzi, 1975).

Na região entre as cidades de Araguari e Uberlândia, oeste de Minas Gerais, Moraes e Seer (2018) atribuíram camadas de brechas, conglomerados, arenitos conglomeráticos e siltitos subjacentes aos basaltos da Formação Serra Geral à Formação Botucatu. Essas fácies foram interpretadas como resultantes de fluxos aquosos episódicos, responsáveis por originar leques aluviais, rios entrelaçados e/ou depósitos fluviolacustres efêmeros depositados em discordância sobre metagranitos neoproterozoicos do Complexo Maratá da Faixa Brasília (Moraes e Seer, 2018;). Estudos de Suguio e Coimbra (1972) e Pires et al. (2021) apontam ocorrências de troncos de coníferas silicificadas na Formação Botucatu que, como consequência indicariam a ocorrência de períodos de maior umidade durante o clima árido/desértico predominante durante a evolução do sistema desértico no paleodeserto Botucatu.

Essas fácies fluviais ocorrem também na contraparte africana, em que a Formação Twyfelfontein, Bacia de Huab (África do Sul e Namíbia), apresenta fácies conglomeráticas fluviais na base, fluvio-eólicas e as unidades eólicas do topo da unidade (Mountney et al., 1998, 1999). Portanto, em resposta as relações litoestratigráficas e de ocorrência dos pacotes sedimentares associados aos pacotes vulcânicos extrusivos, entende-se que a Formação Twyfelfontein seja considerada uma equivalente estratigráfica da Formação Botucatu (Porchetti e Wagensommer, 2015). A Formação Twyfelfontein cobre cerca de 5000 km² da Bacia de Huab (Mountney et al., 1998, 1999; Mountney e Howell, 2000) e está depositada sobre as rochas do Supergrupo Karoo. Apresentam-se ainda sobrepostas e intercamadas com as rochas da Formação Botucatu e os basaltos da Formação Serra Geral (Seer e Moraes, 2017).

Portanto, uma análise de fácies detalhada e de proveniência sedimentar destes depósitos é de grande importância devido à ausência desse tipo de estudo nessas ocorrências de arenitos conglomeráticos, podendo fornecer subsídio para futuros trabalhos. Dessa forma, o presente projeto de mestrado busca realizar um estudo integrado, envolvendo o levantamento de seções colunares, análise de fácies, paleocorrentes e de condições

diagenéticas, além de uma análise de proveniência sedimentar multi-indicadores (contagem de clastos, contagem modal e geocronologia U-Pb em zircão detrítico). Estes estudos de proveniência sedimentar, em especial aqueles utilizando multi-indicadores, são de extrema importância na análise da gênese e qualidade de reservatórios siliciclásticos. Neste sentido, a composição detrítica das areias pode afetar também a qualidade deste tipo de unidade com potencial para o estabelecimento de reservatórios de hidrocarbonetos, ao passo que é um fator controlador de processos diagenéticos envolvidos na redução e geração de porosidade em arenitos, fundamentais para a predição da qualidade de potenciais reservatórios de água, gás natural e hidrocarbonetos (Makino et al., 2007; Pettijohn et al., 2012). Estudos de proveniência sedimentar como proposto no presente trabalho, possuem relevância direta para a exploração de hidrocarbonetos, uma vez que a identificação da influência eventos tectônicos regionais na arquitetura deposicional de uma bacia sedimentar, como proposta neste estudo, pode auxiliar na modelagem de sistemas petrolíferos (Smyth et al., 2014). Ainda, a integração de dados isotópicos com análises sedimentológicas, nos termos aqui propostos, oferece potencial para avaliar processos diagenéticos que influenciam a qualidade de reservatórios onde o controle de processos sedimentares é crítico para a geração, migração e armazenamento de hidrocarbonetos (Smyth et al., 2014). Desta forma, esta pesquisa pode subsidiar na elaboração modelos de unidades geradoras e/ou reservatórios, não apenas no contexto das bacias brasileiras, mas também em sistemas análogos em margens continentais do Atlântico Sul. Além disso, como resultado, pretende-se obter uma visão ampla dos padrões de dispersão sedimentar e dos processos deposicionais e pós-deposicionais atuantes durante o Jurássico Superior e o Cretáceo Inferior na formação dos paleodesertos Botucatu e Twyfelfontein.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Os estudos sedimentológicos e de proveniência dos depósitos aluviais marginais da Formação Botucatu e sua correlação com a Formação Twyfelfontein na Namíbia forneceram importantes interpretações a cerca da dinâmica sobre a dinâmica sedimentar e paleogeográfica do paleoerg Botucatu durante o Cretáceo no sudoeste do Gondwana. A análise integrada de fácies sedimentares, paleocorrentes, minerais pesados e geocronologia U-Pb em zircões detríticos revelou que os sistemas aluviais atuaram como vias de transporte de sedimentos imaturos a partir de terrenos elevados adjacentes, como a Faixa Brasília (Brasil) e o Cinturão Damara (Namíbia), para o interior e/ou áreas marginais do deserto. A correlação entre as duas unidades demonstra que se tratavam de sistemas aluviais instaurados nas bordas das bacias do Paraná e Huab, com assinaturas distintas devido às suas áreas fonte associadas ao embasamento soerguido das bordas das bacias. Esses sistemas eram restritos e não constituíam um sistema aluvial contínuo conforme evidenciado por afloramentos pontuais e descontínuos da Formação Botucatu e do Membro Krone da Formação Twyfelfontein. Entende-se que esses registros foram formados por enchentes efêmeras e fluxos aluviais que erodiram as escarpas das bordas das bacias do Paraná e Huab. Esses sistemas, ativados durante períodos de elevada umidade em um clima predominantemente árido, depositavam sedimentos em zonas de transição entre planícies aluviais e campos de dunas, nos quais posteriormente eram retrabalhados por outros períodos de maior umidade e/ou pelo vento.

