



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



IGOR MATIAS DOS ANJOS

**ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA DE DADOS U-PB EM ZIRCÃO
DETRITICO NA BACIA ESPINHAÇO: APLICAÇÕES EM PROVENIÊNCIA E
CORRELAÇÃO REGIONAL**

OURO PRETO
2026

Igor Matias dos Anjos

ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA DE DADOS U-PB EM ZIRCÃO
DETRITICO NA BACIA ESPINHAÇO: APLICAÇÕES EM PROVENIÊNCIA E
CORRELAÇÃO REGIONAL

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Alice Fernanda de Oliveira Costa

OURO PRETO
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A599a Anjos, Igor Matias dos.

Análise estatística multivariada de dados U-PB em zircão detrítico na bacia Espinhaço [manuscrito]: aplicações em proveniência e correlação regional. / Igor Matias dos Anjos. - 2026.

66 f.: il.: gráf., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Alice Fernanda de Oliveira Costa.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geologia estratigráfica. 2. Bacias sedimentares. 3. Geocronologia. I. Costa, Alice Fernanda de Oliveira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 551.7:550.93

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Igor Matias dos Anjos

Análise Estatística Multivariada de dados U-Pb em zircão detrítico na bacia Espinhaço: aplicações em proveniência e correlação regional

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo

Aprovada em 05 de Março de 2026

Membros da banca

Dra. Alice Fernanda de Oliveira Costa - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dra. Alice Fernanda de Oliveira Costa - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dra. Maria Eugênia Silva de Souza - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Samuel Moreira Bersan - (Universidade Estadual do Rio de Janeiro)

Alice Fernanda de Oliveira Costa, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Alice Fernanda de Oliveira Costa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/04/2026, às 08:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1086716** e o código CRC **276CE05D**.

RESUMO

A Bacia do Espinhaço, um registro proterozoico do Cráton do São Francisco, preserva sucessões sedimentares associadas à evolução tectonoestratigráfica intracratônica. O trabalho apresenta uma compilação e a análise estatística de dados geocronológicos detríticos U–Pb com o objetivo de investigar os padrões de proveniência sedimentar e sua correlação estratigráfica. Foram aplicados testes estatísticos de Diagramas de Densidade de Probabilidade (PDP), Kolmogorov–Smirnov (K–S) e Escalonamento Multidimensional (MDS), permitindo avaliar similaridades e diferenças entre as unidades estratigráficas. Os resultados apontam ausência de homogeneização sedimentar regional, evidenciando compartimentação tectonoestrutural e persistência de assinaturas de proveniência distintas entre diferentes setores da bacia. A Megassequência Inferior apresenta espectros dominados por idades paleoproterozoicas (~2,1 Ga), associadas às províncias crustais do ciclo Riáciano, com contribuições arqueanas subordinadas. Em contraste, a Megassequência Superior exibe padrão polimodal e maior dispersão de idades, incluindo populações calimianas (~1,5 Ga) e enriquecimento relativo de grãos arqueanos, refletindo ampliação das áreas-fonte, reciclagem sedimentar e reorganização tectônica regional. A persistência de assinaturas geocronológicas distintas, mesmo durante estágios de subsidência regional, indica que estruturas herdadas continuaram a controlar o aporte sedimentar. Evidências recentes sugerem que a transição para a sucessão superior ocorreu de forma gradual, com atividade extensional persistente e deposição sintectônica em compartimentos estruturais ativos. Esses resultados reforçam o caráter policíclico da evolução da Bacia do Espinhaço e demonstram que a interpretação da proveniência sedimentar deve considerar a reorganização tectonoestratigráfica ao longo do tempo.

Palavras-chave: Bacia do Espinhaço. Proveniência sedimentar. Zircão detrítico. Geocronologia U-Pb. Evolução tectonoestratigráfica.

ABSTRACT

The Espinhaço Basin represents an important Proterozoic record of the São Francisco Craton, preserving sedimentary successions associated with intracratonic tectonostratigraphic evolution. This study presents a compilation and analysis of detrital U–Pb geochronological data aimed at investigating sediment provenance patterns and their implications for regional stratigraphic correlation. Statistical approaches including Probability Density Plots (PDP), Kolmogorov–Smirnov (K–S) tests, and Multidimensional Scaling (MDS) were applied to evaluate similarities and differences among stratigraphic units. The results indicate the absence of regional sedimentary homogenization, revealing tectonostructural compartmentalization and the persistence of distinct provenance signatures across different sectors of the basin. The Lower Megasequence is dominated by Paleoproterozoic ages (~2.1 Ga), related to crustal provinces formed during the Rhyacian orogenic cycle, with subordinate Archean contributions. In contrast, the Upper Megasequence exhibits a polymodal age distribution and greater dispersion, including Calymmian populations (~1.5 Ga) and relative enrichment of Archean grains, reflecting expansion of source areas, sediment recycling, and regional tectonic reorganization. The persistence of distinct geochronological signatures, even during stages of regional subsidence, indicates that inherited structures continued to control sediment supply. Recent evidence suggests that the transition to the upper succession occurred gradually, with persistent extensional activity and syntectonic deposition within structurally active compartments. These findings reinforce the polycyclic evolution of the Espinhaço Basin and demonstrate that sediment provenance interpretations must consider tectonostratigraphic reorganization through time.

Keywords: Espinhaço Basin; sediment provenance; detrital zircon; U–Pb geochronology; tectonostratigraphic evolution.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Cráton São Francisco com a localização das áreas de estudo destacadas em vermelho, SE: Espinhaço Meridional, CE: Espinhaço Central, NE: Espinhaço Setentrional e CD: Chapada Diamantina. | 12 |
| Figura 2 - Gráfico esquemático do Diagrama de Densidade de Probabilidade (PDP)..... | 18 |
| Figura 3 - Modelo esquemático do gráfico de Funções de Distribuição Cumulativa (CDF)... | 19 |
| Figura 4 - Modelo Esquemático do gráfico de Escalonamento Multidimensional. | 20 |
| Figura 5 - Configuração geológica do Espinhaço no Cráton São Francisco, que é bordado por cinturões de dobras e empurrões Brasileiros. A cobertura relacionada à chamada bacia do Espinhaço ocorre nos seguintes domínios fisiográficos: Chapada Diamantina (CD), Espinhaço Meridional (SE), Espinhaço Central (CE), Espinhaço Setentrional (NE)..... | 22 |
| Figura 6 - Coluna Estratigráfica do Espinhaço Meridional. | 25 |
| Figura 7 - Coluna estratigráfica do domínio setentrional. | 28 |
| Figura 8 - Gráfico PDP da Razão $207\text{Pb}/206\text{Pb}$ da Megassequência Inferior do Espinhaço Meridional. | 29 |
| Figura 9 - Gráfico da Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) do Espinhaço Inferior no Domínio Meridional. | 31 |
| Figura 10 - Gráfico PDP da Razão $207\text{Pb}/206\text{Pb}$ da Megassequência Superior do Espinhaço Meridional. | 32 |
| Figura 11 - Gráfico da Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) com mais similaridade do Espinhaço Superior no Domínio Meridional..... | 33 |
| Figura 12 - Gráfico da Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) com mais dissimilaridade do Espinhaço Superior no Domínio Meridional..... | 34 |
| Figura 13 - Gráfico de Escalonamento Multidimensional do Espinhaço Meridional. | 35 |
| Figura 14 - Gráfico PDP da Razão $207\text{Pb}/206\text{Pb}$ da Megassequência Inferior do Espinhaço Setentrional..... | 37 |
| Figura 15 - Gráfico da Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) do Espinhaço Inferior no Domínio Setentrional..... | 38 |
| Figura 16 - Gráfico PDP da Razão $207\text{Pb}/206\text{Pb}$ da Megassequência Inferior do Espinhaço Central. | 40 |
| Figura 17 - Gráfico da Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) do Espinhaço Inferior no Domínio Central. | 41 |
| Figura 18 - Gráfico PDP da Razão $207\text{Pb}/206\text{Pb}$ da Megassequência média do Espinhaço Central | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 19 - Gráfico da Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) das formações Panelas e Riacho Seco do Espinhaço Inferior no Domínio Central. | 43 |
| Figura 20 - Gráfico da Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) das Formações Riacho Seco e Vereda da Cruz do Espinhaço Inferior no Domínio Central. | 44 |
| Figura 21 - Gráfico da Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) das Formações Panelas e Vereda da Cruz do Espinhaço Inferior no Domínio Central. | 44 |
| Figura 22 - Gráfico PDP da Razão $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ da Megassequência Superior do Espinhaço Central. | 45 |
| Figura 23 - Gráfico de Escalonamento Multidimensional do Espinhaço Central. | 46 |
| Figura 24 - Gráfico de Escalonamento Multidimensional da Bacia do Espinhaço. | 49 |
| Figura 25 - Gráfico PDP da Razão $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ do Espinhaço Inferior..... | 51 |
| Figura 26 - Gráfico PDP da Razão $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ do Espinhaço Superior. | 53 |
| Figura 27 - Gráfico de Escalonamento Multidimensional da Bacia do Espinhaço. | 55 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Estatística D e p-valor entre as formações do Espinhaço Superior no Domínio Meridional. | 33 |
| Tabela 2 - Teste K-S entre as unidades do Supergrupo Espinhaço. | 47 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1 APRESENTAÇÃO..... | 10 |
| 1.2 LOCALIZAÇÃO..... | 11 |
| 1.3 OBJETIVOS..... | 12 |
| 1.4 JUSTIFICATIVA..... | 13 |
| 1.5 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 13 |
| 1.5.1 Levantamentos bibliográficos | 13 |
| 1.5.2 Banco de dados | 14 |
| 1.5.3 Métodos e amostragem | 16 |
| 1.5.4 Métodos de datação | 17 |
| 1.5.5 Análise estatísticas e elaboração de gráficos de probabilidade | 17 |
| 2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL | 21 |
| 2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO | 21 |
| 2.2 QUADRO ESTRATIGRÁFICO | 22 |
| 2.2.1 Unidades do embasamento | 22 |
| 2.2.1.1 Embasamento Espinhaço Setentrional | 23 |
| 2.2.1.2 Embasamento Espinhaço Central | 23 |
| 2.2.1.3 Embasamento do Espinhaço Meridional | 23 |
| 2.2.2 Supergrupo Espinhaço | 23 |
| 2.2.2.1 Domínio Meridional | 24 |
| 2.2.2.2 Domínio Central | 26 |
| 2.2.2.3 Domínio Setentrional | 27 |
| 3 RESULTADOS | 29 |
| 3.1 ESPINHAÇO MERIDIONAL | 29 |
| 3.1.1 Megassequência inferior (estateriana) | 29 |
| 3.1.2 Megassequência superior (esteniano-toniano) | 31 |
| 3.1.3 Síntese estatística do domínio meridional (mds) | 35 |
| 3.2 ESPINHAÇO SETENTRIONAL | 36 |
| 3.2.1 Megassequência inferior (estateriana) | 36 |
| 3.2.2 Megassequência média (calimiana) | 38 |
| 3.2.3 Megassequência superior (esteniana-toniano) | 38 |
| 3.3 ESPINHAÇO CENTRAL | 39 |

| | |
|--|----|
| 3.3.1 Megassequência inferior (estateriana) | 39 |
| 3.3.2 Megassequência média (calimiano) | 41 |
| 3.3.3 Megassequência superior (esteniano-toniano) | 45 |
| 3.3.4 Síntese estatística do domínio central (mds) | 45 |
| 4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 47 |
| 4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA PROVENIÊNCIA: HETEROGENEIDADE E COMPARTIMENTAÇÃO DA BACIA | 47 |
| 4.2 ESPECTROS DE IDADES U-Pb E IMPLICAÇÕES PARA A PROVENIÊNCIA DO SUPERGRUPO ESPINHAÇO | 50 |
| 4.3 ESTÁGIOS DE DESENVOLVIMENTO DA BACIA E IMPLICAÇÕES PARA A CORRELAÇÃO ESTRATIGRÁFICA | 55 |
| 5 Conclusão | 58 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 60 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O Supergrupo Espinhaço constitui uma das mais extensas e importantes sucessões sedimentares proterozóicas do Brasil, aflorando por mais de 1000 km desde Minas Gerais até a Bahia, sobre o Cráton São Francisco e faixa Araçuaí. Essa sucessão siliciclástica registra parte significativa da evolução tectônica intracratônica do Paleocontinente São Francisco-Congo, desde os eventos relacionados à fragmentação do supercontinente Columbia até os processos que culminaram na formação do Rodínia (Chemale *et al.*, 2012; Danderfer *et al.*, 2015; Guadagnin *et al.*, 2015).

O entendimento sobre a evolução desta bacia sofreu importantes revisões nas últimas décadas. Modelos iniciais interpretavam o Supergrupo Espinhaço como o registro de um único e contínuo evento de bacia do tipo rifte-sag (Martins-Neto 1998). No entanto, dados estratigráficos, estruturais e geocronológicos demonstraram que se trata de um sistema polifásico e descontínuo, composto por pelo menos três megassequências deposicionais: inferior (Estateriano), média (Calimiana) e superior (Esteniano-Toniano), separadas por hiatus deposicionais (Danderfer *et al.* 2009, Chemale *et al.* 2012, Santos *et al.* 2013, Danderfer *et al.* 2015, Costa *et al.* 2017).

Apesar dos avanços na definição do arcabouço cronoestratigráfico, os dados geocronológicos disponíveis – especialmente aqueles obtidos por U-Pb em zircão detrítico – encontram-se dispersos em diferentes publicações, frequentemente restritos a domínios específicos da bacia. A ausência de uma compilação padronizada e de uma análise estatística integrada limita comparações regionais sistemáticas e dificulta a avaliação quantitativa das mudanças nas áreas-fonte ao longo do tempo.

Nesse contexto, emerge a seguinte questão científica: as diferentes megassequências do Supergrupo Espinhaço apresentam assinaturas estatísticas de proveniência distintas, compatíveis com reorganizações tectônicas regionais ao longo do Proterozoico?

Parte-se da hipótese de que as variações nas distribuições de idades U-Pb em zircão detrítico refletem mudanças temporais nas áreas-fonte, associadas a eventos tectônicos que controlaram a evolução paleogeográfica do paleocontinente São Francisco.

Diante do exposto, o presente trabalho propõe compilar e analisar estatisticamente os dados geocronológicos U-Pb em zircão detrítico disponíveis para o Supergrupo Espinhaço, com o objetivo de avaliar padrões de proveniência sedimentar e testar correlações estratigráficas

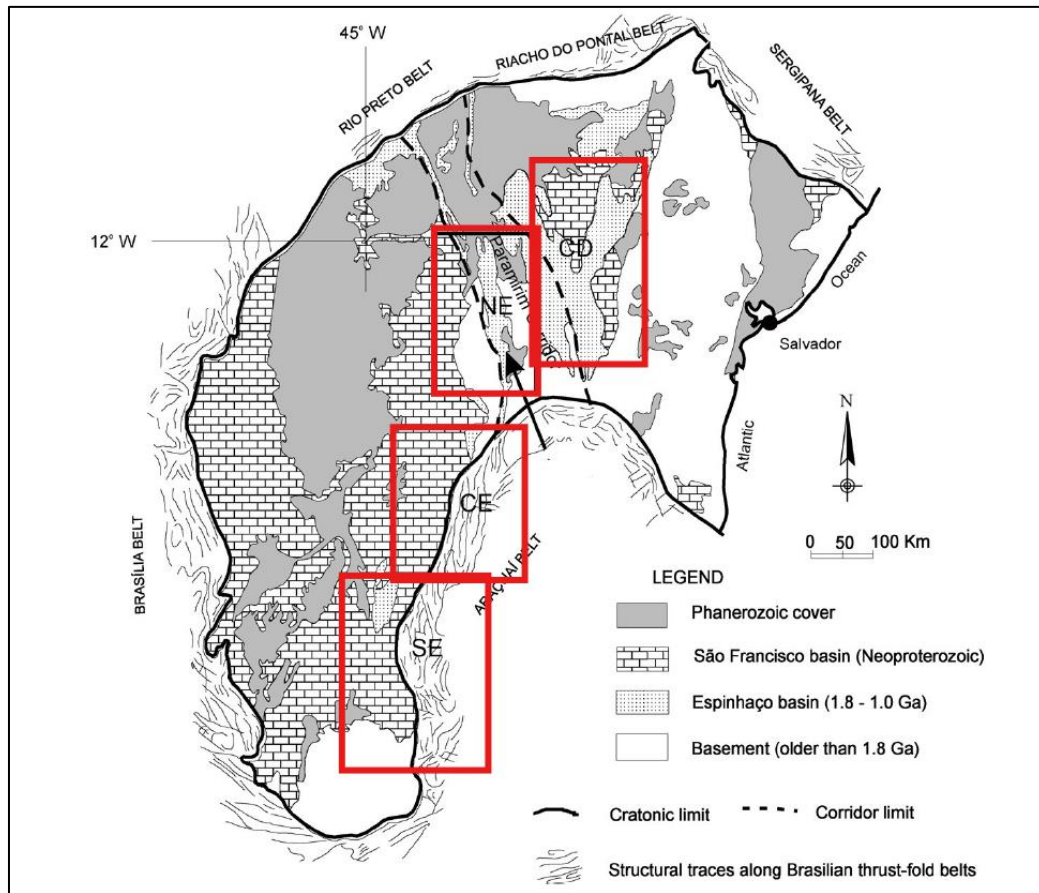
entre seus diferentes domínios. A integração desses dados permitirá refinar modelos paleogeográficos e contribuir para a compreensão da evolução tectono-sedimentar regional durante o Proterozoico.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo abrange a serra do Espinhaço, uma das mais proeminentes feições fisiográficas do leste brasileiro. Esta cordilheira se estende por mais de 1000 km em uma orientação geral Norte-Sul, desde o centro-sul de Minas Gerais até o centro-norte da Bahia. Geologicamente, ela abriga os depósitos do Supergrupo Espinhaço, que ocorrem sobre o Cráton São Francisco e a faixa Araçuaí.

Fisiograficamente, a serra do Espinhaço é dividida em diferentes domínios (Figura 1). Conforme Chaves et al., 2013, a cordilheira é dividida em: i) Espinhaço Meridional: compreendido entre os paralelos 17°30' e 20°00'S, em Minas Gerais. A cidade de Diamantina é o principal polo de referência para os estudos neste domínio; ii) Espinhaço Central: localizado entre os paralelos 17°30'S e 14°S, no norte de Minas Gerais. Cidades como Mato Verde, Porteirinha e Monte Azul são referências importantes para a geologia local; iii) Espinhaço Setentrional: Estende-se ao norte do paralelo 14°S, na divisa entre Minas Gerais e Bahia. As áreas próximas a Botuporã e Macaúbas são localidades chave para a estratigrafia deste domínio; iv) Chapada Diamantina: Localizada no estado da Bahia, a leste do Espinhaço Setentrional. É um vasto planalto onde cidades como Lençóis, Seabra e Irecê marcam importantes seções geológicas.

Figura 1 - Cráton São Francisco com a localização das áreas de estudo destacadas em vermelho, SE: Espinhaço Meridional, CE: Espinhaço Central, NE: Espinhaço Setentrional e CD: Chapada Diamantina.