Os resultados aqui apresentados demonstram que os sistemas aluviais desempenharam um papel fundamental na no provimento de sedimentos para o paleoerg Botucatu, atuando como elo entre as áreas fonte elevadas e o interior do deserto. Os sistemas aluviais marginais preservam uma assinatura geocronológica próxima das áreas fonte (Cinturão Brasília e Damara). Ao comparar os depósitos aluviais e eólicos, observou-se que os sistemas aluviais marginais preservam uma assinatura geocronológica semelhante, com picos de idades de

zircão detrítico correlacionáveis. Portanto, a abordagem aplicada neste trabalho reforça a importância da análise integrada de fácies marginais para a compreensão da evolução de paleoergs, destacando como sistemas aluviais podem controlar a distribuição e maturidade textural de sedimentos em ambientes desérticos. Os dados de proveniência e análise diagenética aqui obtidos indicam que esses sistemas fluviais podem ter sido progressivamente desativados, de modo que as sucessões das formações Botucatu e Twyfelfontein foram progressivamente substituídos por depósitos de arenitos eólicos. Embora registros pontuais de depósitos fluviais basais atestem a existência desses sistemas iniciais, sua escassa preservação pode refletir retrabalhamento eólico intenso e soterramento/substituição desses depósitos por dunas. Essa hipótese, alinhada aos modelos de aridificação crescente no interior do Gondwana Ocidental, destaca a necessidade de investigações futuras sobre a evolução inicial do paleodeserto Botucatu, particularmente quanto aos controles na preservação diferencial desses sistemas marginais.

Este trabalho não apenas aprimora a compreensão das formações Botucatu e Twyfelfontein, como também oferece um modelo análogo para paleoergs antigos e modernos, destacando o papel fundamental dos sistemas aluviais marginais na dinâmica sedimentar de desertos. Por fim, os resultados ilustram como variações climáticas em um contexto de aridificação progressiva podem gerar sistemas desconectados, marcando a transição entre domínios fluviais e eólicos antes da ruptura final do Gondwana.

Referências Bibliográficas

- 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. <https://doi.org/10.1002/9781444347166.ch6>
- Almeida, F. D. (1953). Botucatu, a triassic desert of South America. In XIX International Geological Congress, Algiers 1952 (Vol. 7, pp. 9-24).
- Almeida, F. D., & Melo, M. D. (1981). A Bacia do Paraná e o vulcanismo mesozóico. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala, 1(500.000)*, 46-81.
- Assine, M. L., Piranha, J. M., Carneiro, C. D. R. (2004). Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, Editora Beca, São Paulo.
- Bahlburg, H., Vervoort, J. D., Du Frane, S. A., Bock, B., Augustsson, C., & Reimann, C. (2009). Timing of crust formation and recycling in accretionary orogens: Insights learned from the western margin of South America. *Earth-Science Reviews*, 97(1-4), 215-241. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.006>
- Bertolini, G., Marques, J. C., Hartley, A. J., Da-Rosa, A. A., Scherer, C. M., Basei, M. A., & Frantz, J. C. (2020). Controls on Early Cretaceous desert sediment provenance in south-west Gondwana, Botucatu Formation (Brazil and Uruguay). *Sedimentology*, 67(5), 2672-2690. <https://doi.org/10.1111/sed.12715>
- Bertolini, G., Hartley, A. J., Marques, J. C., Healy, D., & Frantz, J. C. (2021a). The effects of basaltic lava flows on the petrophysical properties and diagenesis of interbedded aeolian sandstones: an example from the Cretaceous Paraná Basin, Brazil. *Petroleum Geoscience*, 27(2), petgeo2020-036. <https://doi.org/10.1144/petgeo2020-036>
- Bertolini, G., Marques, J. C., Hartley, A. J., Basei, M. A. S., Frantz, J. C., & Santos, P. R. D. (2021b). Determining sediment provenance history in a Gondwanan erg: Botucatu formation, Northern Paraná Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, 417, 105883. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2021.105883>
- Bertolini, G., dos Santos Scherer, C. M., Marques, J., dos Reis, A. D., Hartley, A., Jerram, D., ... & Paim, J. (2024). Atlantic will tear us apart: sand provenance correlation of Early Cretaceous aeolian strata from the conjugate margins of Africa and South America. <https://doi.org/10.31223/X5RM5B>
- Bigarella, J. J., & Salamuni, R. (1961). Early Mesozoic wind patterns as suggested by dune bedding in the Botucatu Sandstone of Brazil and Uruguay. *Geological Society of America Bulletin*, 72(7), 1089-1105. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[1089:EMWPAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[1089:EMWPAS]2.0.CO;2)
- Bortoluzzi, C. A. – (1971) - Contribuição a geologia da região de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade Federal
- Campanha, G. A. D. C., Faleiros, F. M., Cawood, P. A., Cabrita, D. I. G., Ribeiro, B. V., & Basei, M. A. S. (2019). The Tonian Embu complex in the Ribeira belt (Brazil): revision, depositional age and setting in Rodinia and West Gondwana. *Precambrian Research*, 320, 31-45. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.10.010>
- Christofolletti, B., Warren, L. V., Varejão, F. G., Simões, M. G., Gómez-Peral, L. E., Lana, C.,

- ... & Assine, M. L. (2024). Rising mollusk bivalves from the ashes: Geologic, biostratigraphic and evolutionary implications from tuff data in the Permian Corumbataí Formation, Paraná Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 134, 104750. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104750>
- Cichowolski, M., Uriz, N. J., Alfaro, M. B., & Inchausti, J. G. (2019). Ascocerid cephalopods from the Hirnantian?–Llandovery stages of the southern Paraná Basin (Paraguay, South America): first record from high paleolatitudes. *Journal of Paleontology*, 93(1), 37-47. <https://doi.org/10.1017/jpa.2018.59>
- Coimbra, A. M., Fernandes, L. A., Moraes, M. C. D., & Melo, M. S. D. (1992). Métodos de estudo de litologias e paleocorrentes de cascalhos em terraços do baixo Ribeira do Iguape (SP). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 64(3), 253-67.
- 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*, 10(4), 1421-1435. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.11.002>
- Dalrymple, R. W., & James, N. P. (Eds.). (2010). Facies models 4. Geological association of Canada.
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). *An introduction to the rock-forming minerals*. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland.
- Dickinson, W. R. (1970). Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. *Journal of Sedimentary Research*, 40(2), 695-707. <https://doi.org/10.1306/74D72018-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Dickinson, W. R. (1985). Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In *Provenance of arenites* (pp. 333-361). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2809-6_15
- Dickinson, W. R. (2008). Conglomerate clast counts in Oligocene-Miocene strata north from the Catalina Core Complex to the Gila River Valley, southeastern Arizona.
- Fambrini, G. L., César, A. S. F., da Silva Filho, W. F., Teixeira, G., Sayeg, H. S., & Machado, R. (1998). Análise estratigráfica de fácies, proveniência e paleocorrentes do grupo Camaquã (transição Proterozóico-Fanerozóico) na Mina Uruguai e suas implicações na evolução tectono-sedimentar da Bacia do Camaquã, RS. *Boletim IG-USP. Série Científica*, 29, 39-69. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-8986.v29i0p39-69>
- Fambrini, G. L., Almeida, R. P. D., Janikian, L., & Riccomini, C. (2018). Proveniência e paleocorrentes de conglomerados e arenitos do Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) no Vale do Piquiri, Sub-bacia Camaquã Oriental, RS: implicações tectônicas. *Geologia USP. Série Científica*, 18(1), 149-183. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-433>
- Famelli, N., Lima, E. F., & Carmo, I. D. O. (2021). Lithostratigraphy of the Serra Geral Formation in the northern portion of the Paraná-Etendeka Igneous Province: A tool for tracking Early Cretaceous paleoenvironmental changes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 410, 107152. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107152>
- Faure, K., & Cole, D. (1999). Geochemical evidence for lacustrine microbial blooms in the vast Permian Main Karoo, Paraná, Falkland Islands and Huab basins of southwestern Gondwana. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 152(3-4), 189-213. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00062-0)
- Fedo, C. M., Sircombe, K. N., & Rainbird, R. H. (2003). Detrital zircon analysis of the