Fonte: Adaptado de Danderfer *et al.* 2019.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo compilar e analisar estatisticamente dados geocronológicos U-Pb em zircão detrítico do Supergrupo Espinhaço, visando avaliar padrões de proveniência sedimentar e testar correlações estratigráficas regionais. Como objetivos específicos tem-se:

- Compilar e padronizar um banco de dados geocronológico U-Pb a partir de informações publicadas para as diferentes unidades e domínios da bacia Espinhaço;
- Aplicar métodos estatísticos (Diagramas de Densidade de Probabilidade – PDP/KDE, teste de Kolmogorov-Smirnov e Escalonamento Multidimensional – MDS) para comparar quantitativamente as distribuições de idades;
- Avaliar variações nas assinaturas de proveniência entre as megassequências

deposicionais;

- Interpretar os resultados no contexto da evolução tectono-sedimentar do paleocontinente São Francisco durante o Proterozoico.

1.4 JUSTIFICATIVA

Embora o arcabouço cronoestratigráfico do Supergrupo Espinhaço seja relativamente bem estabelecido, o entendimento quantitativo das relações entre proveniência sedimentar, sistemas deposicionais e evolução tectônica regional ainda apresenta lacunas. Grande parte dos estudos existentes concentra-se em domínios específicos ou em conjuntos de dados isolados, o que dificulta análises comparativas em escala de bacia.

A compilação sistemática dos dados U-Pb em zircão detrítico, aliada à aplicação de métodos estatísticos, permite superar essa limitação ao oferecer uma abordagem integrada e quantitativa. Essa estratégia possibilita avaliar similaridades e diferenças entre unidades estratigráficas, identificar agrupamentos de proveniência e testar possibilidades de correlação regional de forma mais objetiva.

Além de contribuir para o refinamento dos modelos tectono-sedimentares do Supergrupo Espinhaço, este trabalho gera um banco de dados geocronológico padronizado, que poderá servir como ferramenta de referência para futuras pesquisas em geocronologia, análise de bacias e reconstrução paleogeográficas do paleocontinente São Francisco.

Dessa forma, a pesquisa se justifica tanto pelo avanço científico na compreensão da evolução proterozoica regional quanto pela consolidação de uma base de dados integrada que fortalece investigações futuras em escala regional.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

1.5.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Neste trabalho foi realizado um extenso levantamento bibliográfico focado na geocronologia, estratigrafia e evolução tectônica da Bacia do Espinhaço em seus diferentes domínios. A base conceitual para o entendimento da bacia no domínio meridional foi estabelecida a partir dos primeiros trabalhos de Martins-Neto (1998), que propôs um modelo de evolução do tipo rifte-sag. Com a evolução e estudos dos dados geocronológicos os trabalhos de Danderfer *et al.*, (2009) e Chemale *et al.*, (2012) foram cruciais ao demonstrarem a natureza polifásica da bacia, estabelecendo a existência de pelo menos três megassequências

deposicionais principais (Estateriana, Calymmiana e Esteniana) separadas por hiatus deposicionais. A compilação de dados para a análise da proveniência e correlação estratigráfica, objetivo central do TCC, baseou-se também nos mais recentes estudos de datação U-Pb em zircão, como os de Santos *et al.*, (2013;2015), que mostra as fontes sedimentares no domínio meridional; Danderfer *et al.*, (2015), que dá um panorama do rifte Estateriano no Norte e Guadagnin *et al.*, (2015), que dataram o evento vulcânico na Megassequência Média na Chapada Diamantina, além dos trabalhos de Costa *et al.*, (2014), Costa *et al.*, (2018) para o domínio no Espinhaço Central.

1.5.2 BANCO DE DADOS

O objetivo da compilação dos dados foi centralizar as informações de idades disponíveis para as diversas unidades do Supergrupo Espinhaço, abrangendo os domínios Meridional, Setentrional, Central e a Chapada Diamantina. Essa compilação permitiu a aplicação de análises de proveniência sedimentar e a realização de correlações estratigráficas em escala regional.

Os dados foram extraídos de artigos científicos, dissertações, teses e arquivos suplementares de estudos geocronológicos previamente publicados, incluindo, entre outros, Martins-Neto (1998), Danderfer *et al.*, (2009, 2015), Chemale *et al.*, (2012), Santos *et al.*, (2013, 2015a), Guadagnin *et al.*, (2015), Costa *et al.*, (2014) e Medeiros *et al.*, 2024. O conjunto completo dos dados encontra-se no Anexo A.

A organização do banco de dados foi realizada em planilhas do software Microsoft Excel. As planilhas foram estruturadas por unidades estratigráficas, contendo para cada análise as seguintes informações principais: idade U-Pb, erro analítico e grau de discordância, grãos de zircão com discordância superior a 10% foram excluídos do banco de dados, pois podem resultar em idades não confiáveis. A aplicação desse filtro é amplamente adotada em estudos de proveniência. Quando disponíveis nas publicações originais, também foram incluídas informações complementares das amostras, como litologia, contexto estratigráfico e localização.

Além disso foi realizada a compilação de um outro banco de dados contendo as amostras de zircões detríticos provenientes dos domínios Meridional, Setentrional e Central, a partir de dados publicados na literatura.

Um resumo das amostras compiladas e de suas respectivas referências bibliográficas encontra-se apresentado no Quadro 1, enquanto o conjunto completo dos dados utilizados nas

análises estatísticas é disponibilizado no Anexo B, permitindo a consulta detalhada das características de cada amostra.

Quadro 1 - Resumo das amostras compiladas.

| Domínio Espinhaço Meridional | | | |
|------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---|
| Unidade | Número de amostras compiladas | Total de grãos analisados | Referência |
| Formação Bandeirinha | 2 | 195 | Santos <i>et al.</i> 2015, Chemale <i>et al.</i> , 2012 |
| Formação São João da Chapada | 3 | 236 | Santos <i>et al.</i> , 2015 e Santos <i>et al.</i> , 2013, Chemale <i>et al.</i> , 2012 |
| Formação Sopa Brumadinho | 8 | 499 | Santos <i>et al.</i> , 2013, Chemale <i>et al.</i> , 2012 |
| Formação Galho do Miguel | 11 | 183 | Santos <i>et al.</i> , 2015, Santos <i>et al.</i> , 2013 e Medeiros <i>et al.</i> , 2024 |
| Formação Santa Rita | 6 | 375 | Santos <i>et al.</i> , 2015 e Medeiros <i>et al.</i> , 2024, Chemale <i>et al.</i> , 2012 |
| Formação Córrego dos Borges | 8 | 594 | Santos <i>et al.</i> , 2015 e Medeiros <i>et al.</i> , 2024, Chemale <i>et al.</i> , 2012 |
| Formação Córrego Pereira | 1 | 210 | Medeiros <i>et al.</i> , 2024, Chemale <i>et al.</i> , 2012 |
| Formação Rio Pardo Grande | 2 | 224 | Medeiros <i>et al.</i> , 2024, Chemale <i>et al.</i> , 2012 |
| Domínio Espinhaço Central | | | |
| Formação Cavoada do Buraco | 1 | 50 | Costa 2017 |

| | | | |
|-----------------------------------|---|-----|--------------------------------|
| Formação Pau D'Arco | 1 | 36 | Costa 2017 |
| Formação Painelas | 2 | 155 | Costa 2017 |
| Formação Riacho Seco | 2 | 137 | Costa 2017 |
| Formação Vereda da Cruz | 1 | 66 | Costa 2017 |
| Grupo Sítio Novo | 5 | 293 | Costa 2017 |
| Domínio do Espinhaço Setentrional | | | |
| Sintema Algodão | 2 | 143 | Danderfer <i>et al.</i> , 2015 |
| Sintema Sapiranga | 2 | 36 | Danderfer <i>et al.</i> , 2015 |

Fonte: O autor.

1.5.3 MÉTODOS E AMOSTRAGEM

Como este trabalho se baseia na compilação de dados da literatura, esta seção irá descrever os critérios de amostragem para a seleção de zircões conforme reportado nos artigos.

A seleção das amostras nos trabalhos de referência seguiu diferentes critérios para garantir a representatividade e a qualidade dos dados geocronológicos. Para a datação de eventos magmáticos, os autores priorizaram rochas vulcânicas ou vulcanoclásticas, como tufos de cristais, dacitos e riolitos, que são fontes primárias de zircões magmáticos e representam um registro temporal preciso de um evento magmático. Para os estudos de proveniência sedimentar, foram selecionados metarenitos de diferentes unidades estratigráficas, garantindo a representatividade dos grãos detríticos depositados em cada fase da bacia. Na maioria dos casos, as amostras foram coletadas em afloramentos com baixo grau de intemperismo e deformação, para preservar as características originais das rochas e dos minerais.

Após a coleta, as amostras foram submetidas a processos de padronização e separação mineral por métodos densitométricos e magnéticos. A seleção dos grãos de zircão seguiu duas abordagens principais. Para a datação de rochas ígneas, foram selecionados preferencialmente os cristais euédricos, prismáticos e com feições de origem magmática, evitando os grãos com núcleos herdados visíveis. Para os estudos de proveniência em rochas

sedimentares, a seleção buscou abranger toda a diversidade morfológica da população de zircões, de forma a obter uma amostragem estatisticamente representativa das diversas áreas fontes.

1.5.4 MÉTODOS DE DATAÇÃO

Os dados geocronológicos compilados neste trabalho foram obtidos por métodos de microanálise in situ de U-Pb em zircão. As duas técnicas principais utilizadas nos artigos de referência são a Microsonda Iônica de Alta Resolução (SHRIMP) e a Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado e Ablação a Laser (La-ICP-MS). Os princípios de funcionamento e as aplicações dos dois métodos são detalhados por Caxito (2021).

A datação por SHRIMP (Sensitive High-Resolution Ion Microprobe) é uma técnica de espectrometria de massa de íons secundários. O método consiste em bombardear um ponto na superfície do zircão com um feixe de íons primário, que pulveriza e ioniza o material da amostra. Os íons secundários extraídos são então acelerados e separados em um espectrômetro de massa de grande raio, que utiliza um campo magnético para discriminar os isótopos de U e Pb com altíssima resolução de massa. A principal vantagem do SHRIMP é sua elevada precisão e exatidão, sendo considerado o método referência para a datação de eventos geológicos que requerem a menor incerteza possível. Em diversos trabalhos o método foi utilizado para obter a idade de cristalização magmática com alta confiabilidade.

A datação por LA-ICP-MS (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) utiliza um feixe de laser de alta energia para vaporizar um ponto na superfície do zircão, gerando um aerossol. Este aerossol é transportado por um gás inerte até uma tocha de plasma, onde é completamente ionizado a temperaturas que podem exceder 6000 °C. Os íons são então introduzidos em um espectrômetro de massa que separa e quantifica os isótopos de U e Pb. A principal vantagem deste método é sua alta velocidade de aquisição de dados, permitindo a análise de muitos grãos em um curto período. Por essa razão, o LA-ICP-MS é a ferramenta ideal e mais utilizada nos estudos de proveniência sedimentar por meio de zircão detrítico, onde a estatística de uma grande quantidade de datação é mais importante que a altíssima precisão em um único grão.

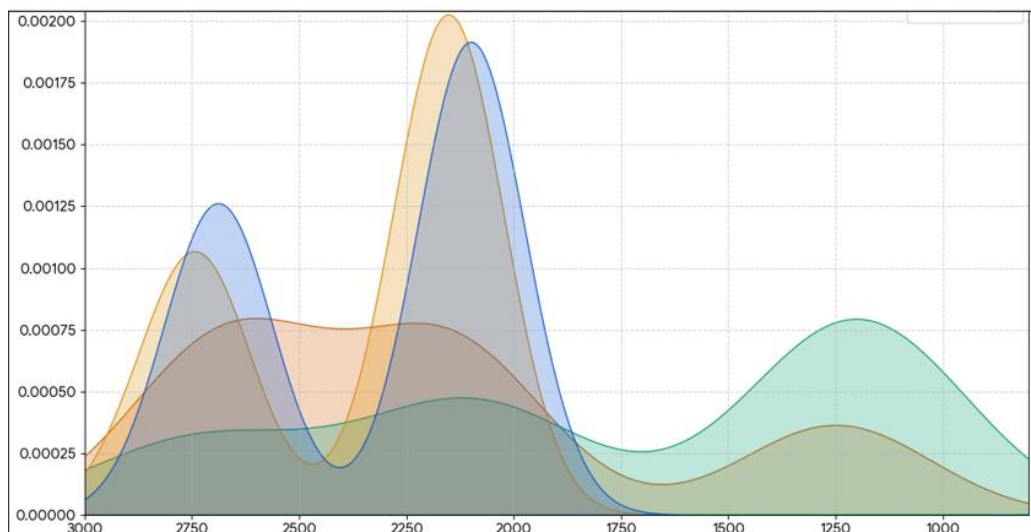
1.5.5 ANÁLISE ESTATÍSTICAS E ELABORAÇÃO DE GRÁFICOS DE PROBABILIDADE

As análises estatísticas aplicadas consistem no Diagrama de Densidade de Probabilidade (Probability Density Plot – PDP), Funções de Distribuição Cumulativa (CDF), Kolmogorov

Smirnov (K-S), e Escalonamento Multidimensional (MDS). Todos os gráficos foram programados no software Visual Studio em linguagem Python.

A principal forma de visualização da distribuição de idades de uma amostra de zircão detrítico será pelo Diagrama de Densidade de Probabilidade. Diferentemente de um histograma convencional, o PDP gera uma curva contínua a partir da soma de distribuição de probabilidade para cada idade individual, ponderada pela sua respectiva incerteza analítica. Este método resulta em uma representação mais realista das concentrações das idades, onde os picos da curva indicam as idades mais prováveis das rochas na área fonte. A aplicação de PDP's para dados de zircão detrítico é uma prática padrão na análise de bacias, conforme visto em todos os trabalhos desta pesquisa. A Figura 2 mostra um exemplo como será a visualização desses dados, no eixo X tenho as idades em Ma e no eixo Y tenho a Densidade de Probabilidade.

Figura 2 - Gráfico esquemático do Diagrama de Densidade de Probabilidade (PDP).



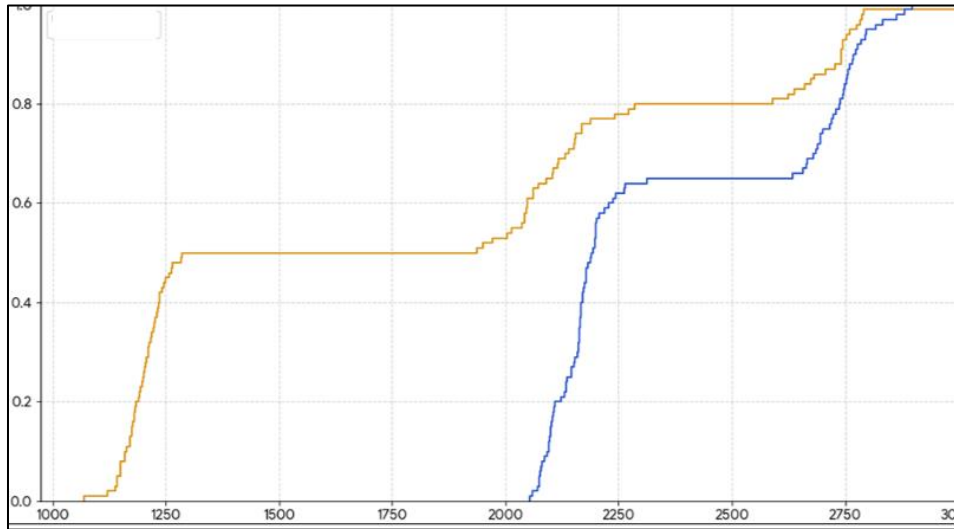
Fonte: O autor.

Para comparar quantitativamente as distribuições de idade entre duas amostras, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov. Este teste baseia-se na comparação de suas Funções de Distribuição Cumulativa. A CDF é uma representação gráfica na qual o eixo X representa a idade e o eixo Y a proporção acumulada de grãos com idade igual ou inferior àquele ponto, variando de 0 a 1 (ou 0% a 100%) (Figura 3).

O teste K-S mede a distância vertical máxima entre as duas curvas de CDF. A partir desta distância máxima, o teste calcula um "valor-p", que indica a probabilidade de que as duas amostras tenham sido extraídas da mesma população. Neste trabalho, será adotado um nível de significância de $\alpha = 0,05$. Portanto, se o valor-p for menor que 0,05, a distância entre as curvas

é considerada estatisticamente significativa, a hipótese nula é rejeitada, e as distribuições de idade são consideradas diferentes. Se o valor-p for maior que 0,05, as distribuições são consideradas estatisticamente indistinguíveis.

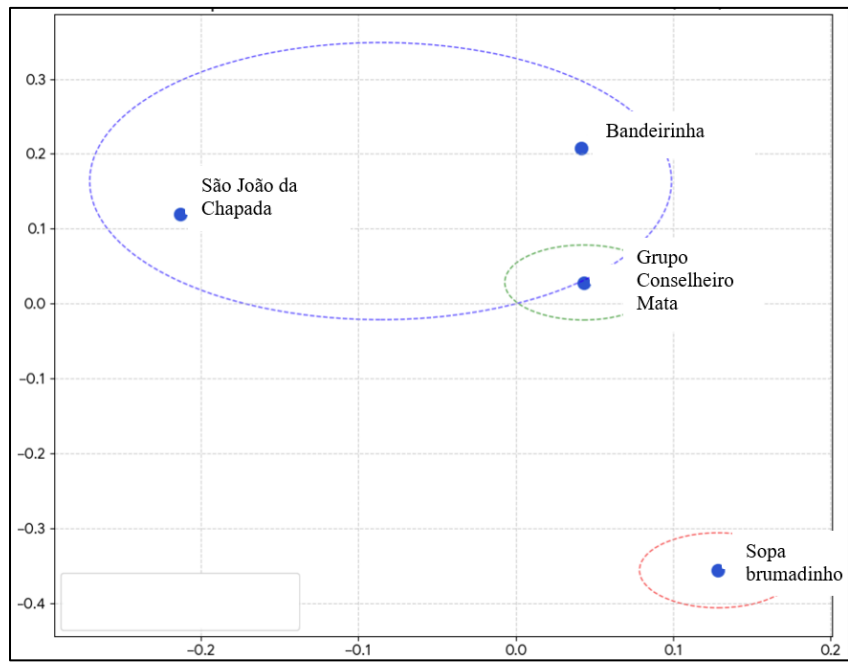
Figura 3 - Modelo esquemático do gráfico de Funções de Distribuição Cumulativa (CDF).



Fonte: O autor.

Para visualizar as relações de similaridade e dissimilaridade entre todas as amostras simultaneamente, será empregada a análise de Escalonamento Multidimensional. Esta técnica de análise multivariada utiliza uma matriz de dissimilaridade entre todas as amostras – calculada, neste caso, a partir do teste K-S – para representar cada amostra como um ponto em um espaço de baixa dimensão (Figura 4). No gráfico MDS resultante, a distância euclidiana entre os pontos é diretamente proporcional à dissimilaridade entre as amostras: amostras com distribuições de idade similares se agrupam, enquanto amostras com distribuições distintas se posicionam distantes umas das outras. Este método será uma ferramenta essencial para identificar agrupamentos de proveniência e avaliar correlações estratigráficas em escala regional.