- sedimentary record. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 53(1), 277-303.
<https://doi.org/10.2113/0530277>
- 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.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<0179:FEFRDF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0179:FEFRDF>2.3.CO;2)
- Fernandes, M. A., Ghilardi, A. M., & de Souza Carvalho, I. (2014). Paleodeserto Botucatu: inferências ambientais e climáticas com base na ocorrência de icnofósseis. *Paleontologia: Cenários de Vida*, 5, 71-80
- Fluteau, F., Ramstein, G., Besse, J., Guiraud, R., & Masse, J. P. (2007). Impacts of palaeogeography and sea level changes on Mid-Cretaceous climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247(3-4), 357-381.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.11.016>
- Folk, R. L. (1968). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill publishing company.
- Gazzi, P. (1966). Le arenarie del flysch sopracretaceo dell'Appennino modenese; correlazioni con il flysch di Monghidoro. *Mineralogica et Petrographica Acta*, 12, 69-97.
- Gesicki, A. L. D. (2007). Evolução diagenética das formações Pirambóia e Botucatu (sistema aquífero Guarani) no Estado de São Paulo (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Gray, D. R., Foster, D. A., Meert, J. G., Goscombe, B. D., Armstrong, R., Trouw, R. A. J., & Passchier, C. W. (2008). A Damara orogen perspective on the assembly of southwestern Gondwana. <https://doi.org/10.1144/SP294.14>
- Gressly, A., (1838). Observations géologiques sur le Jura soleurois: Nouveaux mémoires de la Société Helvetique des Sciences Naturelles, Neuchâtel, v. 2, 349 p., 14 pl.
- Grove, C. (2014). Direct and indirect effects of flood basalt volcanism on reservoir quality sandstone (Doctoral dissertation, Durham University).
- Houghton, P. D. W., Todd, S. P., Morton, A. C. (1991). Sedimentary provenance studies. Geological Society, London, Special Publications, 57(1), 1-11.
- Holzförster, F., Stollhofen, H., & Stanistreet, I. G. (1999). Lithostratigraphy and depositional environments in the Waterberg-Erongo area, central Namibia, and correlation with the main Karoo Basin, South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 29(1), 105-123.
[https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(99\)00083-4](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(99)00083-4)
- Horsthemke, E., Ledendecker, S., & Porada, H. (1990). Depositional environments and stratigraphic correlation of the Karoo Sequence in northwestern Damaraland. *Communications of the Geological Survey of Namibia*, 6, 63-73.
- Horsthemke, E., (1992). Fazies der Karoo-sedimente in der Huab region, Damaraland, NW-Namibia. *Geotitinger Arb. Geol. Palont* 55, 102.
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1993.tb01759.x>
- Hubert, J. F. (1962). A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstones. *Journal of Sedimentary Research*, 32(3), 440-450.
<https://doi.org/10.1306/74D70CE5-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- 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(1-2), 47-69.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>
- Jaffey, A. H., Flynn, K. F., Glendenin, L. E., Bentley, W. T., & Essling, A. M. (1971). Precision measurement of half-lives and specific activities of U 235 and U 238. *Physical review C*, 4(5), 1889. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.4.1889>
- Jerram, D., Mountney, N., Holzförster, F., & Stollhofen, H. (1999). Internal stratigraphic relationships in the Etendeka Group in the Huab Basin, NW Namibia: understanding the onset of flood volcanism. *Journal of Geodynamics*, 28(4-5), 393-418.
[https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(99\)00018-6](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(99)00018-6)
- Jerram, D. A., Mountney, N., Howell, J., & Stollhofen, H. (2000). The Fossilised Desert: recent developments in our understanding of the Lower Cretaceous deposits in the Huab Basin, NW Namibia. *Communications of the Geological Survey of Namibia*, 12, 269-278.
- Lancaster, N. (2013). *Geomorphology of desert dunes*. Routledge.
- Ledendecker, S. (1992). Stratigraphie der Karoosedimente der Huabregion (NW-Namibia) und deren Korrelation mit zeitäquivalenten Sedimenten des Paranábeckens (Südamerika) und des Groben Karoobeckens (Südafrika) unter besonderer Berücksichtigung der überregionalen geodynamischen und klimatischen Entwicklung Westgondwanas (No. 54). Im Selbstverlag der Geologischen Institute der Georg-August-Universität Göttingen.
- Makino, F. T. G., Moura, C. A. V., & Chemale Jr, F. (2007). Estudo de proveniência sedimentar em arenitos da formação Monte Alegre, Região de MOnTe Alegre (PA). *PDPETRO, Campinas*, 4, 1-6.
- Mange, M. A., & Maurer, H. (2012). *Heavy minerals in colour*. Springer Science & Business Media.
- McGee, B., Collins, A. S., Trindade, R. I., & Payne, J. (2015). Age and provenance of the Cryogenian to Cambrian passive margin to foreland basin sequence of the northern Paraguay Belt, Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, 127(1–2), 76–86.
<https://doi.org/10.1130/B30842.1>
- Miall, A. D. (1974). Paleocurrent analysis of alluvial sediments: a discussion of directional variance and vector magnitude. *Journal of Sedimentary Research*, 44(4).
<https://doi.org/10.1306/212F6C6C-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Miall, A. D. (1977). Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary.
- Miall, A. D. (1996). *The geology of fluvial sediments*.
- Miall, A. D. (2013). *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. Springer.
- Middleton, G. V. (1978). Facies. *Encyclopedia of sedimentology*: Stroudsburg, pennsylvania, Hutchinson & Ross, 323-325.
- Milani, E. J., Ramos, V. A. (1998). Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(4), 473-484.
- Milani, E. J., & SA, P. B. (2004). Cosiderações sobre a Estratigrafia do Fanerozóico no