Figura 4 - Modelo Esquemático do gráfico de Escalonamento Multidimensional.



Fonte: O autor.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

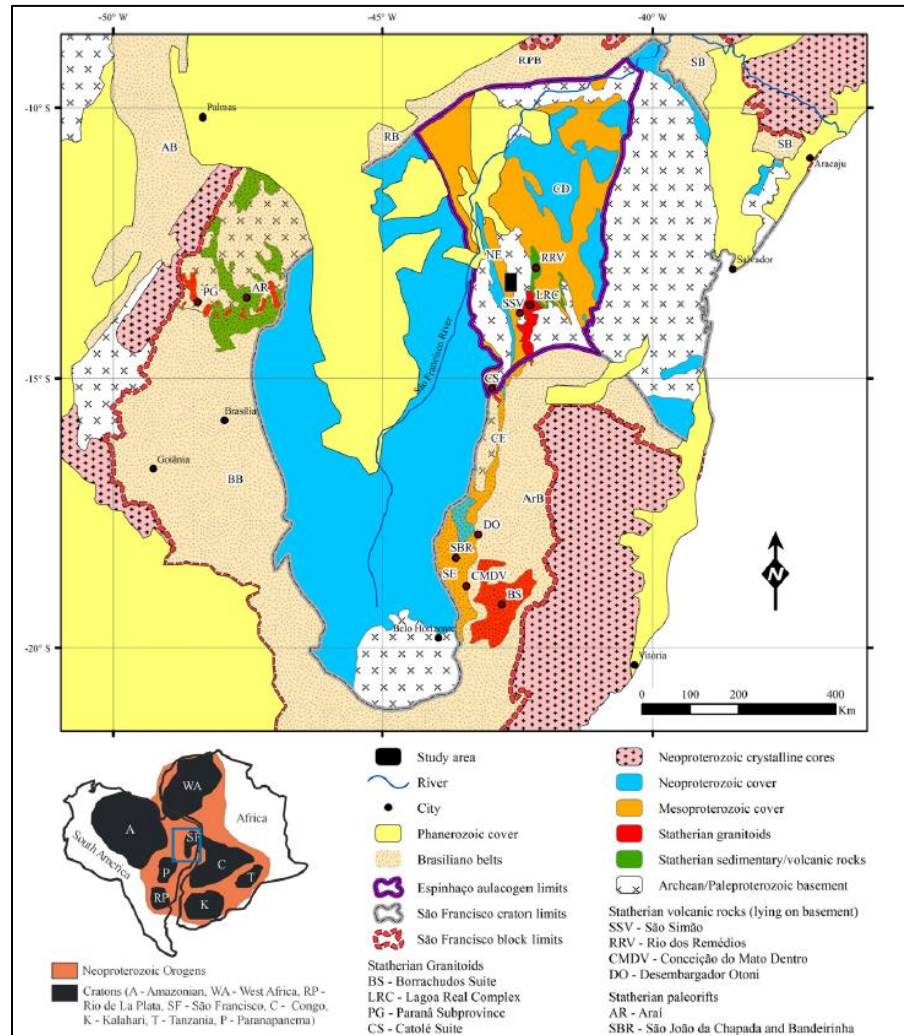
2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

A região investigada neste trabalho compreende a cordilheira do Espinhaço, que define uma extensa cadeia de montanhas na direção N-S e é dividida nos domínios Meridional, Central, Setentrional e Chapada Diamantina (Chaves *et al.*, 2013). Esses domínios são parte integrante da bacia Espinhaço, a qual agrupa as unidades estratigráficas de preenchimento paleo a mesoproterozoicas do Supergrupo Espinhaço. Do ponto de vista geotectônico, os domínios Setentrional e a Chapada Diamantina estão inseridos no cráton São Francisco, ao passo que os domínios Central e Meridional integram a faixa de dobramentos Araçuá (Figura 5).

O Cráton São Francisco (Almeida 1977, 1981, Alkmim *et al.* 1993) representa um núcleo rochoso estável desde o Paleoproterozoico, sendo atualmente bordejado por orógenos neoproterozoicas formadas durante a aglutinação do Gondwana no Ciclo Brasileiro (Alkmim *et al.*, 1993). O Cráton juntamente com as faixas constitui o paleocontinente São Francisco (Trompette, 1994, D'Agrella Filho *et al.*, 1996, Feybesse *et al.*, 1998). Segundo Danderfer *et al.* (2015) o paleocontinente é constituído por rochas do embasamento arqueano a paleoproterozoico e suas coberturas deformadas e indeformadas antes das configurações modeladas no ciclo brasileiro.

O embasamento do paleocontinente é composto por terrenos Arqueanos e Paleoproterozoicos, incluindo complexos gnáissico-migmáticos (TTGs) e sequências de greenstone belts. Este embasamento foi consolidado e estabilizado após a orogenia Riacciana por volta de 2.0 Ga (Danderfer *et al.*, 2009; Guadagnin & Chemale Jr, 2015). Após a estabilização do embasamento do paleocontinente São Francisco ocorreram vários episódios de formação de bacia intraplaca com magmatismo associado mais novos que 1.8 Ga. A bacia do Espinhaço, foco deste trabalho, registra três episódios representados por megassequências deposicionais distintas e descontínuas nos períodos Estateriano (1.8 – 1.68 Ga), Calimiano (1.57-1.42 Ga) e Esteniano (1.2 – 1.0 Ga) (Danderfer *et al.*, 2009, Chemale *et al.*, 2012, Santos *et al.*, 2013), cuja análise de proveniência sedimentar permite desvendar a evolução tectônica do paleocontinente.

Figura 5 - Configuração geológica do Espinhaço no Cráton São Francisco, que é bordado por cinturões de dobras e empurrões Brasilianos. A cobertura relacionada à chamada bacia do Espinhaço ocorre nos seguintes domínios fisiográficos: Chapada Diamantina (CD), Espinhaço Meridional (SE), Espinhaço Central (CE), Espinhaço Setentrional (NE).



Fonte: Adaptado de Danderfer *et al.*, 2015.

2.2 QUADRO ESTRATIGRÁFICO

2.2.1. UNIDADES DO EMBASAMENTO

O embasamento pré-Espinhaço é constituído de rochas cristalinas arqueanas, cujas assinaturas variam de características dos TTG's até granitoides potássicos que marcam a estabilização crustal arqueana, associações do tipo greenstone e cinturões de rochas supracrustais arqueanas e paleoproterozoicas. Além disso há rochas plutônicas de idades riacianas a orosirianas (2,0 a 1,9 Ga) associadas à edificação de arcos magmáticos que marcam eventos tectônicos de naturezas pre- sin-e pós colisionais (Heibron *et al.*, 2017, Teixeira *et al.*,

2017). A seguir serão apresentados o embasamento dos diferentes domínios.

2.2.1.1 EMBASAMENTO ESPINHAÇO SETENTRIONAL

No domínio setentrional o embasamento é constituído principalmente por rochas do Bloco Gavião. Essas unidades são compostas por gnaisses TTG (Tonalito-Trondhjemitogranodiotito), migmáticos e sequências metavulcanossedimentares de idades arqueanas a paleoproterozoicas. Ao analisarem a proveniência de arenitos da base do rifte Espinhaço, os autores demonstraram, via datação U-Pb em zircão detrítico, que o embasamento forneceu populações de idade arqueanas (com picos em ~ 3.4 Ga e ~ 2.7 Ga) e uma robusta população de idade paleoproterozoica, relacionada a Orogenia Riacciana (pico em ~ 2.1 Ga) (Chemale Jr. *et al.*, 2012; Guadagnin *et al.*, 2015).

2.2.1.2 EMBASAMENTO ESPINHAÇO CENTRAL

O embasamento do Espinhaço Central é representado por rochas arqueanas pertencentes ao Complexo Porteirinha e o Complexo Santa Isabel. O Complexo Porteirinha, conforme descrito por Silva *et al.*, (2016), constitui-se por um conjunto de rochas gnáissicas, migmatíticas e metagraníticas, frequentemente milonitizadas e com corpos de anfibolito associados. Silva *et al.*, (2016) obtiveram idade U-Pb SHRIMP em zircão de 3371 ± 6 Ma para o protólito de um gnaiss dessa unidade. Esses autores caracterizaram um importante episódio de metamorfismo datado em 3146 ± 24 Ma. Intrusivos nessas rochas arqueanas, ocorrem granitoides, que foram datados por Bersan *et al.*, (2020) em 2.03 ± 11 Ga (U-Pb em zircão), representando um evento magmático mais jovem.

2.2.1.3 EMBASAMENTO DO ESPINHAÇO MERIDIONAL

O embasamento do Supergrupo Espinhaço em seu domínio Meridional é representado pelo Complexo Basal, de idade arqueana, e pelo Supergrupo Rio Paraúna, de idade arqueana a paleoproterozoica. O Complexo Basal constitui-se por rochas granito-gnáissicas e migmatíticas, enquanto o Supergrupo Rio Paraúna é formado por uma sucessão de rochas vulcano-sedimentares. Um evento de metamorfismo que afetou estas unidades foi datado por Machado *et al.*, (1989), em 1844 ± 15 Ma pelo método U-Pb em zircão, definindo a idade máxima para a deposição da bacia na região.

2.2.2 SUPERGRUPO ESPINHAÇO

O Supergrupo Espinhaço compreende uma sucessão proterozoica de rochas metassedimentares e metavulcânicas. Admite-se neste trabalho a interpretação dada por

diversos autores (por ex., Danderfer & Dardenne 2002; Chemale Jr. *et al.* 2012; Santos *et al.* 2013, Chemale & Guadagnin 2015, Costa *et al.* 2018, Medeiros *et al.* 2025) para a evolução da bacia Espinhaço, para os quais ela constitui um local de acumulação de bacias sucessivas ao longo do tempo geológico. Esta abordagem revelou pelo menos três megassequências deposicionais principais separadas por longos hiatos.

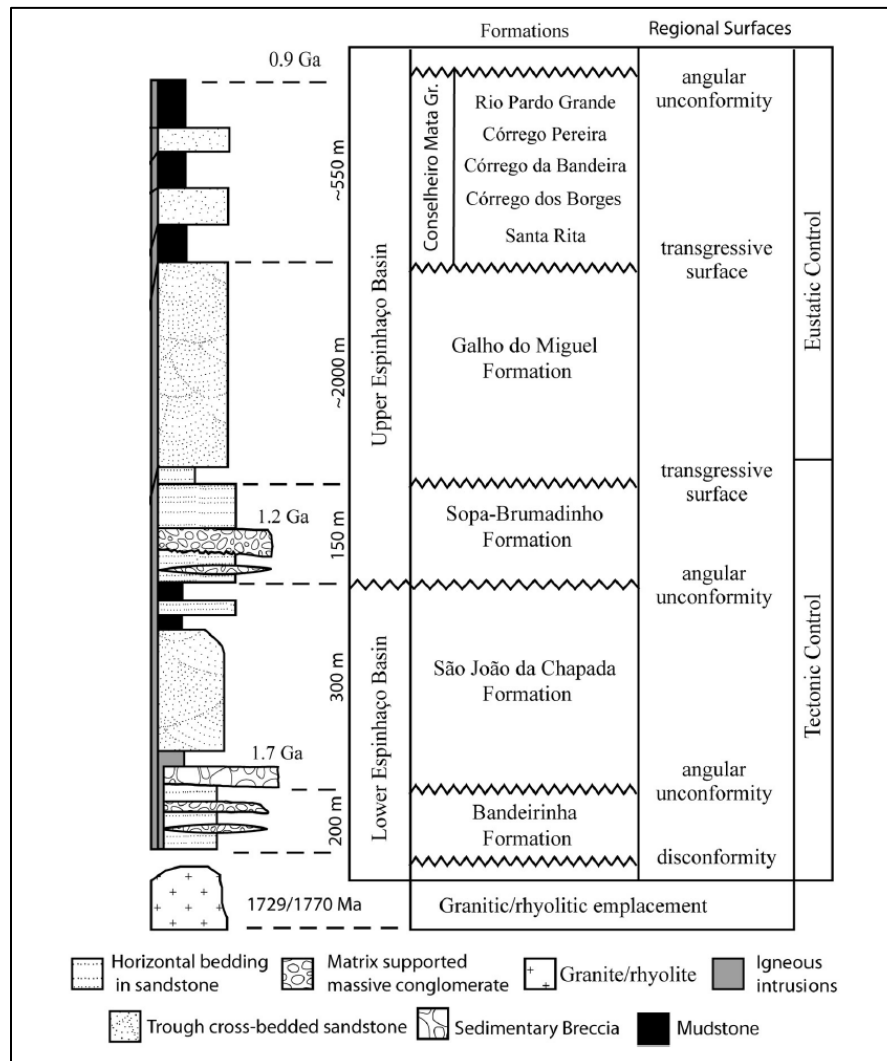
Seu arcabouço estratigráfico é dividido em Megassequências Inferior de idade Estateriana, Megassequência Média de idade Calimiana e Megassequência Superior de idade Esteniano-toniano. A seguir são apresentados como essas Megassequências estão distribuídas em seus diferentes domínios geográficos.

2.2.2.1 DOMÍNIO MERIDIONAL

O Supergrupo Espinhaço em seu domínio meridional registra uma longa e complexa história deposicional, que, com base em novos dados geocronológicos e estratigráficos recentes, é definida como um registro de duas megassequências principais: inferior e superior separadas por um hiato de aproximadamente 500 Ma (Chemale *et al.*, 2012) (Figura 6).

A Megassequência inferior, de idade Estateriana, representa a primeira fase de rifteamento da bacia. Ela compreende as formações Bandeirinha e São João da Chapada (Figura 6). A Formação Bandeirinha é composta por arenitos róseos e conglomerados depositados em um sistema de leques aluviais, fluviais entrelaçados e lacustre. A sua Idade Máxima de Deposição (MDA) foi determinada por Santos *et al.*, (2013) em ~1785 Ma, a partir da datação U-Pb do zircão detrítico mais jovem encontrado na unidade. Sobreposta em discordância angular, a Formação São João da Chapada definida por Pflug (1968) é composta por arenitos brancos e brechas de um sistema fluvial entrelaçado, a formação também contém corpos de filito hematítico interpretados como soleiras vulcânicas sin-sedimentares. Uma dessas soleiras foi datada pelo método U-Pb em zircão em 1703 ± 12 Ma (Chemale *et al.*, 2012).

Figura 6 - Coluna Estratigráfica do Espinhaço Meridional.



Fonte: Retirado de Santos 2013.

Após o hiato deposicional, a sedimentação é retomada no Esteniano com a instalação da Megassequência Superior (~1.2 – 0.9 Ga). O início desta nova fase rifte é marcado pela deposição da Formação Sopa Brumadinho, composta predominantemente por arenitos e conglomerados diamantíferos. Chemale *et al.*, (2012) definiram a idade máxima de deposição em 1192 Ma, obtida por datação U-Pb em zircões provenientes de matriz vulcanogênica de conglomerado, o que indica a introdução de uma nova fase magmática, até então ausente no registro da bacia.

Embora classicamente o Grupo Conselheiro Mata tenha sido interpretado como o registro da fase de subsidência termal (sag) da bacia, trabalhos recentes propõem um cenário tectônico mais complexo. Medeiros *et al.*, (2024) identificaram um quarto evento de rifteamento na base

deste grupo, registrado pelo Membro Inferior da Formação Santa Rita. Esta unidade constitui uma sequência sin-rifte composta por depósitos de leques aluviais e sistemas fluviais que preenchem estruturas de meio-gráben, com idade máxima de deposição de 1660 ± 32 Ma. A verdadeira fase sag se estabelece apenas no Membro Superior da Formação Santa Rita e na Formação Córrego dos Borges, onde há a transição para ambientes marinhos rasos (shoreface) e um aumento no aporte de fontes distais.

2.2.2.2 DOMÍNIO CENTRAL

O Domínio Central do Espinhaço preserva um registro estratigráfico fundamental para a correlação regional e para a compreensão da evolução tectonoestratigráfica da bacia (Danderfer *et al.*, 2015). Estudos recentes demonstram que a sucessão nessa região registra múltiplos episódios de rifteamento intracontinental, seguidos por estágios de subsidência térmica pós-rifte, refletindo a natureza policíclica do preenchimento bacinal (Costa *et al.*, 2014; Costa, 2017).

A Megassequência Inferior (Estateriano) é representada por sucessões vulcanossedimentares associadas ao rifteamento inicial, incluindo o magmatismo da Suíte Catolé e rochas metavulcânicas ácidas da região de Desembargador Otoni, datadas em 1752 ± 2 Ma (U–Pb), interpretadas como registro do estágio rifte dessa fase evolutiva (Danderfer *et al.*, 2015; Costa, 2017).

A Megassequência Média (Calimiana), reconhecida no domínio central como o rifte Mato Verde, corresponde ao Grupo Mato Verde e registra um novo episódio extensional intracratônico. Sua unidade basal, a Formação Painhas, é constituída por depósitos siliciclásticos associados a leques aluviais, sistemas fluviais entrelaçados e ambientes lacustres, refletindo sedimentação sintectônica em compartimentos controlados por falhas (Costa *et al.*, 2014; Costa, 2017). No topo, a Formação Riacho Seco registra intenso vulcanismo, com derrames e depósitos piroclásticos de composição dacítica a riolítica. Idades U–Pb em zircão de 1524 ± 6 Ma obtidas nessas rochas marcam o término da evolução do rifte Mato Verde e permitem sua correlação com eventos magmáticos calimianos regionais, incluindo o vulcanismo do Sistema Pajéu ($\sim 1,57$ Ga) no Espinhaço Setentrional e registros vulcânicos correlatos na Chapada Diamantina, evidenciando a natureza regional desse evento extensional (Costa *et al.*, 2014; Costa, 2017).

Sobrepondo-se a essa sucessão, a Formação Vereda da Cruz, de caráter predominantemente

eólico, representa a fase de subsidência térmica pós-rifte. A Formação Montevideu registra depósitos aluviais e marinho-rasos, indicando reorganização paleogeográfica e continuidade da sedimentação durante os estágios posteriores de evolução da bacia (Costa et al., 2014; Costa, 2017). A megassequência superior é registrada pelo Grupo Sítio Novo.