- Brasil. *Reunião Aberta da Comissão Brasileira de Estratigrafia*, 1.
- Milani, E. J., Melo, J. H. G., Souza, P. A., Fernandes, L. A., França, A. B. (2007). Bacia do Paraná: Boletim de Geociências da PETROBRAS, v. 15.
- Milani, E. J., & De Wit, M. J. (2008). Correlations between the classic Paraná and Cape–Karoo sequences of South America and southern Africa and their basin infills flanking the Gondwanides: du Toit revisited. *Geological Society, London, Special Publications*, 294(1), 319-342. <https://doi.org/10.1144/SP294.17>
- Miyazaki, M. R., & Basilici, G. (2015). *Interação eólica-fluvial na Formação Pirambóia (Permiano-Triássico, oeste de Rio Claro, SP)* (Doctoral dissertation, [sn]).
- Moraes, L. C., Seer, H. J. (2018). Pillow lavas and fluvio-lacustrine deposits in the northeast of Paraná Continental Magmatic Province, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 355, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.03.024>
- Morton, A. C. (1985). Heavy minerals in provenance studies. In *Provenance of arenites* (pp. 249-277). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2809-6_12
- Morton, A. C., & Hallsworth, C. (1994). Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 90(3-4), 241-256. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(94\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0037-0738(94)90041-8)
- Mountney, N., Howell, J., Flint, S., & Jerram, D. (1998). Aeolian and alluvial deposition within the Mesozoic Etjo Sandstone Formation, northwest Namibia. *Journal of African Earth Sciences*, 27(2), 175-192. [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(98\)00056-6](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(98)00056-6)
- Mountney, N., Howell, J., Flint, S., & Jerram, D. (1999). Climate, sediment supply and tectonics as controls on the deposition and preservation of the aeolian-fluvial Etjo Sandstone Formation, Namibia. *Journal of the Geological Society*, 156(4), 771-777. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.156.4.077>
- Mountney, & Howell. (2000). Aeolian architecture, bedform climbing and preservation space in the Cretaceous Etjo Formation, NW Namibia. *Sedimentology*, 47(4), 825-849. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00318.x>
- Navarro, M. S., Tonetto, E. M., & Oliveira, E. P. (2017). Peixe zircon: new Brazilian reference material for U-Pb geochronology by LA-SF-ICP-MS. Goldschmidt, 2017. Abstract.
- Nichols, G. J. (1987). Syntectonic alluvial fan sedimentation, southern Pyrenees. *Geological Magazine*, 124(2), 121-133. <https://doi.org/10.1017/S0016756800015934>
- Oelofsen, B., & Araujo, D. C. (1983). Palaeological implications of the distribution of mesosaurid reptiles in the Permian Irati sea (Paraná Basin), South America. *Revista Brasileira de Geociências*, 13(1), 1-6.
- Peate, D. W. (1997). The parana-etendeka province. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 100, 217-246.
- Peixoto, B., Sedorko, D., de Barros, G. E., Francischini, H., Ghilardi, R. P., & Fernandes, M. A. (2025). Pulses of life: Wet events in Botucatu Paleodesert evidenced by trace fossils analysis (earliest Cretaceous, Paraná Basin, Brazil). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 658, 112608. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2024.112608>
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., & Siever, R. (2012). *Sand and sandstone*. Springer Science &

Business Media.

- Pires, E. F., Guerra-Sommer, M., dos Santos Scherer, C. M., dos Santos, A. R., & Cardoso, E. (2011). Early Cretaceous coniferous woods from a paleoerg (Paraná Basin, Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, 32(1), 96-109. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.04.001>
- Piuzana, D., Pimentel, M. M., Fuck, R. A., & Armstrong, R. (2003). SHRIMP U–Pb and Sm–Nd data for the Araxá Group and associated magmatic rocks: constraints for the age of sedimentation and geodynamic context of the southern Brasília Belt, central Brazil. *Precambrian Research*, 125(1-2), 139-160. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(03\)00107-4](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(03)00107-4)
- Porchetti, S. D. O., & Wagensommer, A. (2015). A vertebrate trackway from the Twyfelfontein formation (Lower Cretaceous), Damaraland, Namibia. *Paläontologische Zeitschrift*, 89, 807- 814. <https://doi.org/10.1007/s12542-015-0264-6>
- Ramos, V. A., Jordan, T. E., Allmendinger, R. W., Mpodozis, C., Kay, S. M., Cortés, J. M., & Palma, M. (1986). Paleozoic terranes of the central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics*, 5(6), 855-880. <https://doi.org/10.1029/TC005i006p00855>
- Reading, H. G. (2001). Clastic facies models, a personal perspective. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 48(2), 101-115.
- Reis, A. D., dos Santos Scherer, C. M., do Amarante, F. B., Rossetti, M. D. M. M., Kifumbi, C., de Souza, E. G., ... & Owen, A. (2019). Sedimentology of the proximal portion of a large-scale, Upper Jurassic fluvial-aeolian system in Paraná Basin, southwestern Gondwana. *Journal of South American Earth Sciences*, 95, 102248. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102248>
- Remus, M. V. D., Souza, R. S., Cupertino, J. A., De Ros, L. F., Dani, N., & Vignol-Lelarge, M. L. (2008). Proveniência sedimentar: métodos e técnicas analíticas aplicadas. *Brazilian Journal of Geology*, 38(2), 166-185.
- 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, 44-57. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-0087-5>
- Salomon, E., Koehn, D., Passchier, C., Chung, P., Häger, T., Salvona, A., & Davis, J. (2016). Deformation and fluid flow in the Huab Basin and Etendeka Plateau, NW Namibia. *Journal of Structural Geology*, 88, 46-62. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.05.001>
- Scherer, C. M. S. (2000). Eolian dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in southernmost Brazil: morphology and origin. *Sedimentary Geology*, 137(1-2), 63-84. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00135-4](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00135-4)
- Scherer, C. M., Lavina, E. L. (2006). Stratigraphic evolution of a fluvial–eolian succession: the example of the Upper Jurassic—Lower Cretaceous Guarú and Botucatu formations, Paraná Basin, Southernmost Brazil. *Gondwana Research*, 9(4), 475-484. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2005.12.002>
- Scherer, C. M., & Goldberg, K. (2007). Palaeowind patterns during the latest Jurassic–earliest Cretaceous in Gondwana: evidence from aeolian cross-strata of the Botucatu