2.2.2.3 DOMÍNIO SETENTRIONAL

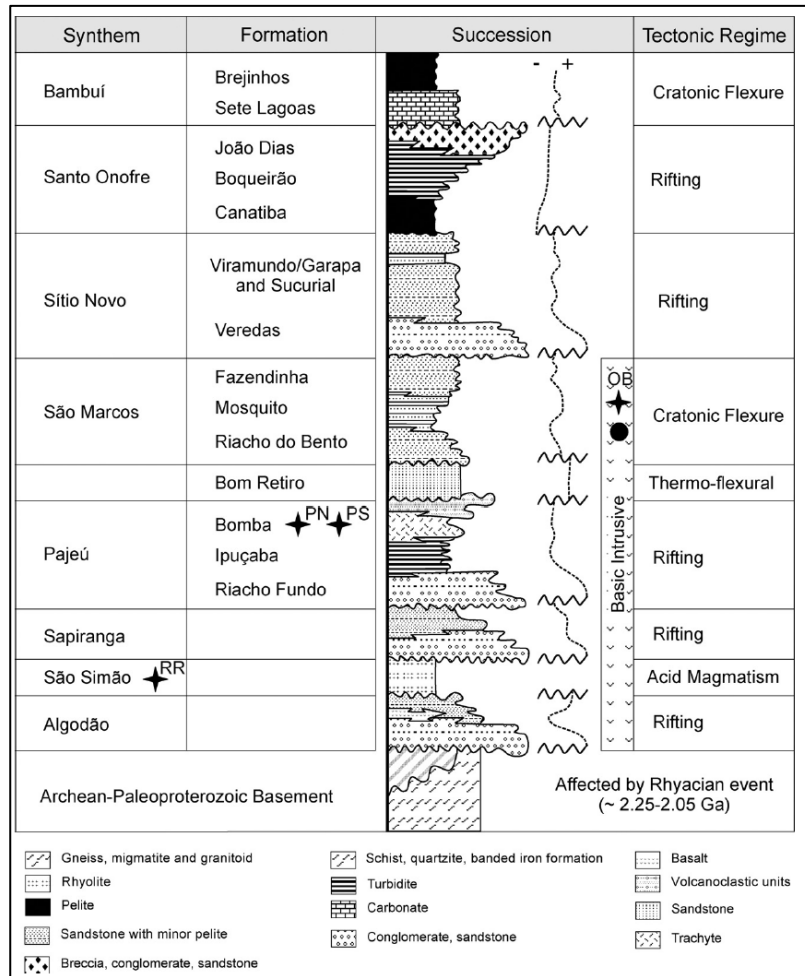
O Supergrupo Espinhaço no domínio Setentrional é organizado em sintemas, unidades limitadas por discordância de caráter regional (Danderfer *et al.*, 2009). Diferente do domínio meridional, o registo dessa sucessão no setor norte é mais completo, uma vez que a Megassequência Média (Calimiano) encontra-se preservada.

A base da sucessão, corresponde à Megassequência Inferior (Estateriano), é representada pelo Supersintema Boturã (Figura 7), que registra dois pulsos de rifteamento distintos (Danderfer *et al.*, 2015). O primeiro pulso, o Sintema Algodão, culminou em um evento de vulcanismo datado em 1775 ± 7 Ma, obtido por LA-ICP-MS em zircão. Sobreposto a este, o segundo pulso, o Sintema Sapiranga, é capeado por rochas vulcânicas datadas em 1740 ± 10 Ma (LA-ICP-MS em zircão). A proveniência dos conglomerados basais dessa unidade constitui um importante marcador da evolução da bacia, pois, além de fontes do embasamento, apresenta um pico dominante de zircão detríticos em ~ 1776 Ma, evidenciando a reciclagem de rochas do primeiro rifte (Danderfer *et al.*, 2015).

Após uma discordância, ocorre a Megassequência Média (Calimiano), representada pelo Sintema Pajéu, uma unidade associada a um novo episódio de rifteamento. A atividade vulcânica registrada no topo dessa sucessão, correspondente à Formação Bomba foi datada por U-Pb LA-ICP-MS em zircão em 1579 ± 15 Ma (Santos *et al.*, 2020). A este evento rifte segue-se a instalação de uma bacia após subsidência termal (sag), registrada pelos espessos arenitos eólicos do Sintema Bom Retiro.

A evolução da bacia prossegue com a Megassequência Superior (sintemas São Marcos, Sítio Novo e Santo Onofre). Toda sucessão é cortada por intrusivas máficas de idade Toniana, datadas em 854 ± 23 por U-Pb SHRIMP em zircão, idade essa considerada mínima para a deposição (Danderfer *et al.*, 2009).

Figura 7 - Coluna estratigráfica do domínio setentrional.



Fonte: Danderfer *et al.*, 2009.

3 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir da compilação e análise estatística dos dados geocronológicos U-Pb em zircão detrítico extraído dos trabalhos de referência listados na metodologia. O objetivo é demonstrar as assinaturas da proveniência sedimentar das unidades do Supergrupo Espinhaço e avaliar as relações estratigráficas entre seus diferentes domínios e megassequências. A Chapada Diamantina não foi incluída nas análises estatísticas multivariadas, pois a quantidade e a distribuição dos dados geocronológicos detríticos disponíveis ainda não permitem uma avaliação estatisticamente consistente.

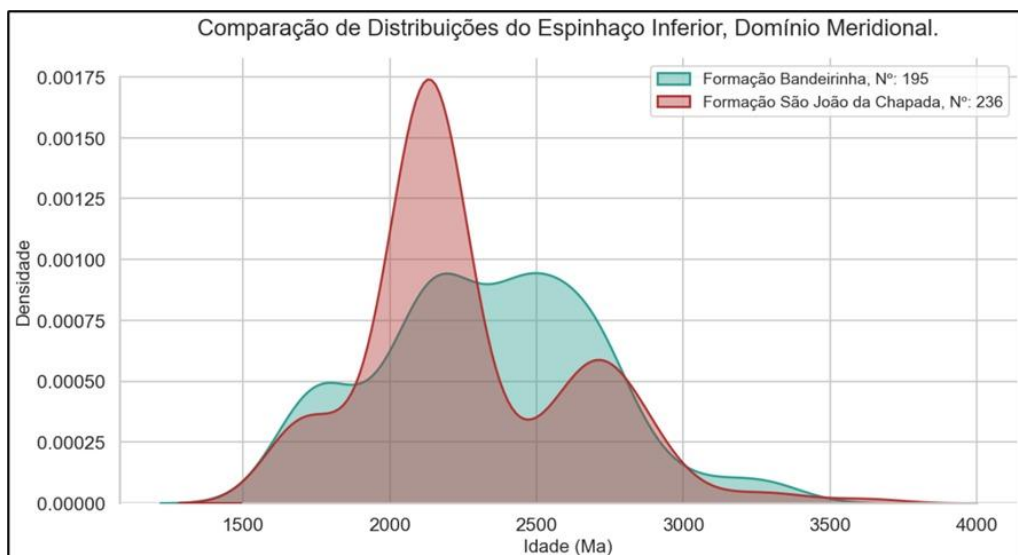
3.1 ESPINHAÇO MERIDIONAL

O domínio do Espinhaço Meridional, localizado em Minas Gerais, registra as megassequências inferior (Estateriano) e superior (Esteniano-Toniano), separadas por um hiato de aproximadamente 500 Ma. Os dados geocronológicos de zircão detrítico compilados para este domínio são apresentados a seguir, agrupados por suas respectivas megassequências.

3.1.1 MEGASSEQUÊNCIA INFERIOR (ESTATERIANA)

A Megassequência Inferior nesse domínio representa o primeiro ciclo de rifteamento da bacia e é composta pela formação Bandeirinha e São João da Chapada. A Figura 8 ilustra o Diagramas de Densidade de Probabilidade (PDP) para estas duas unidades.

Figura 8 - Gráfico PDP da Razão $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ da Megassequência Inferior do Espinhaço Meridional.



Fonte: O autor

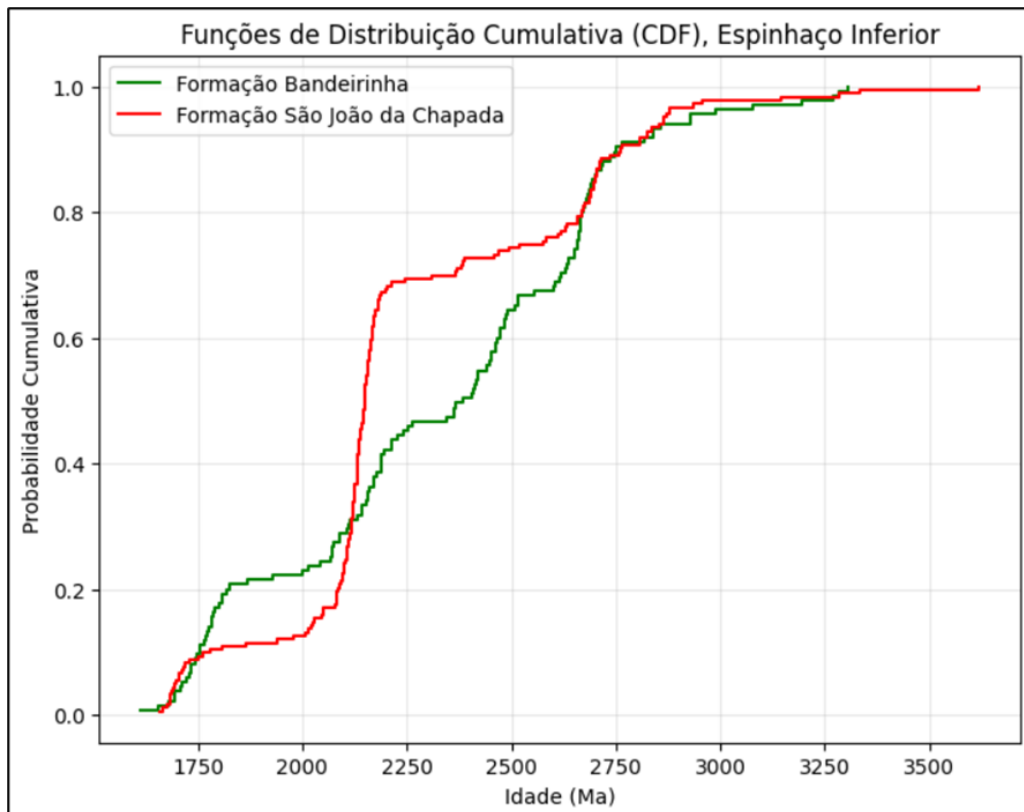
A Formação Bandeirinha (curva verde) apresenta picos distintos. Os picos de idade identificados incluem ~2664 Ma, e picos paleoproterozoicos em ~2468 Ma, ~2155 Ma e ~1785

Ma. Estas idades são interpretadas como provenientes de rochas do embasamento do Cráton São Francisco (Chemale et al., 2012; Santos et al., 2013). O zircão detrítico mais jovem fornece uma idade máxima de deposição (MDA) de ~1785 Ma (Santos et al., 2013) para esta unidade.

A Formação São João da Chapada (curva vermelha) está sobreposta a Formação Bandeirinha em discordância angular, é caracterizada por um pico de idade principal dominante em ~2138 Ma associado a Orogenia Riacciana e um pico de ~2700 Ma, ambos indicando fontes do embasamento do Cráton São Francisco. O pico mais jovem registrado foi de ~1713 Ma (Chemale et al., 2012) indicando a idade aproximada do início da sedimentação desta formação.

Para quantificar a dissimilaridade observada visualmente no Diagrama de Densidade e Probabilidade, foi aplicado o teste K-S através do gráfico CDF (Figura 9). O teste K-S retornou um valor estatístico D (distância máxima) de 0.2815 e um p-valor de 0.00. Adotando um nível de significância de 0.05 o p-valor indica que a hipótese nula (de que as duas amostras provêm da mesma população de zircão) deve ser rejeitada, portanto as distribuições de idade das formações Bandeirinha e São João da Chapada são estatisticamente diferentes.

Figura 9 - Gráfico das Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) do Espinhaço Inferior no Domínio Meridional.

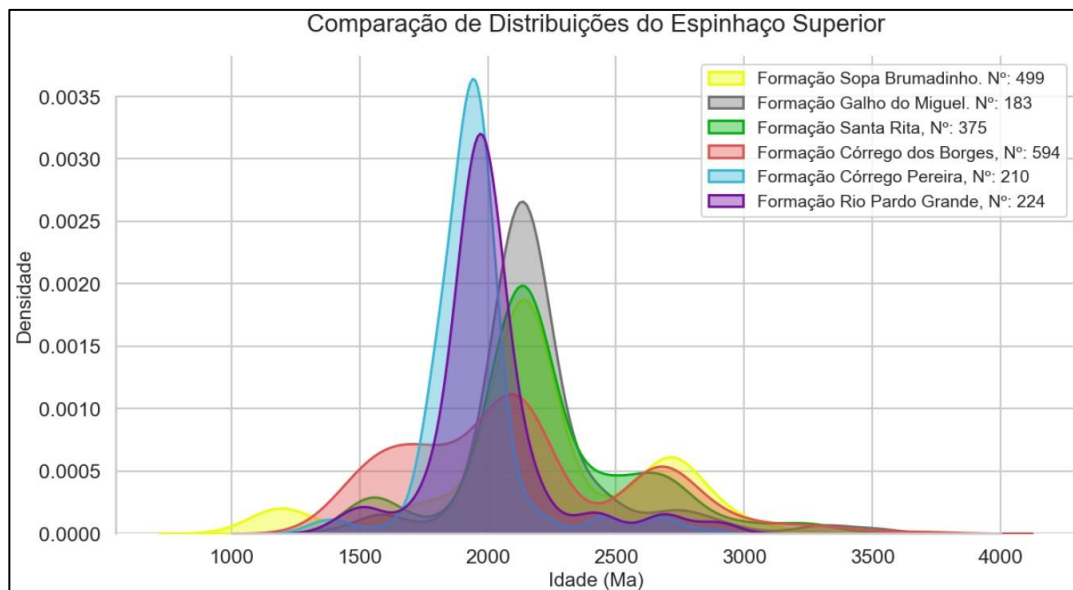


Fonte: O autor

3.1.2 MEGASSEQUÊNCIA SUPERIOR (ESTENIANO-TONIANO)

A Megassequência Superior é composta pelas formações Sopa Brumadinho e Galho do Miguel, além do Grupo Conselheiro Mata, representando a fase de subsidência termal da bacia do Espinhaço (Santos et al., 2015). A Figura 10 apresenta a compilação dos Diagramas de Densidade de Probabilidade (PDP) para estas unidades.

Figura 10 - Gráfico PDP da Razão $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ da Megassequência Superior do Espinhaço Meridional.



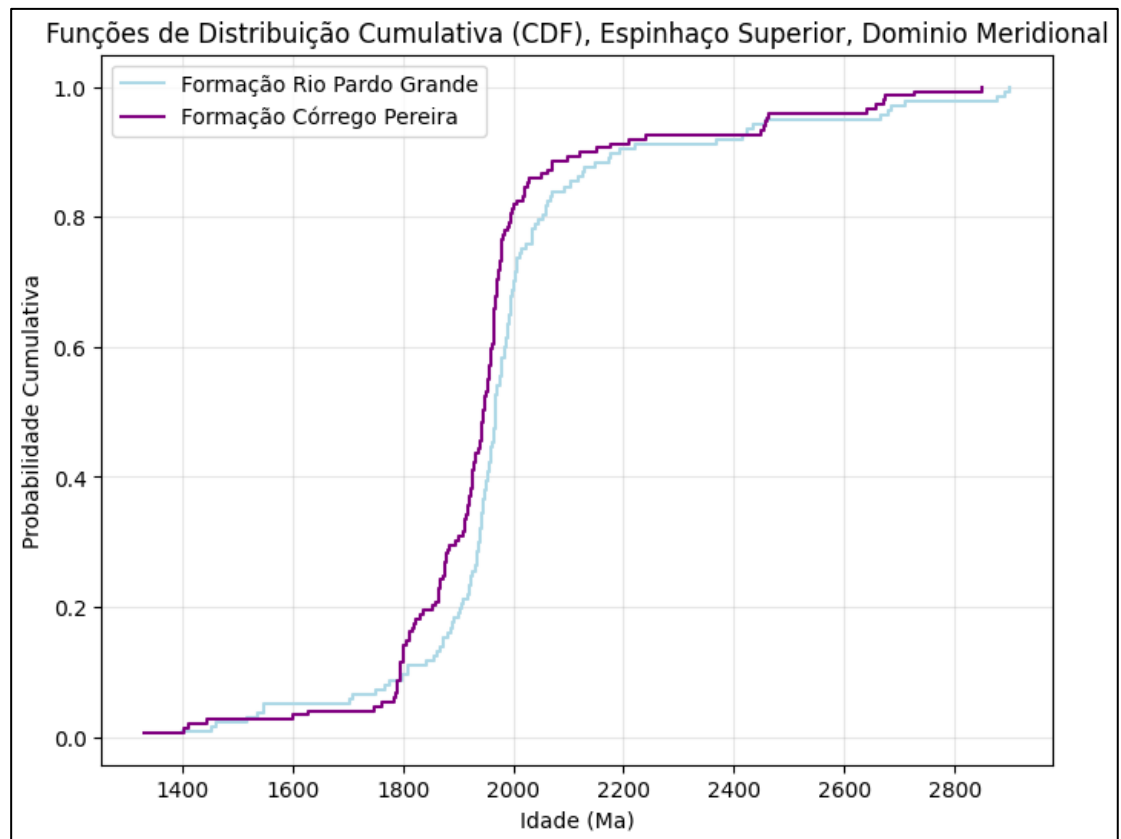
Fonte: O autor

As formações Rio Pardo Grande (curva roxa), Córrego Pereira (curva azul), Santa Rita (curva verde) e Galho do Miguel (curva cinza) apresentam assinaturas dominadas por fontes paleoproterozoicas. Contudo as formações Rio Pardo Grande e Córrego Pereira apresentam picos centrados no intervalo Orosiriano (~1.9 – 2.0 Ga) e as Formações Sopa Brumadinho, Santa Rita e Galho do Miguel apresentam picos principais um pouco mais antigos, no intervalo Riaciano (~2.1 – 2.2 Ga).

A Formação Córrego dos Borges (curva vermelha) apresenta uma assinatura de proveniência diferente das demais formações. Sua distribuição é marcada por picos de fontes arqueanas entre 2.5 e 3.0 Ga, seu pico principal está entre 2.0 e 2.2 Ga e é possível verificar um terceiro pico em ~1.6 Ga.

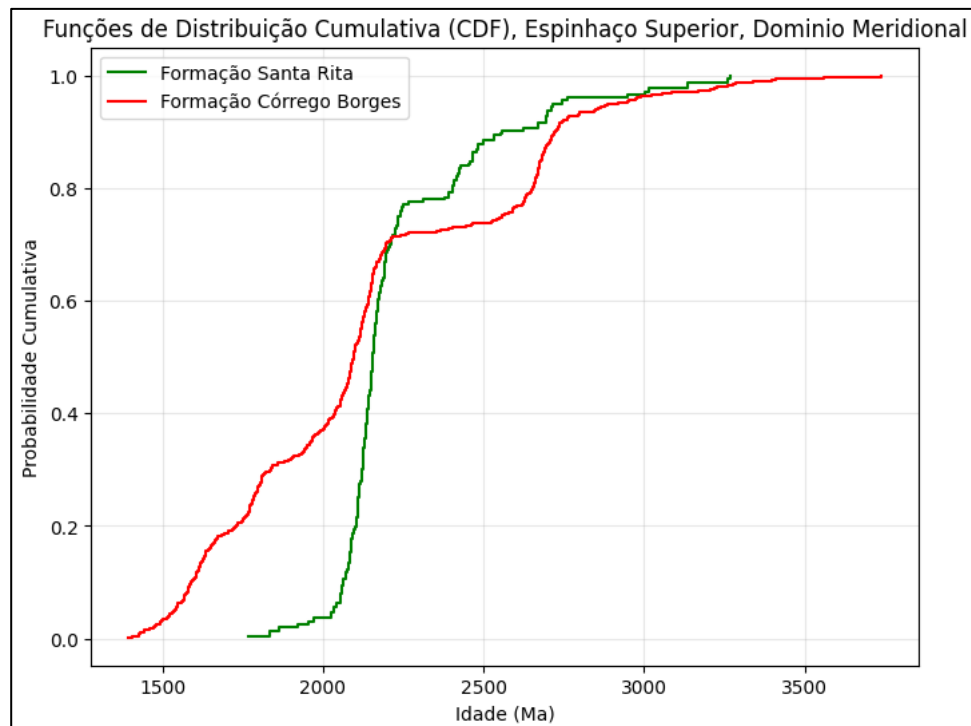
Para avaliar quantitativamente as relações de proveniência entre as formações do Grupo Conselheiro Mata e a Formação Galho do Miguel, foi aplicado o teste K-S em todos os possíveis pares entre as unidades. Os gráficos de Funções Distribuição Cumulativa correspondentes aos pares das Formações Rio Pardo Grande/Córrego Pereira e Formação Santa Rita/Córrego dos Borges são apresentados a seguir (Figura 11 e Figura 12), os demais resultados são expressos na Tabela 1.

Figura 11 - Gráfico da Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) com mais similaridade do Espinhaço Superior no Domínio Meridional.



Fonte: O autor.

Figura 12 - Gráfico das Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) com maior dissimilaridade do Espinhaço Superior no Domínio Meridional.



Fonte: O autor

Tabela 1 - Estatística D e p-valor entre as formações do Espinhaço Superior no Domínio Meridional.

| Formação A | Formação B | Estatística D | P-Valor | Resultado |
|------------------|------------------|---------------|---------|------------|
| Galho do Miguel | Rio Pardo Grande | 0,6582 | 0,00 | Diferentes |
| Galho do Miguel | Córrego Pereira | 0,7492 | 0,00 | Diferentes |
| Galho do Miguel | Córrego Borges | 0,2878 | 0,00 | Diferentes |
| Santa Rita | Rio Pardo Grande | 0,7394 | 0,00 | Diferentes |
| Santa Rita | Córrego Borges | 0,8125 | 0,00 | Diferentes |
| Santa Rita | Galho do Miguel | 0,2065 | 0,00 | Diferentes |
| Rio Pardo Grande | Córrego Pereira | 0,1902 | 0,00 | Diferentes |
| Córrego Borges | Córrego Pereira | 0,7492 | 0,00 | Diferentes |
| Córrego Borges | Rio Pardo Grande | 0,6580 | 0,00 | Diferentes |

Fonte: O autor.

Os resultados mostram uma heterogeneidade estatística na bacia. Em todas as comparações realizadas, o teste resultou na rejeição da hipótese nula, indicando que as distribuições de todas as formações são estatisticamente diferentes entre si.

Apesar da rejeição da hipótese, a dissimilaridade varia consideravelmente, permitindo identificar grupos com maiores afinidades. As maiores distâncias estatísticas foram observadas na comparação entre a Formação Córrego dos Borges e a Formação Santa Rita ($D = 0,8125$). A menor dissimilaridade foi vista nas Formações Rio Pardo Grande e Córrego Pereira ($D = 0,1902$) e nas Formações Santa Rita e Galho do Miguel ($D = 0,2065$).

3.1.3 SÍNTESE ESTATÍSTICA DO DOMÍNIO MERIDIONAL (MDS)

A Figura 13 representa o mapa de dissimilaridade gerado pelo Escalonamento Multidimensional (MDS) para as formações do Espinhaço Meridional. Através da disposição espacial desses dados é possível notar comportamentos estatísticos diferentes baseados nas distâncias calculadas pelo teste K-S.

Figura 13 - Gráfico de Escalonamento Multidimensional do Espinhaço Meridional.



Fonte: O autor.

No quadrante superior esquerdo é observado a formação de um cluster (conjunto de dados com mais similaridade) composto pelas formações Galho do Miguel, Santa Rita, Sopa-Brumadinho da Megassequência Superior e a Formação São João da Chapada da

Megassequência Inferior. A proximidade entre essas formações indica uma alta similaridade estatísticas entre seus zircões detrítico.

As formações Rio Pardo Grande e Córrego Pereira se isolam no extremo inferior direito do gráfico, a grande distância (D) que separa essas unidades mostram uma dissimilaridade dentro do domínio Meridional.

A Formação Córrego Borges ocupa uma posição central no gráfico, revelando uma assinatura estatística intermediária entre o cluster superior esquerdo e as duas formações no canto inferior direito. A parte basal do Domínio Meridional representada pela Formação Bandeirinha se encontra isolada no quadrante superior direito. Sua posição afastada, tanto da Formação São João da Chapada quanto das unidades da Megassequência Superior, mostra um padrão de idade distinto das fases subsequentes da bacia.

3.2 ESPINHAÇO SETENTRIONAL

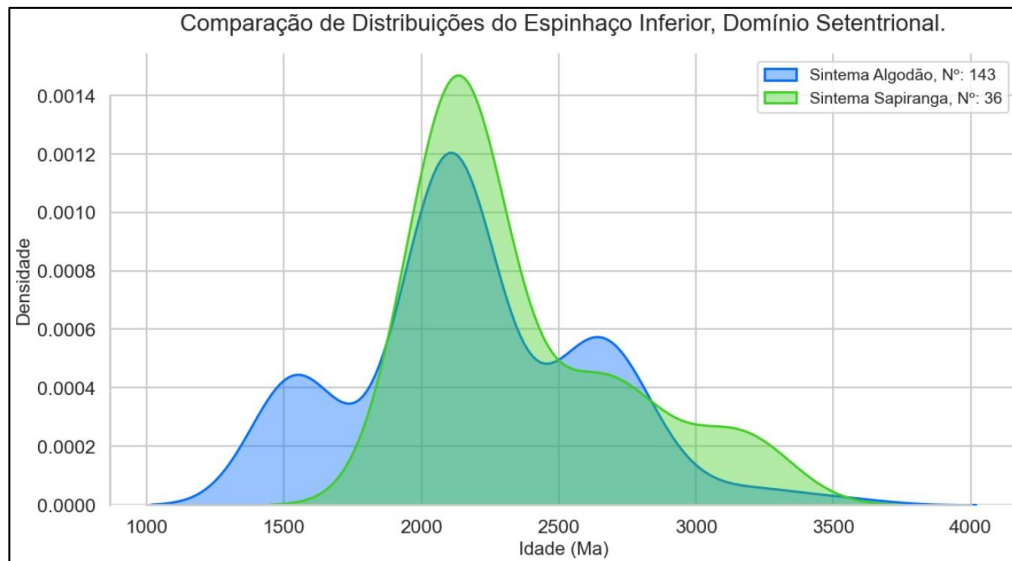
O domínio do Espinhaço Setentrional, localizado na Bahia, apresenta um registro estratigráfico completo do Supergrupo Espinhaço, preservando as unidades das três megassequências deposicionais. Abaixo está listado os resultados dessas megassequências de acordo com a compilação dos dados geocronológicos.

3.2.1 MEGASSEQUÊNCIA INFERIOR (ESTATERIANA)

O Sintema Algodão representa o primeiro evento de rifteamento, cuja deposição é limitada por rochas vulcânicas no topo datadas em 1775 Ma (Danderfer *et al.*, 2015). De acordo com os Diagramas de Densidade de Probabilidade (Figura 14) os picos principais para essa unidade são de 2698 Ma e 2050 Ma, indicando fontes do embasamento do Cráton São Francisco. Um pico menor é observado em ~ 1.5 Ga.

O Sintema São Simão é caracterizado por um vulcanismo ácido, datado em ~ 1730 Ma. Sobreposto ao Sintema São Simão tem-se o Sintema Sapiranga (curva verde), o pico principal desse Sintema é de 2143 Ma, 2650 Ma e 3150 Ma.

Figura 14 - Gráfico PDP da Razão $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ da Megassequência Inferior do Espinhaço Setentrional.

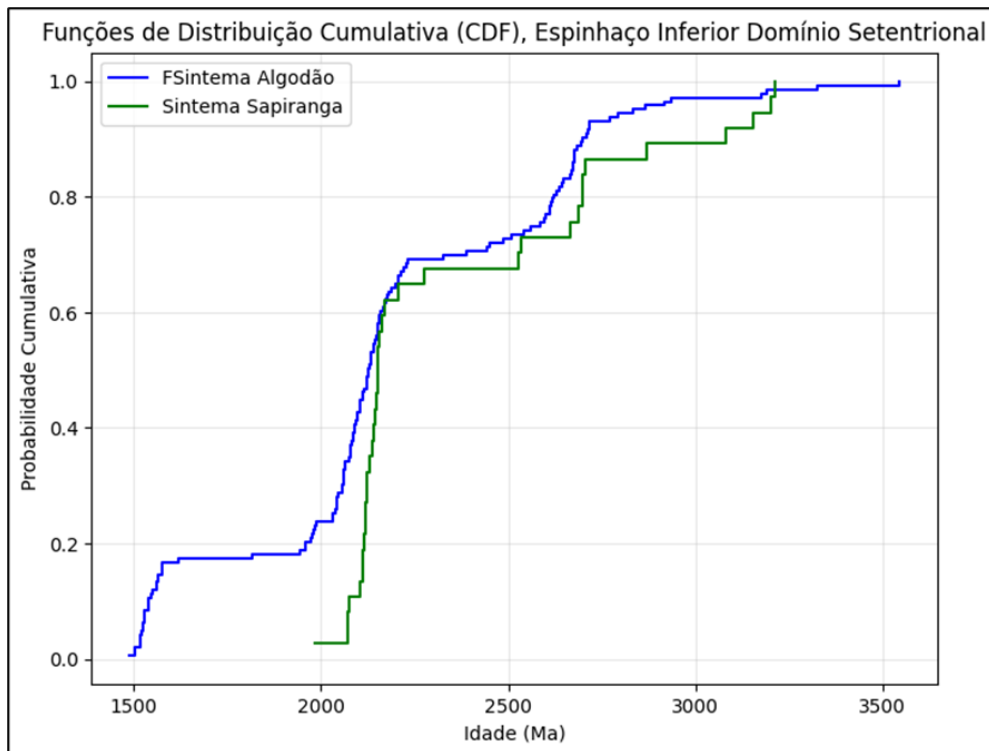


Fonte: O autor.

Para analisar a relação de proveniência entre os dois sistemas, foi aplicado o teste K-S de acordo com o gráfico CDF (Figura 15). O teste K-S resultou em uma estatística D (distância máxima) de 0.3185 e um p-valor de 0.0037.

Adotando um nível de significância de 0.05, o p-valor indica que a hipótese nula (de que as amostras provêm da mesma população) deve ser rejeitada. Fica demonstrado, portanto, que as distribuições de idade dos sistemas Algodão e Sapiranga são estatisticamente diferentes.

Figura 15 - Gráfico da Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) do Espinhaço Inferior no Domínio Setentrional.



Fonte: O autor.

3.2.2 MEGASSEQUÊNCIA MÉDIA (CALIMIANA)

Para a Megassequência Média no domínio Setentrional, não foram compilados dados de zircão detrítico neste trabalho. O balizamento cronológico para este ciclo provém da datação direta de rochas vulcânicas associadas.

Esta megassequência é representada pelo Sintema Pajeú, que em sua porção superior inclui a Formação Bomba. A datação U-Pb em zircões magmáticos em traquito, forneceu idades de cristalização de 1582 ± 8 Ma e 1569 ± 14 Ma (Danderfer *et al.*, 2009). Santos *et al.*, 2020 obtiveram idade U-Pb via LA-ICP-MS em zircão de 1579 ± 15 Ma. Sobrepostos a esta unidade de rifte, ocorrem os depósitos da fase de subsidência termal (termo-flexural e flexural), representados pelos sintemas Bom Retiro e São Marcos.

3.2.3 MEGASSEQUÊNCIA SUPERIOR (ESTENIANA-TONIANO)

A deposição da megassequência superior neste domínio, composta pelos sintemas Sítio Novo e Santo Onofre não possuem datações U-Pb em zircão detrítico, não havendo dados para serem compilados neste trabalho. A cronologia é, portanto, estabelecida por datações indiretas e correlações regionais.

O primeiro pulso, representado pelo Sintema Sítio Novo, é correlacionado ao Grupo Chapada Diamantina. As idades de referência são derivadas de datações de estromatólitos, que apontam idades em torno de 1140 Ma e de datações K-Ar em rochas máficas que cortam as unidades inferiores, com idades entre 1.2 e 1.1 Ga (Danderfer *et al.* 2009).

O último evento deposicional da bacia é representado pelo Sintema Santo Onofre. Ele está associado a um magmatismo máfico datado em ~850 Ma.

3.3 ESPINHAÇO CENTRAL

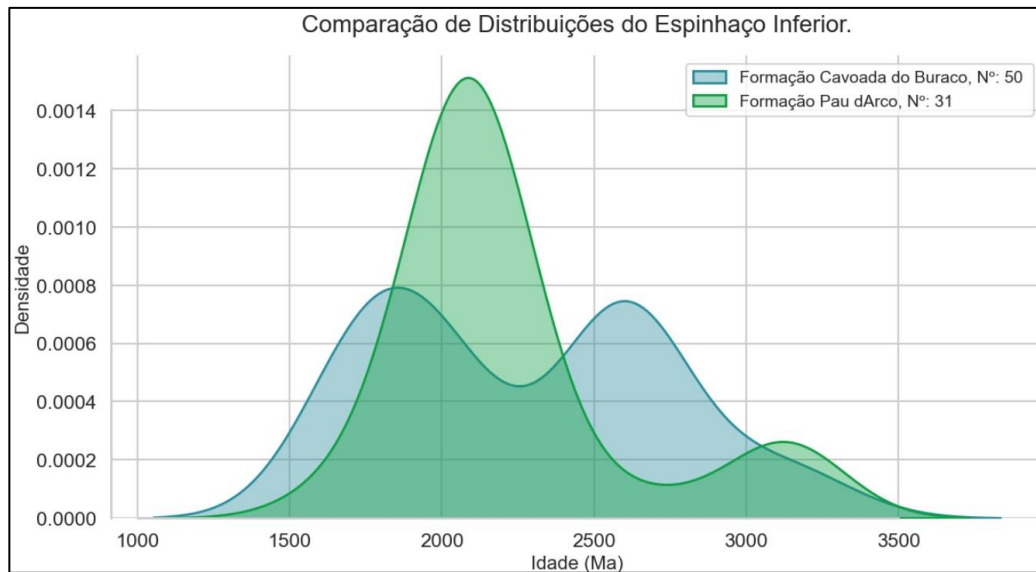
O domínio do Espinhaço Central, localizado no norte de Minas Gerais, apresenta registro das megassequências Inferior, Média e Superior.

3.3.1 MEGASSEQUÊNCIA INFERIOR (ESTATERIANA)

As unidades da Megassequência Inferior registram a evolução completa de uma bacia estateriana, desde a sua fase inicial de rifteamento até a fase de subsidência termal (sag). As unidades analisadas nessa megassequência incluem as formações Cavoada do Buraco e Pau d'Arco.

O Diagrama de Densidade de Probabilidade (Figura 16) apresenta as idades compiladas das formações Cavoada do Buraco e Pau d'Arco. A Formação Cavoada do Buraco (curva azul) exibe picos principais em 2631 Ma, 1994 Ma e 1728 Ma, relacionados a fontes do embasamento do Cráton São Francisco e eventos orogênicos riacianos-orosirianos. O grão de zircão mais jovem identificado apresenta idade de 1710 Ma, a qual é interpretada como a idade máxima de deposição (MDA).

Figura 16 - Gráfico PDP da Razão $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ da Megassequência Inferior do Espinhaço Central.



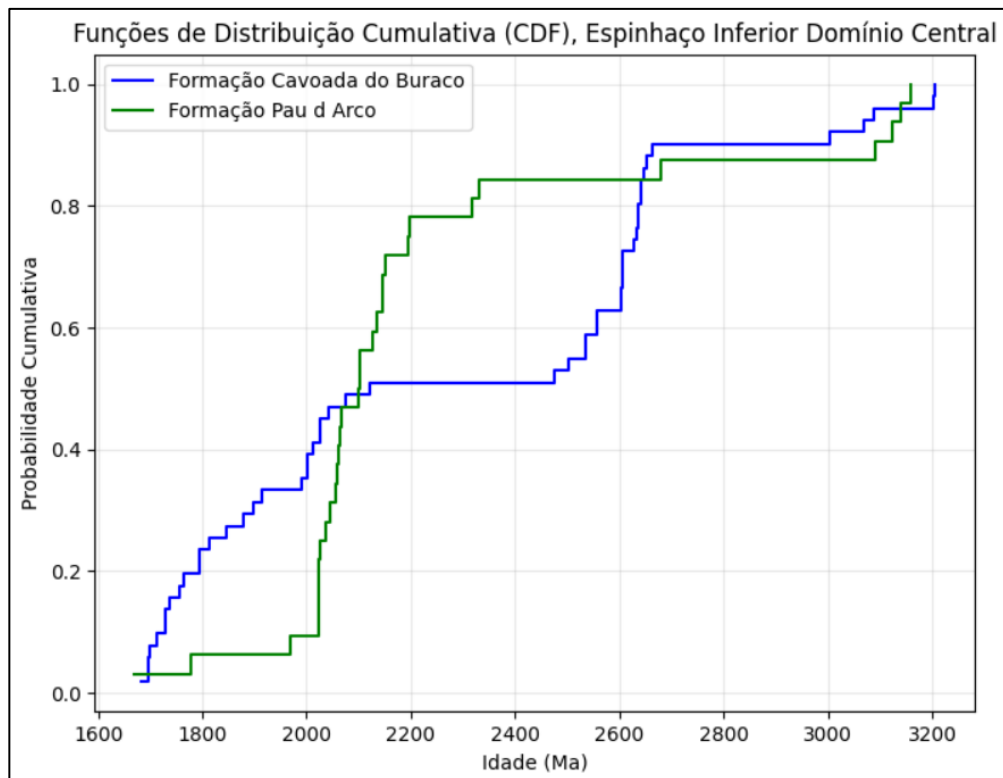
Fonte: O autor.

A Formação Espigão corresponde a uma unidade metavulcânica associada à Megassequência Inferior. A datação U-Pb em zircão magmático dessa unidade forneceu uma idade de cristalização de 1758 Ma (Costa 2017).