- Formation, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 250(1-4), 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.02.018>
- Scherer, C. M., Reis, A. D., Horn, B. L., Bertolini, G., Lavina, E. L., Kifumbi, C., & Aguilar, C. G. (2023). The stratigraphic puzzle of the permo-mesozoic southwestern Gondwana: The Paraná Basin record in geotectonic and palaeoclimatic context. *Earth-Science Reviews*, 240, 104397. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104397>
- Seer, H. J., & Moraes, L. C. (2017). Geologia regional do Triângulo Mineiro. *Belo Horizonte: CODEMIG/UFMG*.
- Selley, R. C. (1982). An introduction to sedimentology. <https://doi.org/10.1017/S0016756800042953>
- Smyth, H. R., Morton, A., Richardson, N., & Scott, R. A. (2014). Sediment provenance studies in hydrocarbon exploration and production: an introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 386(1), 1-6. <https://doi.org/10.1144/SP386>
- Soares, P. C. (1975). Divisão estratigráfica do Mesozóico no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 5(4), 229-251.
- Spencer, C. J., & Kirkland, C. L. (2016). Visualizing the sedimentary response through the orogenic cycle: A multidimensional scaling approach. *Lithosphere*, 8(1), 29-37. <https://doi.org/10.1130/L479.1>
- Stanistreet, I. G., & Stollhofen, H. (1999). Onshore equivalents of the main Kudu gas reservoir in Namibia. *Geological Society, London, Special Publications*, 153(1), 345-365. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.153.01.21>
- Stollhofen, H., Stanistreet, I. G., Rohn, R., Holzförster, F., & Wanke, A. (2000). AAPG Studies in Geology# 46, Chapter 6: The Gai-As Lake System, Northern Namibia and Brazil.
- Suguio, K., & Coimbra, A. M. (1972). Madeira fóssil silicificada na Formação Botucatu. *Ciência e Cultura*, 24(11), 1049-1055.
- Vail, P. R., Mitchum Jr, R. M., Thompson III, S. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 3. Relative changes of sea level from Coastal Onlap: section 2. Application of seismic reflection Configuration to Stratigraphic Interpretation. In: Payton, C. E. (1977). *Seismic stratigraphy Applications to hydrocarbon exploration*. <https://doi.org/10.1306/M26490C5>
- Veevers, J. J. (1990). Tectonic-climatic supercycle in the billion-year plate-tectonic eon: Permian Pangean icehouse alternates with Cretaceous dispersed-continents greenhouse. *Sedimentary Geology*, 68(1-2), 1-16. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(90\)90116-B](https://doi.org/10.1016/0037-0738(90)90116-B)
- Vermeesch, P. (2012). On the visualisation of detrital age distributions. *Chemical Geology*, 312, 190-194. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.04.021>
- Vermeesch, P. (2013). Multi-sample comparison of detrital age distributions. *Chemical Geology*, 341, 140-146. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.01.010>
- Vermeesch, P., Resentini, A., & Garzanti, E. (2016). An R package for statistical provenance analysis. *Sedimentary Geology*, 336, 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.01.009>
- Vermeesch, P. (2019). Exploratory analysis of provenance data using R and the provenance package. *Minerals*, 9(3), 193. <https://doi.org/10.3390/min9030193>