Comparativamente, a Formação Cavoada do Buraco (curva azul) apresenta picos dominantes em ~ 1.8 Ga e ~ 2.6 Ga, enquanto a Formação Pau d'Arco (curva verde) exibe um pico proeminente em ~ 2056 Ma e um pico subordinado em 3.1 Ga, indicando contribuição de fontes paleoproterozoicas e arqueanas. Nesta última unidade, também foi registrada a presença de dois grãos de zircão com idades em torno de ~ 1.7 Ga.

Com base no gráfico de funções de distribuição cumulativa (Figura 17) foi aplicado o teste K-S que resultou em uma estatística D de 0.3339 e um p-valor de 0.0187. Considerando o nível de significância de 0.05, o resultado indica a rejeição da hipótese nula, evidenciando que as distribuições de idades das duas formações são estatisticamente distintas.

Figura 17 - Gráfico das Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) do Espinhaço Inferior no Domínio Central.

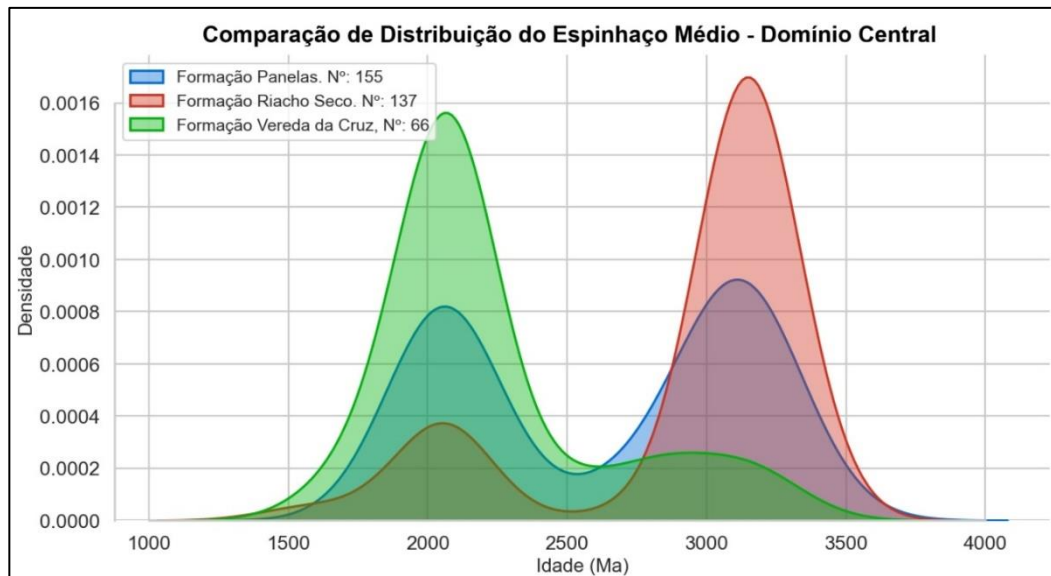


Fonte: O autor.

3.3.2 MEGASSEQUÊNCIA MÉDIA (CALIMIANO)

A Megassequência Média é representada por uma sucessão vulcano-sedimentar que compreende as formações Painelas, Riacho Seco e Vereda da Cruz. A Figura 18 apresenta os Diagramas de Densidade de Probabilidade compilados para essas três unidades.

Figura 18 - Gráfico PDP da Razão 207Pb/206Pb da Megassequência média do Espinhaço Central



Fonte: O autor

A Formação Panelas (curva Azul) apresenta fontes principais arqueanas e paleoproterozoicas (Riaciano-Orosiriano). Seus picos de idade foram em ~ 3161 Ma, ~ 3100 Ma, ~ 2667 Ma, ~ 2059 Ma e ~ 1965 Ma. O zircão detrítico mais jovem dessa formação foi de ~ 1700 Ma, definindo sua idade máxima de deposição.

A Formação Riacho Seco (curva vermelha) é dominada por fontes arqueanas, mostrando picos de ~ 3140 Ma, ~ 3139 Ma e picos subordinados em ~ 2050 Ma.

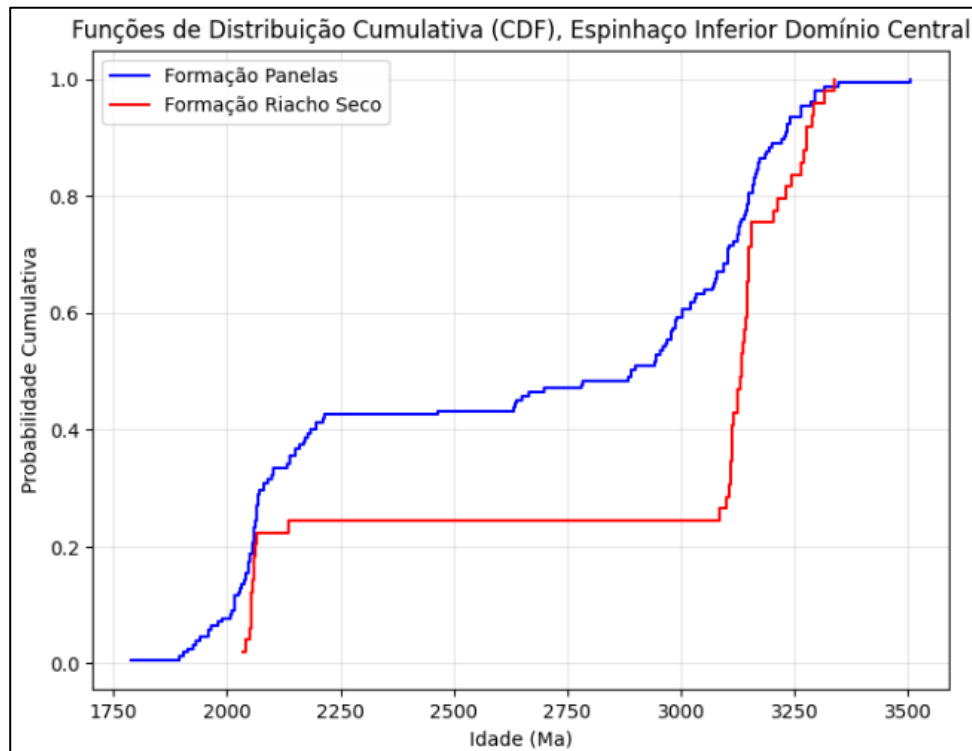
A Formação Vereda da Cruz (curva verde) é caracterizada por um pico dominante do Paleoproterozoico (Riaciano-Orosiriano), em ~ 2050 Ma. É possível ver outros picos de idades arqueanas, em ~ 2.8 Ga e ~ 3.1 Ga. O zircão detrítico mais jovem foi em ~ 1616 definindo a idade máxima de deposição.

Para quantificar as dissimilaridades, o teste K-S foi aplicado a todos os pares de formações desta megassequência (Formação Panelas, Riacho Seco e Vereda da Cruz). As funções de distribuição cumulativa para estas comparações são apresentadas nas Figura 19 a Figura 21.

Nas três comparações realizadas, o p-valor resultante foi de 0.00 para os dados da Formação Panelas e Formação Riacho Seco, 0.00 para as Formações Panelas e Vereda da Cruz e 0.00 para as Formações Riacho Seco e Vereda da Cruz. Isso indica que a hipótese nula (de que as amostras provêm da mesma população) deve ser rejeitada em todos os casos, portanto, as três formações possuem assinaturas de proveniência estatisticamente diferentes entre si.

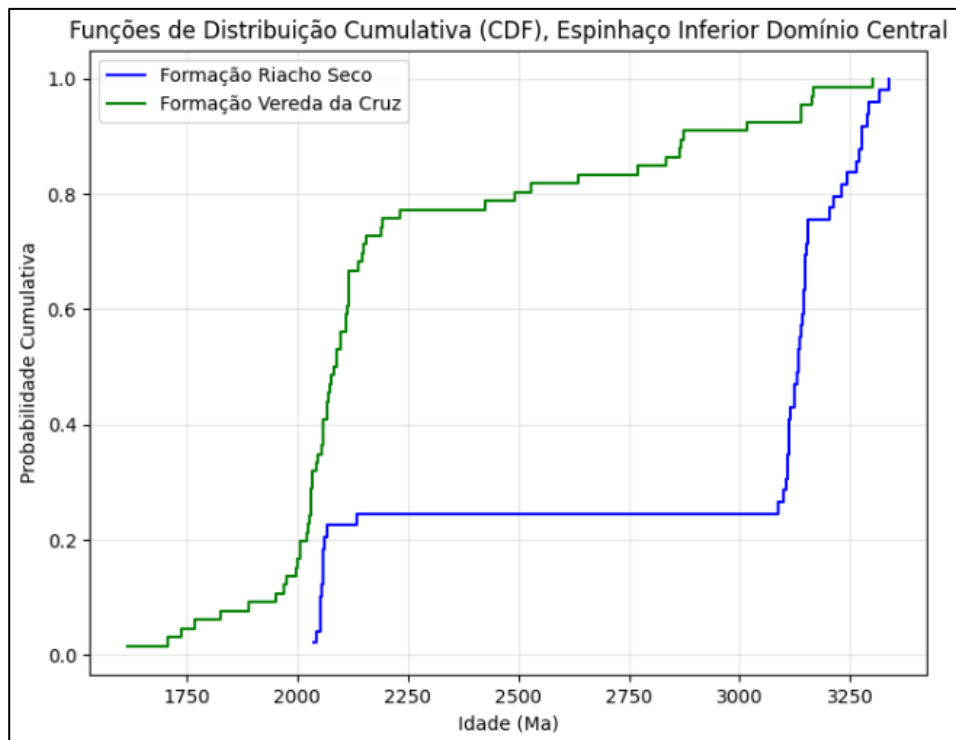
Essas diferenças estatísticas, visualizadas nos gráficos CDF, refletem as distintas fontes dominantes de cada unidade, a Formação Riacho Seco é dominada por fontes Arqueanas, a Formação Vereda da Cruz é dominada por fontes Riacianas-Orosirianas e a Formação Pannels apresenta uma assinatura mista de ambas as fontes.

Figura 19 - Gráfico da Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) das formações Pannels e Riacho Seco do Espinhaço Inferior no Domínio Central.



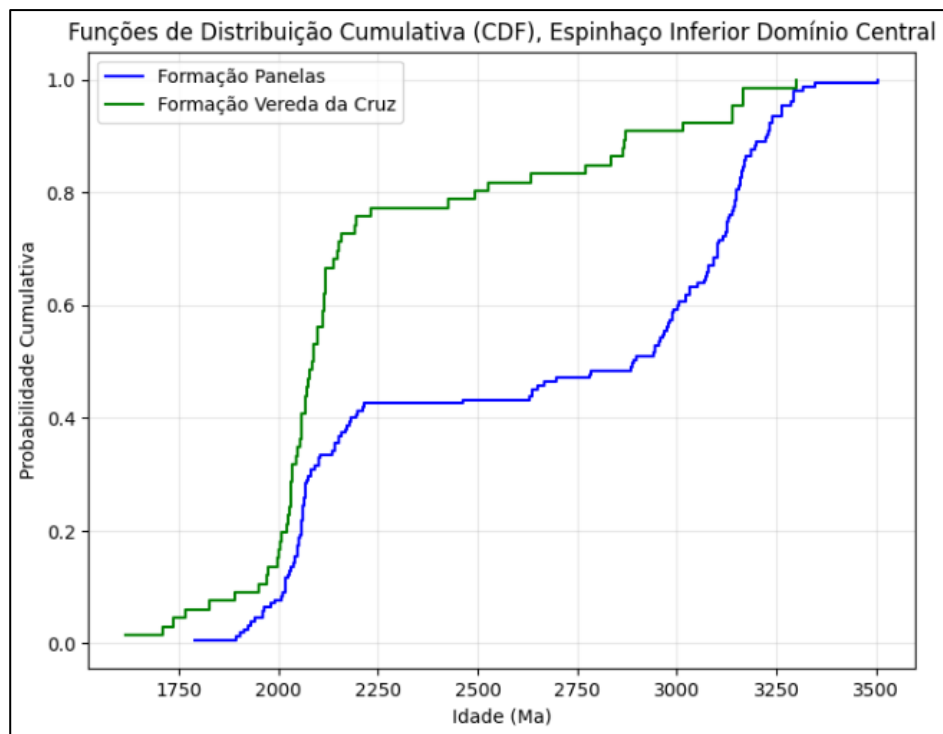
Fonte: O autor.

Figura 20 - Gráfico da Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) das Formações Riacho Seco e Vereda da Cruz do Espinhaço Inferior no Domínio Central.



Fonte: O autor.

Figura 21 - Gráfico da Funções de Distribuição Cumulativa (CDF) das Formações Painelas e Vereda da Cruz do Espinhaço Inferior no Domínio Central.

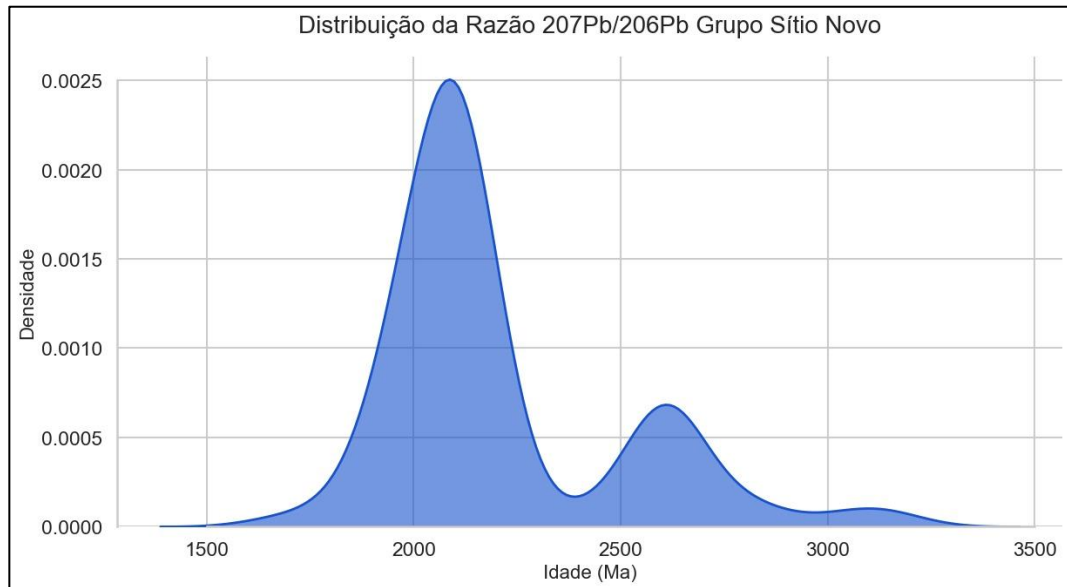


Fonte: O autor.

3.3.3 MEGASSEQUÊNCIA SUPERIOR (ESTENIANO-TONIANO)

A Megassequência Superior nesse domínio é composta pelo Grupo Sítio Novo. A Figura 22 apresenta o Diagrama de Densidade de Probabilidade compilado para esta unidade. Ao todo foram compiladas 293 idades de zircão detríticos para o Grupo Sítio Novo.

Figura 22 - Gráfico PDP da Razão $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ da Megassequência Superior do Espinhaço Central.



Fonte: O autor

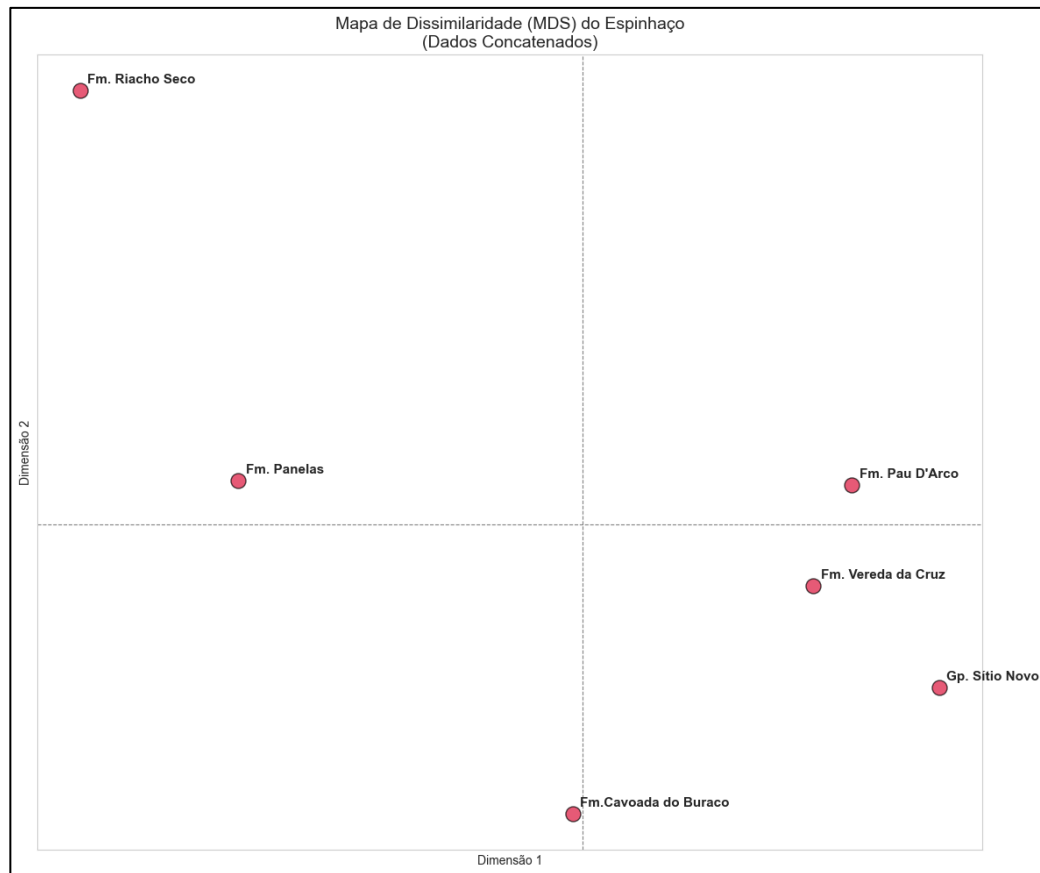
As fontes de zircão detrítico incluem idades do Arqueano, Paleoproterozoico, Estateriano e Calimiano, o pico mais proeminente em ambas as distribuições se situa no intervalo Riáciano-Orosiriano, em aproximadamente 2.1 Ga.

O Grupo Sítio Novo exibe um pico arqueano secundário bem definido, em ~2.6 Ga. Pode-se observar também dados em ~1.8 Ga.

3.3.4 SÍNTESE ESTATÍSTICA DO DOMÍNIO CENTRAL (MDS)

A Figura 23 apresenta o mapa de dissimilaridade obtido através do Escalonamento Multidimensional (MDS) para as unidades do Espinhaço Central. A distribuição espacial dos pontos reflete as distâncias estatísticas calculadas pelo teste Kolmogorov-Smirnov (KS).

Figura 23 - Gráfico de Escalonamento Multidimensional do Espinhaço Central.



Fonte: O autor.

A Formação Riacho seco se posiciona de forma isolada no extremo superior do gráfico (valores negativo na dimensão 1), a distância (D) que separa das demais formações indica que sua distribuição de idades possui uma maior dissimilaridade estatística em relação aos demais dados analisados.

Observa-se a formação de um cluster disperso na porção inferior do gráfico, composto pelas formações Cavoada do Buraco, Pau d'Arco, Vereda da Cruz e o Grupo Sítio Novo. A proximidade relativa entre esses pontos sugere um grau de similaridade estatística entre os zircões destas unidades.

A Formação Panelas ocupa uma posição transicional no espaço MDS, situando-se entre o agrupamento basal e o ponto isolado da Formação Riacho Seco, o que reflete estatisticamente uma assinatura de zircão detrítico com características intermediárias entre esses dois polos.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA PROVENIÊNCIA: HETEROGENEIDADE E COMPARTIMENTAÇÃO DA BACIA

A compilação e análise estatística dos dados de geocronologia U-Pb em zircão detrítico, por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e da Análise de Escalonamento Multidimensional (MDS), revelam padrões incompatíveis com um modelo de homogeneização sedimentar regional para o Supergrupo Espinhaço.

Os resultados do teste K-S indicam rejeição da hipótese nula ($p < 0,05$) para praticamente todas as comparações realizadas entre as unidades analisadas (Tabela 2). Isso demonstra que as distribuições de idades dos zircões detríticos são estatisticamente diferentes entre si.

Os elevados valores da estatística D observados em diversas combinações - como entre as formações Galho do Miguel e Córrego Pereira ($D = 0,7492$), Santa Rita e Córrego Borges ($D = 0,8125$) e Rio Pardo Grande e Córrego Pereira ($D = 0,1902$) – demonstram diferenças significativas nas populações de idade, sugerindo que as áreas-fonte não foram completamente misturadas ao longo da história deposicional da bacia.

A predominância de resultados classificados como ‘‘Diferentes’’ reforça a interpretação de que cada unidade preserva assinatura própria de proveniência, refletindo controles tectônicos e paleogeográficos distintos.

Tabela 2 - Teste K-S entre as unidades do Supergrupo Espinhaço.

| Formação A | Formação B | Estatística D | P-Valor | Resultado |
|------------------|---------------------|---------------|---------|------------|
| Bandeirinha | São João da Chapada | 0,2815 | 0,00 | Diferentes |
| Galho do Miguel | Rio Pardo Grande | 0,6582 | 0,00 | Diferentes |
| Galho do Miguel | Córrego Pereira | 0,7492 | 0,00 | Diferentes |
| Galho do Miguel | Córrego Borges | 0,2878 | 0,00 | Diferentes |
| Santa Rita | Rio Pardo Grande | 0,7394 | 0,00 | Diferentes |
| Santa Rita | Córrego Borges | 0,8125 | 0,00 | Diferentes |
| Santa Rita | Galho do Miguel | 0,2065 | 0,00 | Diferentes |
| Rio Pardo Grande | Córrego Pereira | 0,1902 | 0,00 | Diferentes |

| | | | | |
|---------------------|--------------------|--------|------|------------|
| Córrego Borges | Córrego Pereira | 0,7492 | 0,00 | Diferentes |
| Córrego Borges | Rio Pardo Grande | 0,6580 | 0,00 | Diferentes |
| Sintema Sapiranga | Sintema Algodão | 0,3185 | 0,00 | Diferentes |
| Cavoadas do Buraco | Pau d'Arco | 0,3339 | 0,01 | Diferentes |
| Panelas | Riacho Seco | 0,2065 | 0,00 | Diferentes |
| Panelas | Vereda da Cruz | 0,7502 | 0,00 | Diferentes |
| Riacho Seco | Vereda da Cruz | 0,7652 | 0,00 | Diferentes |
| Tombador Inferior | Tombador Superior | 0,3006 | 0,00 | Diferentes |
| São João da Chapada | Pau d'Arco | 0,2915 | 0,00 | Diferentes |
| Bandeirinha | Cavoadas do Buraco | 0,3545 | 0,00 | Diferentes |

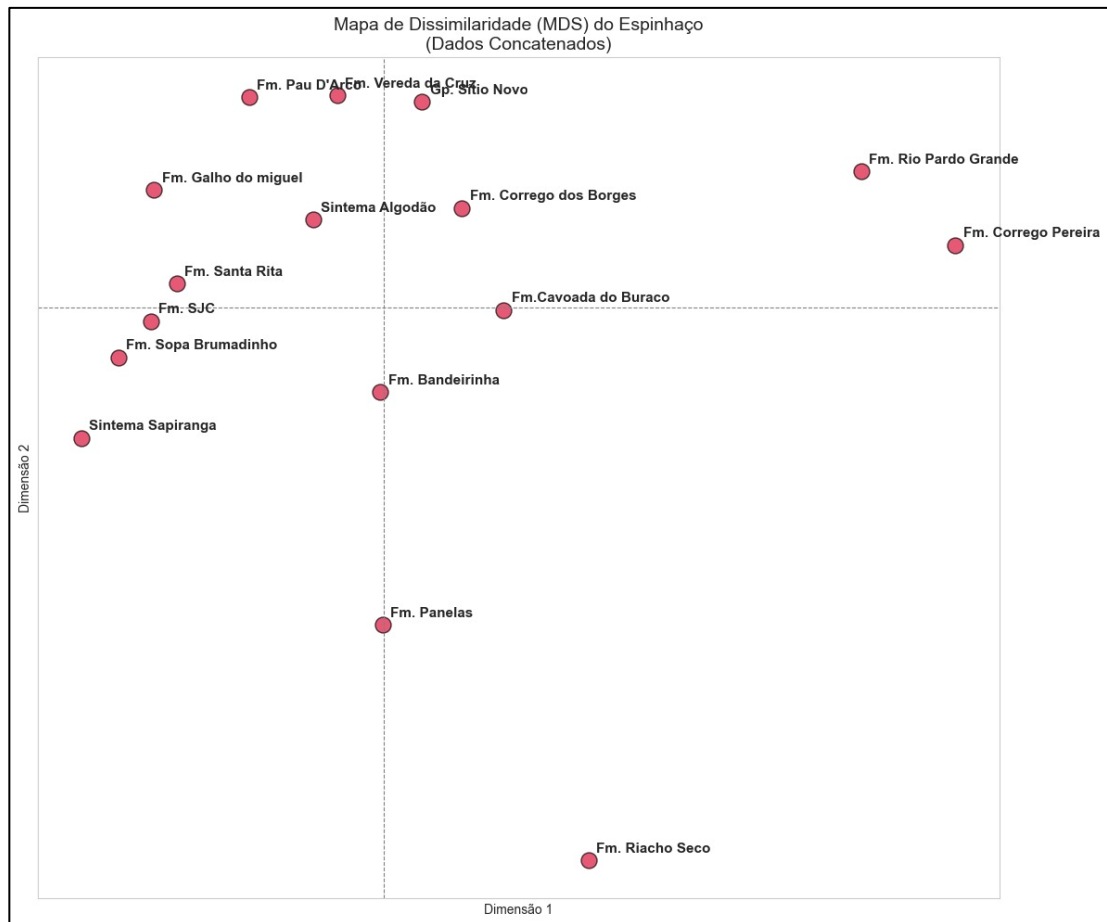
Fonte: O autor

A análise MDS (Figura 24) corrobora com os resultados do teste K-S. No diagrama bidimensional, as amostras não convergem para um agrupamento único, mas se distribuem em clusters isolados, evidenciando diferentes graus de similaridade entre as unidades.

A disposição dispersa das amostras indica assinaturas de proveniência distintas e reforça a interpretação de que a bacia não funcionou como um sistema amplamente integrado. Ao contrário, o padrão observado sugere a existência de compartimentos sedimentares parcialmente desconectados, com histórias próprias de aporte detrítico.

A separação entre determinados conjuntos de formações no espaço MDS aponta para contrastes regionais importantes, possivelmente associados a variações no embasamento exposto, na atividade tectônica e na configuração paleogeográfica ao longo do tempo.

Figura 24 - Gráfico de Escalonamento Multidimensional da Bacia do Espinhaço.



Fonte: O autor.

Os resultados estatísticos sustentam a interpretação de que a bacia manteve compartimentação interna significativa, mesmo durante fases sag. Isso indica que a integração sedimentar regional não foi suficiente para homogeneizar completamente as assinaturas isotópicas.

Estudos prévios (Chemale *et al.*, 2012; Danderfer *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2013) já sugerem que a bacia Espinhaço não se comportou como uma depressão ampla e contínua, mas como um conjunto de sub-bacias controladas por altos estruturais e zonas de reativação crustal. A persistência de assinaturas isotópicas distintas pode ser atribuída à presença de barreiras tectônicas, como o Alto do Gouveia, que atuou como obstáculo físico à dispersão sedimentar e manteve a individualidade das sub-bacias mesmo em estágios tardios de deposição no domínio meridional (Chemale *et al.*, 2012).

Além disso, diferenças entre os setores setentrional e meridional indicam evolução

tectônica não síncrona ao longo do eixo da bacia ((Danderfer *et al.*, 2015; Costa, 2017). Enquanto o setor norte registra eventos magmáticos calimianos e sedimentação associada a rifteamentos localizados, o setor sul apresenta sucessões dominadas por fontes mesoproterozoicas e taxas de subsidência mais expressivas. Essa assimetria longitudinal reforça a interpretação de uma bacia polifásica e multiepisódica, na qual pulsos de rifte e sag ocorreram de forma independente ao longo do tempo e do espaço.

Os métodos estatísticos K-S e MDS fornecem suporte matemático para a interpretação de uma paleogeografia complexa e dinâmica. A ausência de mistura completa dos sedimentos, já apontada por Guadagnin *et al.* (2015) reflete a superposição de eventos tectônicos intracratônicos associados à dinâmica intraplaca, além da subsidência térmica regional. Dessa forma, a bacia do Espinhaço pode ser interpretada como um sistema polifásico cuja heterogeneidade de proveniência reflete a interação entre retrabalhamento sedimentar, diferenciação tectônica e persistência de altos estruturais que segmentaram o cráton ao longo do Proterozoico.

4.2 ESPECTROS DE IDADES U-Pb E IMPLICAÇÕES PARA A PROVENIÊNCIA DO SUPERGRUPO ESPINHAÇO

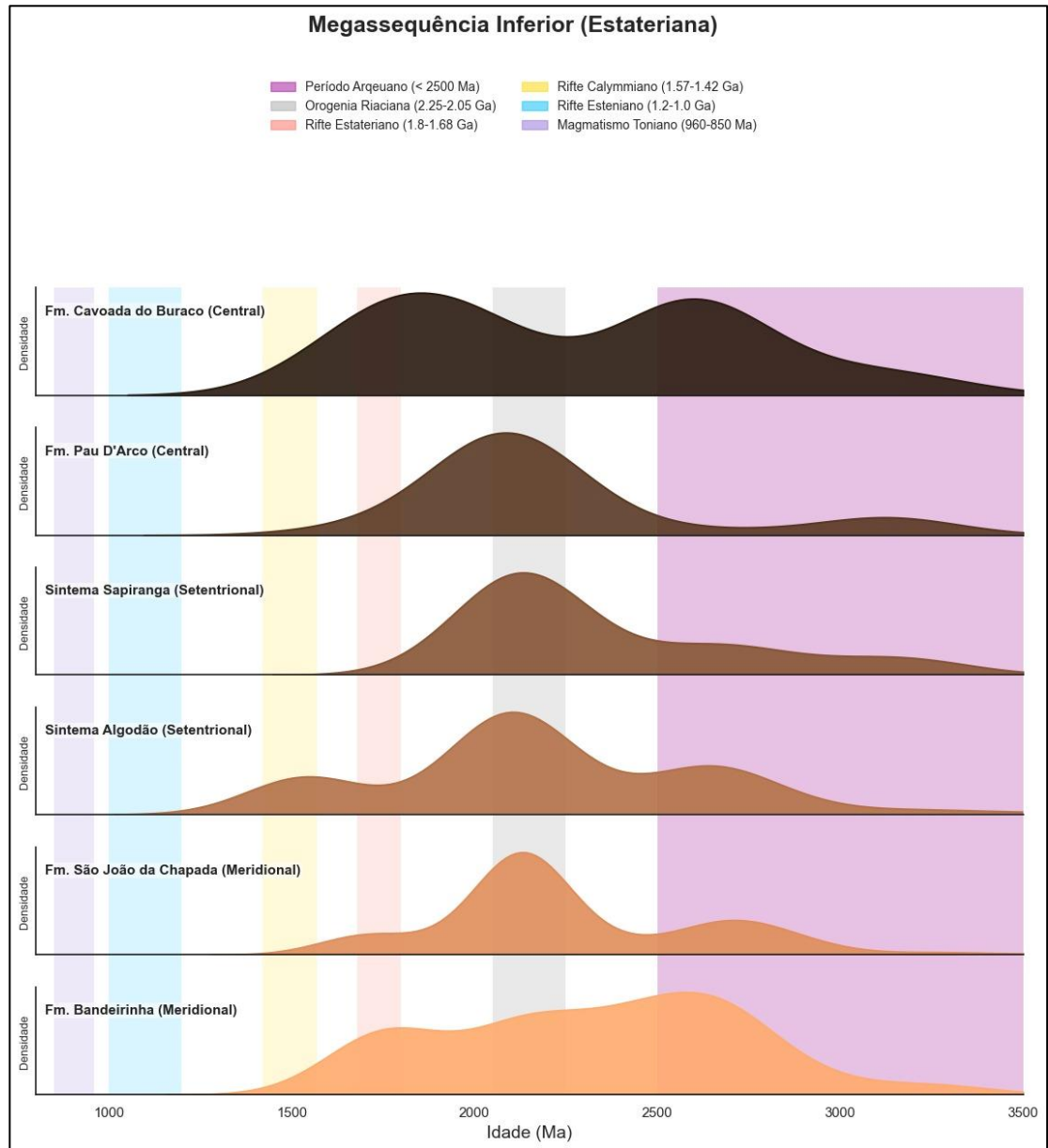
A proveniência sedimentar da bacia do Espinhaço foi analisada por meio da compilação de curvas de densidade de probabilidade (Probability Density Plots - PDP) de idades U-Pb em zircões detriticos, considerando as duas principais megassequências deposicionais. A comparação entre os espectros da porção inferior e superior da sucessão revela mudanças significativas na distribuição das idades, refletindo variações nas áreas-fonte e no contexto tectônico-sedimentar ao longo da evolução da bacia.

A Megassequência Inferior (Figura 25), associada às unidades basais depositadas durante a fase rifte, apresenta espectros predominantemente unimodais a bimodais, com baixa dispersão relativa das idades. O pico dominante concentra-se no Paleoproterozoico, em torno de 2,1 Ga, acompanhado por uma população subordinada no intervalo estateriano (~1,7 Ga). Observam-se ainda contribuições arqueanas menos expressivas, com picos em aproximadamente 2,5 Ga, 2,7 Ga e 3,2Ga.

Esse padrão indica contribuição significativa do embasamento do Cráton São Francisco, que atuou como principal área fonte durante a fase rifte inicial (Danderfer *et al.*, 2009; Chemale *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2013). A predominância do pico em ~2,1 Ga é compatível com a

ampla exposição de rochas formadas durante a Orogenia Riacciana, sugerindo aporte sedimentar proximal e limitado retrabalhamento.

Figura 25 - Gráfico PDP da Razão $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ do Espinhaço Inferior.



Fonte: O autor

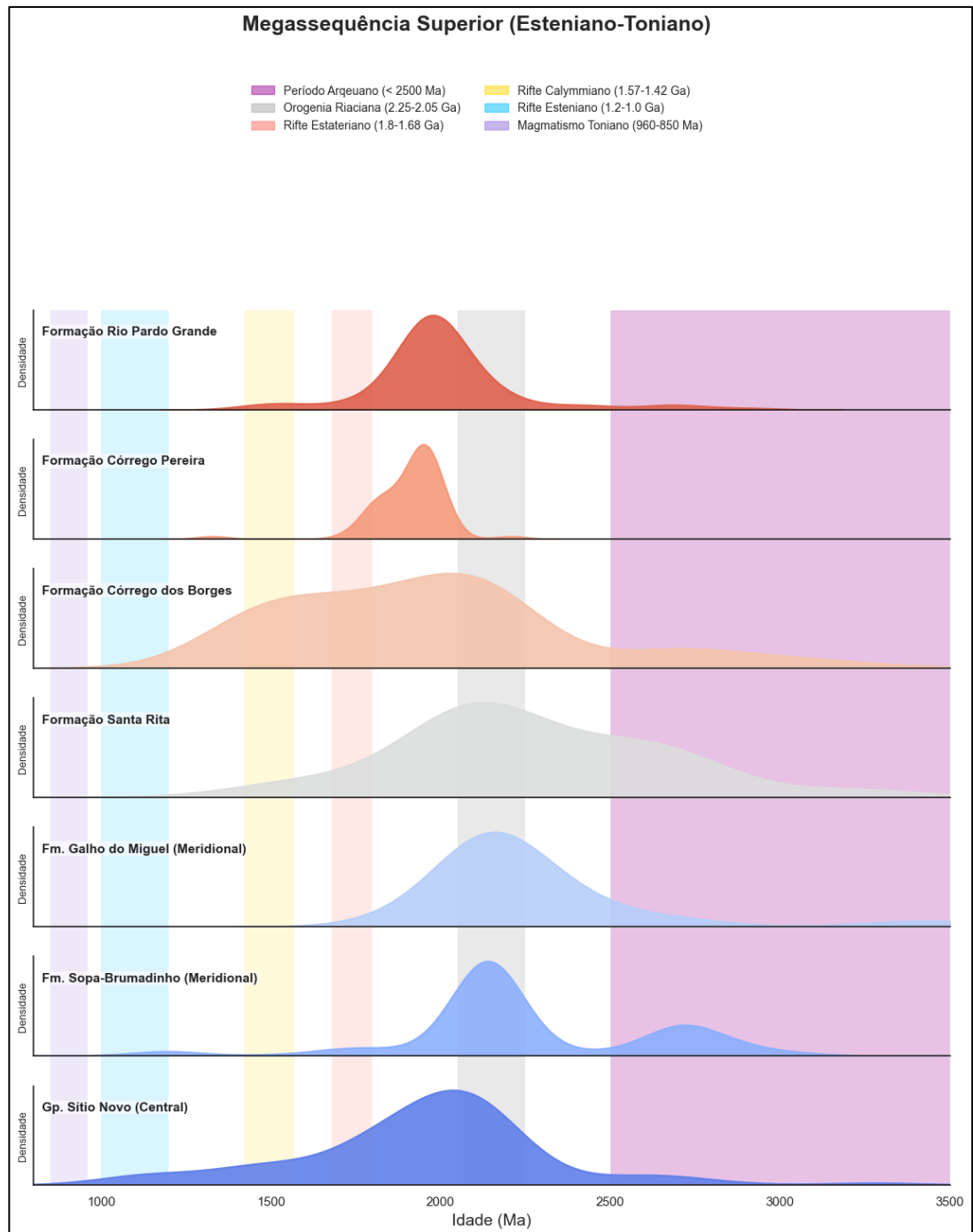
A presença menos expressiva de zircões arqueanos pode refletir tanto a distribuição espacial restrita dessas rochas no embasamento quanto processos de preservação diferencial. Em escala global, picos em $\sim 2,7$ Ga e $\sim 1,9$ – $2,1$ Ga têm sido interpretados como associados a grandes eventos de crescimento crustal associados a superplumas e à formação de crosta juvenil (Condie, 2009; Condie, 2011). Alternativamente, alguns autores argumentam que tais picos

refletem preferencialmente períodos de maior preservação da crosta continental durante ciclos de montagem de supercontinentes (Hawkesworth *et al.*, 2009). A distinção entre essas hipóteses requer integração com dados isotópicos das fontes ígneas (e.g., Lu-Hf), não abordados no presente estudo.

Em contraste, a Megassequência Superior (Figura 26) revela espectros marcadamente polimodais e maior dispersão das populações detríticas. Embora o pico paleoproterozoico em 2,1 Ga permaneça expressivo, observa-se: i) Intensificação da população em ~1,9 Ga; ii) desenvolvimento de ombros e picos no intervalo mesoproterozoica (~1,5 Ga); iii) ampliação da cauda arqueana (>2,5 Ga); iv) maior heterogeneidade entre unidades estratigráficas.

Esse padrão indica diversificação das áreas-fonte e aumento da complexidade tectono-sedimentar. Embora o início da Megassequência Superior esteja associado a subsidência regional (fase sag), evidências estratigráficas sugerem a persistência de atividade extensional e desenvolvimento de sistemas sintectônicos associados a half-grabens (Chemale *et al.* 2012; Costa, 2017; Medeiros *et al.*, 2024). A diversificação das idades reflete a ampliação das áreas-fonte, incluindo o embasamento cratônico e fontes associadas a eventos magmáticos e à reativação de estrutura intraplaca.

Figura 26 - Gráfico PDP da Razão 207Pb/206Pb do Espinhaço Superior.



Fonte: O autor.

Além disso, a sedimentação da Megassequência Superior ocorreu em ambiente deposicionais variados, abrangendo sistemas continentais, costeiros e marinhos rasos, o que favoreceu maior retrabalhamento sedimentar e reciclagem de depósitos mais antigos. Esse processo é evidenciado pela reintrodução de zircões arqueanos e paleoproterozoicos, bem como pela mistura de populações mais jovens, indicando ciclos de erosão e ressedimentação. Assim,

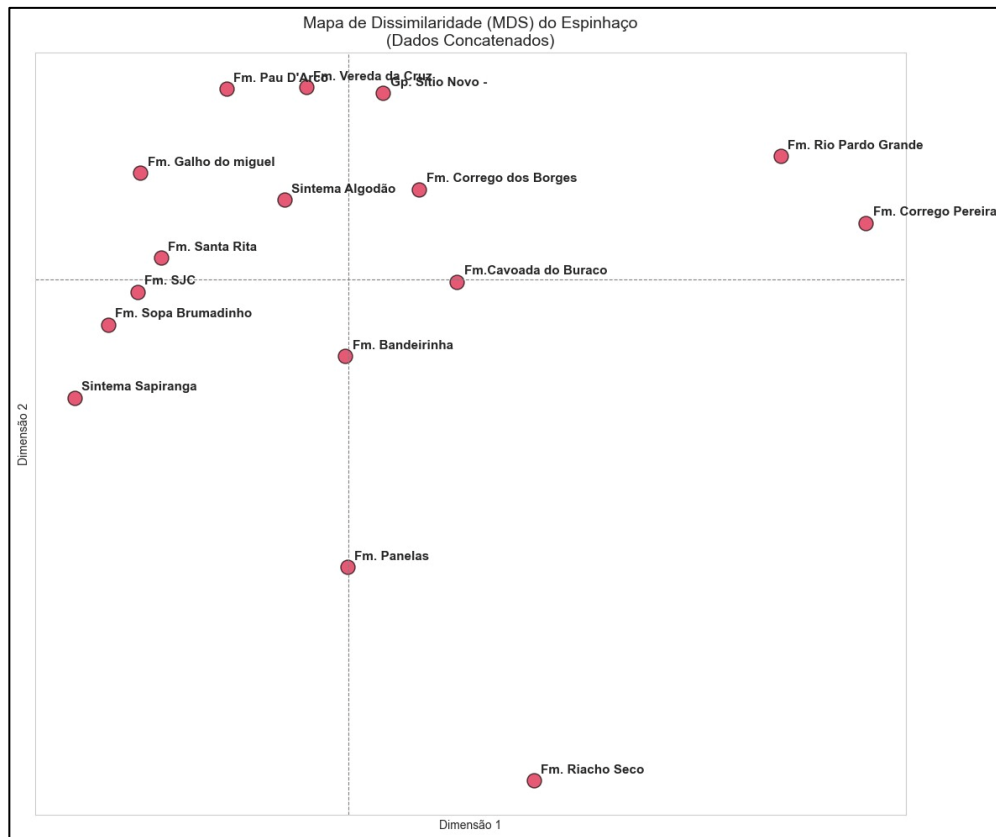
o espectro polimodal da Megassequência Superior reflete um sistema deposicional mais aberto e integrado em termos de conectividade regional, controlado por reorganização tectônicas e paleogeográfica da bacia.

A análise de Escalonamento Multidimensional (MDS) (Figura 27) aplicada aos dados concatenados reforça a interpretação de heterogeneidade espacial na proveniência.

O diagrama evidencia agrupamentos estatísticos distintos, indicando que, apesar do aumento das áreas-fonte na Megassequência Superior, não houve completa homogeneização sedimentar em escala regional. Algumas unidades, como as formações Rio Pardo Grande e Córrego Pereira, apresentam elevada dissimilaridade estatística, posicionando-se isoladamente no espaço MDS, o que sugere assinaturas de proveniência específicas.

Por outro lado, a proximidade entre unidades de diferentes domínios geográficos, como o Sistema Sapiranga (Setentrional) e formações basais do domínio Meridional, indica que o controle tectônico herdado e a reorganização estrutural exerceram papel mais determinante do que a simples posição estratigráfica ou localização geográfica.

Figura 27 - Gráfico de Escalonamento Multidimensional da Bacia do Espinhaço.



Fonte: O autor.

De forma integrada, os espectros de idades U–Pb do Supergrupo Espinhaço registram a transição de um sistema de rifte, dominado por aporte cratônico paleoproterozoico e fontes proximais e um sistema mais complexo e integrado, caracterizado por múltiplas áreas-fonte, retrabalhamento sedimentar e reativações tectônicas intraplaca. A evolução da proveniência reflete diretamente a natureza policíclica da Bacia do Espinhaço e fornece subsídios essenciais para a compreensão da arquitetura estratigráfica regional.

4.3 ESTÁGIOS DE DESENVOLVIMENTO DA BACIA E IMPLICAÇÕES PARA A CORRELAÇÃO ESTRATIGRÁFICA

A análise integrada dos dados geocronológicos detriticos permite reconhecer que as diferenças entre os estágios de desenvolvimento da bacia do Espinhaço exerceram influência direta tanto nos padrões de proveniência sedimentar quanto na correlação estratigráfica regional entre as unidades. A evolução da bacia não apenas condicionou o funcionamento dos sistemas deposicionais, mas também controlou o grau de similaridade geocronológica entre sucessões estratigraficamente equivalentes em diferentes setores do Espinhaço.

Durante o estágio inicial (Megassequência Inferior), a bacia foi dominada por rifteamento intracontinental com forte controle estrutural herdado do embasamento do Cráton do São Francisco. Nesse contexto, a sedimentação ocorreu em sub-bacias isoladas, limitadas por altos estruturais ativos, o que resultou em: i) áreas-fonte predominantemente locais e pouco diversificadas; ii) baixa integração sedimentar regional; iii) assinaturas de proveniência relativamente homogêneas dentro de cada compartimento, porém distintas entre elas. Nesse contexto, correlações regionais baseadas apenas em idade deposicional ou similaridade litológica tornam-se limitadas, pois unidades equivalentes podem registrar assinaturas geocronológicas diferentes.

A transição para a fase sag foi marcada por ampliação do espaço de acomodação associada à subsidência térmica. No entanto, os dados indicam que não houve homogeneização completa das fontes sedimentares.

A persistência da herança estrutural e a atuação de reativações intraplaca mantiveram padrões de proveniência heterogêneos. Nesse estágio, as correlações estratigráficas tornam-se mais complexas, pois unidades temporalmente equivalentes podem registrar espectros de idades distintos, refletindo variações no grau de isolamento ou integração entre os compartimentos da bacia. Esse comportamento reforça a interpretação de que a fase sag do Espinhaço não correspondeu a um estágio exclusivamente passivo e uniforme, mas a um período de subsidência diferencial, conforme proposto por Medeiros *et al.*, (2024).

No estágio tardio, correspondente à Megassequência Superior, a bacia passou a operar como um sistema mais aberto, caracterizado por: i) ampliação das áreas-fonte; ii) diversificação dos ambientes deposicionais; iii) intensificação da reciclagem sedimentar; iv) maior mistura de populações detríticas.

A atuação de novos pulsos extensionais mesoproterozoico e a reativação de lineamentos crustais favoreceram a incorporação de fontes secundárias e o retrabalhamento de sedimentos previamente depositados. Esse cenário resultou em espectros de proveniência mais complexos e polimodais, nos quais a similaridade geocronológica entre unidades pode refletir não apenas sincronia deposicional, mas também processos de ressedimentação e mistura sedimentar.

Os resultados demonstram que a proveniência sedimentar e o potencial de correlação estratigráfica variam conforme o estágio evolutivo da bacia. Estágios iniciais, mais compartimentados, preservam assinaturas de proveniência controladas por fontes locais, enquanto estágios mais tardios, tendem a registrar maior mistura sedimentar e integração

regional. Essa dinâmica explica a coexistência de unidades correlatas com espectros geocronológicos distintos.

Portanto, correlações regionais baseadas exclusivamente em assinaturas geocronológicas devem ser realizadas com cautela, sendo indispensável a integração com dados sedimentológicos, estratigráficos e estruturais.

Em síntese, a evolução policíclica e compartimentada da Bacia do Espinhaço constitui um fator chave para a interpretação da proveniência detrítica e para a realização de correlações estratigráficas regionais. A análise integrada dos espectros U-Pb e da dissimilaridade estatística demonstra que mudanças nos estágios de desenvolvimento da bacia controlam diretamente a diversidade de fontes, o grau de reciclagem sedimentar e o potencial de correlação entre unidades.

5 CONCLUSÃO

A compilação sistemática dos dados disponíveis permitiu organizar e padronizar os espectros de idades das principais unidades estratigráficas, constituindo uma base comparativa robusta para análise regional. A partir dessa consolidação, foi possível caracterizar os padrões dominantes de proveniência em cada megassequência deposicional.

A aplicação de métodos estatísticos – incluindo Diagramas de Densidade e Probabilidade (PDP/KDE), teste de Kolmogorov-Smirnov e Escalonamento Multidimensional (MDS) - possibilitou a comparação quantitativa das distribuições de idades entre as unidades. Os PDPs evidenciaram diferenças na forma e complexidade dos espectros detriticos, enquanto o teste KS permitiu avaliar a significância estatística dessas diferenças. A análise MDS, por sua vez, revelou padrões de agrupamento e dissimilaridade, demonstrando que a bacia manteve compartimentação tectônica mesmo em estágios de subsidência regional.

A partir da comparação sistemática entre a Megassequência Inferior e Megassequência Superior foi possível avaliar as variações nas assinaturas de proveniência. A sucessão inferior apresenta espectros predominantemente unimodais e bimodais, com forte concentração paeloproterozoica (~2,1 Ga), indicando contribuição dominante do embasamento do cráton do São Francisco durante o estágio rifte inicial. Em contraste, a sucessão superior exige espectros polimodais e maior dispersão de idades, incluindo contribuições mesoproterozoicas e ampliação da componente arqueana, refletindo diversificação das áreas-fonte e intensificação da reciclagem sedimentar.

Por fim, os resultados permitiram reconhecer que a proveniência sedimentar no Espinhaço é fortemente condicionada pelo estágio evolutivo da bacia. O estágio rifte inicial foi caracterizado por sistemas compartimentados e aporte proximal controlado pelo embasamento cratônico. A transição rifte–sag ocorreu de forma gradual, com persistência de atividade extensional e reativações intraplaca, culminando em um sistema mais aberto e integrado na Megassequência Superior. Assim, a evolução policíclica da bacia refletiu mudanças na conectividade sedimentar, na diversidade das áreas-fonte e na dinâmica tectônica regional.

Em síntese, os resultados demonstram que a integração entre compilação de dados, análise estatística quantitativa e interpretação tectonoestratigráfica constitui abordagem eficaz para compreender a história deposicional da Bacia Espinhaço. Além disso, evidenciam que correlações estratigráficas baseadas exclusivamente em espectros U-Pb devem ser realizadas com cautela, sendo imprescindível a integração com dados estratigráficos e estruturais para

reconstruções regionais mais consistentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALKMIN, F. F.; BRITO-NEVES, B. B.; CASTRO-ALVES, J. A. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco: uma revisão. In: DOMINGUEZ, J. M. L.; MISI, A. (Ed.). **O Cráton do São Francisco**. Salvador: SBG, 1993. p. 45-62.
- ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, p. 349-364, 1977.
- ALMEIDA, F. F. M. et al. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**, v. 17, n. 1-2, p. 1-29, 1981.
- BABINSKI, M. et al. Idade isocrônica Pb/Pb em rochas carbonáticas da Formação Caboclo em Morro do Chapéu, BA. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2., 1993, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia/SGM, 1993. p. 160-163.
- BERSAN, S. M. et al. Paleoproterozoic juvenile magmatism within the northeastern sector of the São Francisco paleocontinent: Insights from the shoshonitic high Ba-Sr Montezuma granitoids. **Geoscience Frontiers**, v. 10, n. 4, p. 1455-1473, 2019.
- CAXITO, F. **Datação de rochas por métodos isotópicos**. 2. ed. Curitiba: Editora CRV, 2021.
- CHAVES, M. L. S. et al. Grenvillian age magmatism in the Southern Espinhaço Range (Minas Gerais): evidence from U-Pb zircon ages. **Brazilian Journal of Geology**, v. 43, n. 3, p. 477–486, 2013.
- CHEMALE JUNIOR, F. et al. Unravelling a Proterozoic basin history through detrital zircon geochronology: The case of the Espinhaço Supergroup, Minas Gerais, Brazil. **Gondwana Research**, v. 22, n. 1, p. 200-206, 2012.
- CONDIE, K. C. Growth of continental crust: a review. **Geological Society of America Special Papers**, v. 440, p. 1–15, 2009.
- CONDIE, K. C. Earth as an evolving planetary system. 2. ed. Burlington: **Academic Press**, 2011.

COSTA, A. F. O.; DANDERFER, A.; LANA, C. O registro do vulcanismo calimiano no Espinhaço Central (MG): caracterização petrofaciológica, geoquímica e geocronológica. **Geociências**, v. 33, n. 1, p. 119-135, 2014.

D'AGRELLA FILHO, M. S. et al. Paleomagnetism of precambrian rocks of Gabon, Congo craton, Africa. **Journal of African Earth Sciences**, v. 22, n. 1, p. 65–80, 1996.

DANDERFER, A. et al. New geochronological constraints on the geological evolution of Espinhaço basin within the São Francisco Craton-Brazil. **Precambrian Research**, v. 170, n. 1-2, p. 116-128, 2009.

DANDERFER FILHO, A. et al. Constraints on the Statherian evolution of the intraplate rifting in a Paleo-Mesoproterozoic paleocontinent: New stratigraphic and geochronology record from the eastern São Francisco craton. **Gondwana Research**, v. 28, n. 2, p. 668-688, 2015.

DANDERFER, F. A. et al. Provenance of the Statherian Espinhaço rift basin (southeastern Brazil): Evidence for a rift-sag transition and links with the Congo basin. **Precambrian Research**, v. 266, p. 234-254, 2015.

FEYBESSE, J. L. et al. The West Central African belt: a model of 2.5-2.0 Ga accretion and two-phase orogenic evolution. **Precambrian Research**, v. 87, n. 3-4, p. 161–216, 1998.

GUADAGNIN, F.; CHEMALE JUNIOR, F. Detrital zircon record of the Paleoproterozoic to Mesoproterozoic cratonic basins in the São Francisco Craton. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 60, p. 104-116, 2015.

GUADAGNIN, F. et al. Age constraints on crystal-tuff from the Espinhaço Supergroup - Insight into the Paleoproterozoic to Mesoproterozoic intracratonic basin cycles of the Congo-São Francisco Craton. **Gondwana Research**, v. 27, n. 1, p. 363-376, 2015.

HAWKESWORTH, C. J. et al. The generation and evolution of continental crust. **Journal of the Geological Society**, v. 166, p. 479–491, 2009.

HEILBRON, M. et al. The São Francisco Craton and its Margins: Tectonic Genealogy of a Miniature Continent. In: HEILBRON, M. et al. (Ed.). **São Francisco Craton, Eastern Brazil**. Springer, 2017. p. 321-331. (Regional Geology Reviews).

LOUREIRO, H. S. C. et al. **Projeto Barra-Oliveira dos Brejinhos: Relatório Final e Mapas**. Salvador: CPRM/CBPM, 2008.

MEDEIROS, A. C. et al. Syn-tectonic sedimentation and extensional tectonics in the upper Espinhaço succession. *Journal of South American Earth Sciences*, 2024.

MOREIRA, H. F. et al. Record of Early Tonian mafic magmatism in the central Espinhaço (Brazil): New insights for break-up of the Neoproterozoic landmass ancestor of São Francisco-Congo paleocontinent. *Precambrian Research*, v. 355, 104822, 2021.

PEDROSA-SOARES, A. C. et al. The Araçuaí-West Congo orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. *Precambrian Research*, v. 110, n. 1-4, p. 307-323, 2001.


SANTOS, M. N. et al. Sedimentological and paleoenvironmental constraints of the Statherian and Stenian Espinhaço rift system, Brazil. *Sedimentary Geology*, v. 290, p. 47-59, 2013.

SANTOS, J. O. S. et al. The Araçuaí-West Congo Orogen of the São Francisco-Congo Craton: A review of a classic Neoproterozoic orogen. In: **West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region**. London: Geological Society, 2013. p. 365-394. (Geological Society, London, Special Publications, 388).


SILVA, L. C. da et al. Disclosing the Paleoproterozoic to Ediacaran history of the São Francisco Craton basement: The Porteirinha domain (northern Araçuaí orogen, Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, v. 68, p. 50-67, 2016.

TROMPETTE, R. **Geology of Western Gondwana (2000-500Ma): Pan-African-Brasiliano aggregation of South America and Africa**. Amsterdam: Balkema, 1994. 350 p.

ANEXO A

| | |
|--|---|
| <p>Material compilado das Amostras</p> |  Material Completo.zip |
|--|---|

ANEXO B

| | |
|--|--|
| <p>Material compilado das Idades de Zircão Detritico</p> |  material para análises estatísticas.zi |
|--|--|